



DIRECTION PRODUCTION INGENIERIE
SERVICE ETUDES ET PROJETS
THERMIQUES ET NUCLEAIRES

SEPTEN A : PJO CP.
CC : CIPN GMAP PJR R & D 3
D
N06D0046294 20/12/2006

Diffusé le Voir code barres ci-dessus
Réf ENSEMD050342A

Entité émettrice : Division Systèmes Électriques

Rédacteur : patrice Thérond

Nbre de pages 29

Domaine d'application REP 900 MWe et 1300 MWe

Nbre d'annexes

Titre Durée de Vie des centrales nucléaires – Dossier durée de vie 40/60 ans des câbles électriques

ENSEMD050342	A	← Référence	E230/028181/EVDURVIEN
		Code Projet →	

Type de document : **Note d'étude**

Mots clés Câbles électriques – Management de la Durée de Vie – Dossier durée de vie
Résumé : Dans le cadre du projet « Durée de Vie des centrales nucléaires », cette note constitue le dossier « durée de vie 40/60 ans » concernant les câbles. Les câbles étudiés sont installés dans et hors Bâtiment Réacteur, de niveau de qualification NC/K3, K2 et K1, et font l'objet des « contrats I E G. » (Installations Electriques Générales) – ne sont pas étudiés les câbles faisant l'objet des « contrats I E D. » (Installations Electriques Diverses : éclairage, téléphonie, etc)
L'étude porte sur les paliers 900 et 1300 MWe

Rédacteur		Vérificateur		Approbateur			
				Chef d'entité		Chef de rang supérieur	
Nom-Date	Visa	Nom-Date	Visa	Nom-Date	Visa	Nom-Date	Visa
Patrice Thérond 7/12/06		Bernard Givaudan 11.12.06		Bernard Pace 12.12.06			

Evolutions des trois derniers indices

Cocher s'il y a changement de méthodologie
Cocher ici s'il y a evolution des données amont

Indice	Date d'approbation	Motif du changement d'indice	Modifications apportées		
A		Création			

Elaboré sous AQ	OUI	Archivé au FDU	OUI	Copyright EDF 2005
Archivage long	OUI			
☐ Confidentiel	L'initiateur établit une liste nominative des destinataires. Chacun d'eux reçoit un exemplaire numéroté et ne peut étendre la diffusion sans l'accord de l'initiateur.			
☐ Dif Restreinte	L'initiateur établit une liste explicite des destinataires. Le chef de service d'un destinataire peut étendre la diffusion sous sa responsabilité et dans sa Direction (sur la base d'une liste explicite).			
☒ Acces E D F	Ne peut être transmis à l'extérieur d'EDF que par un chef de service.			
☐ Acces libre	Document public			

SEPTEN

EDF SEPTEN		Note d'étude ENSEMD050342		Indice A		Page 2/29	
Durée de Vie des centrales nucléaires – Dossier durée de vie 40/60 ans des câbles électriques							
FICHE DE GESTION							
Important pour la sûreté (IPS)				OUI ☒ NON ☐			
Document HPIC				OUI ☐		NON ☒	
Verification	demandee	OUI ☐	Par EDF	☐	En ligne	☐	En cours ☐
Indépendante		NON ☒	Hors EDF	☐	En différé	☐	Effectuée ☐
Responsable vérification (NOM, SERVICE / SOCIÉTÉ)							
Prédifussion du présent indice				OUI ☒		NON ☐	
Auprès de M RIBES (Septen/Pr) , M REMY (Septen/Pr) , M FAGEON (DPN/CAPE/GMAP) , M. DEFRANCE (CIPN) Mme MONCHY-LEROY (R&D/MMC/T25- Renardières) , Mme BAUBY (R&D – Chatou)							
Existe-t-il un dossier d'étude associé à la note a cet indice ?				OUI ☒		NON ☐	
Note support à une position technique formalisée du SEPTEN				OUI ☐		NON ☒	
Contrôle linguistique renforcé				OUI ☐		NON ☒	

EDF SEPTEN	Note d'étude ENSEMD050342	Indice A	Page 3/29
Durée de Vie des centrales nucléaires – Dossier durée de vie 40/60 ans des câbles électriques			
SYNTHÈSE Dans le cadre du projet « Durée de Vie des centrales nucléaires », cette note constitue le dossier « durée de vie 40/60 ans » concernant les câbles. Les câbles étudiés sont installés dans et hors Bâtiment Réacteur, de niveau de qualification NC/K3, K2 et K1, et font l'objet des « contrats I E G » (Installations Electriques Générales) – ne sont pas étudiés les câbles faisant l'objet des « contrats I E D » (Installations Electriques Diverses : éclairage, téléphonie, etc.) L'étude porte sur les paliers 900 et 1300 MWe L'analyse fait ressortir le besoin d'études, appuyées sur des avancées de R&D, pour conforter définitivement les conclusions du « DAPE câbles électriques ». En particulier, il est recherché une identification précise du temps pour l'apparition d'un « effet falaise » conduisant à la « ruine » rapide du câble. Les conclusions actuelles, à conforter, ne font pas apparaître un besoin de recâblage complet des tranches pour aller à une durée de vie de 50 ans et plus. Une estimation de l'impact d'un recâblage partiel est faite. Elle montre, en fonction des hypothèses retenues, les coûts et les délais des éventuelles opérations qui pourraient être nécessaires.			

SOMMAIRE

1. Références	6
2. Introduction.....	8
2.1 Périmètre de la note	8
2.2 Objectif de la note	8
2.3 Démarche adoptée	8
3. Périmètre de l'étude.....	8
3.1 Description du matériel.....	9
3.2 Câbles concernés	10
3.2.1 Familles de câbles	10
3.2.2 Type de câbles	10
3.2.3 Quantitatif.....	10
4. Mécanisme de vieillissement et modes de défaillance	11
4.1 Modes de défaillance	11
4.1.1 Résistance linéique	11
4.1.2 Résistance d'isolement.....	12
4.1.3 Tenue diélectrique	12
4.2 Mécanisme de vieillissement.....	12
5. Etude de durée de vie	14
5.1 Câbles PVC/PVC K3/K2 – Approche empirique	14
5.2 Modèle semi-empirique – Cas des câbles K1 (EPR/HYPALON)	15
5.2.1 Démarche retenue	15
5.2.2 Vieillissement accéléré et mécanismes de vieillissement	15
5.2.3 Loi de comportement - Principe de construction.....	16
5.2.4 Loi de comportement - Prédiction de la durée de vie	17
5.2.5 Résultats obtenus.....	17
5.3 Modèle semi-empirique – Cas des câbles PVC/PVC K3/K2	18
5.3.1 Propriété d'allongement à la rupture.....	18
5.3.2 Dosage des ions chlorures	19
5.3.3 Résultats obtenus.....	20
5.4 Points potentiellement fragiles des dossiers (à méthode non remise en cause).....	20

Durée de Vie des centrales nucléaires – Dossier durée de vie 40/60 ans des câbles électriques

6. Démonstration complémentaire	21
7. Perspectives.....	22
8. Eléments de coût et de délai	22
8.1 Recâblage complet d'une tranche	22
8.1.1 Délai.....	22
8.1.2 Coût	23
8.2 Recâblage partiel d'une tranche	23
9. Eléments internationaux	25
10. Synthèse Evénements/Options/Conséquences	26
10.1 Points chauds	26
10.2 Contrainte locale de pose	27
10.3 Formulation/conception du câble.....	28
10.4 Résultats des études de recherche et développement.....	28
10.5 Arrêt des études de recherche et développement.....	28
10.6 Position de l'Autorité de Sureté.....	29
11. Conclusion.....	29

EDF SEPTEN	Note d'étude ENSEMD050342	Indice A	Page 6/29
Durée de Vie des centrales nucléaires – Dossier durée de vie 40/60 ans des câbles électriques			
1. Références			
[1]	Note HP-14/04/032/B , Projet « Durabilité REP II évaluation technico-économique d'une tranche nucléaire » - Méthode d'instruction des Dossiers Composants et transverses,		
[2]	Note ENSEMD030360A , Dossier d'Aptitude à la Poursuite de l'Exploitation relatif aux câbles K1 du palier REP 900 MWe situés en ambiance « points chauds »,		
[3]	F A V 202-01-01-D , Câbles électriques HTA, BT-Puissance, Contrôle, Mesure en condition d'ambiance « RCC-E »,		
[4]	F A V 202-02-01-D , Câbles électriques HTA, BT-Puissance, Contrôle, Mesure en condition d'ambiance « points chauds »,		
[5]	HN 33 S 25 . Document de normalisation EDF « Câbles à isolant synthétique EPR pour centrales nucléaires »,		
[6]	CST 74 C 057 Cahier des Spécifications Techniques pour les câbles à isolation et gainage en polychlorure de vinyle,		
[7]	HN 33 S 24 Document de normalisation EDF « Câbles unipolaires 630mm ² isolés au polyéthylène réticulé pour les liaisons 6,6 kV de centrales thermiques et nucléaires,		
[8]	D4008 27 03/01-043-JCB Doctrine de maintenance des câbles et connectiques associées,		
[9]	HT-25/05/044/A Document préparatoire à la journée de présentation sur le thème des Polymères,		
[10]	Nadjet KHELIDJ : Thèse n°2006 ENAM 003 du 4/10/2006 Vieillessement d'isolants de câbles en polyéthylène en ambiance nucléaire (Thèse effectuée dans le cadre du Projet EDF « MORGANE »),		
[11]	Nadjet KHELIDJ troisième rapport d'avancement de thèse (Thèse effectuée dans le cadre du Projet EDF « MORGANE »),		
[12]	HM-65/2979 Synthèse finale des études sur le PVC pour câbles de centrale,		
[13]	HM-65/96/0050A Guide d'expertise câbles de centrale, Identification de la nature chimique des plastifiants de matériaux PVC,		
[14]	HM-65/94/0184A Projet durée de vie Synthèse des études sur les câbles K1 en EPR/CSPE,		
[15]	HM-65/94/0001 Evaluation du comportement à long terme des câbles PVC/PVC et EPR/HYPALON – Modélisation,		
[16]	Base SAPHIR incident 112402 (01/04/1995),		
[17]	Rapport DSR n°(en attente), Chapitre 3 Examen du vieillissement des composants, systèmes et structures des REP (GPR du 11 mai 2006)		
[18]	Fiche de communication ENSECC050199 de F RAUZY		
[19]	PCA22Z000015000MICD A Evaluation financière du remplacement total ou partiel des câbles du bâtiment réacteur		

EDF SEPTEN	Note d'étude ENSEMD050342	Indice A	Page 7/29
Durée de Vie des centrales nucléaires – Dossier durée de vie 40/60 ans des câbles électriques			
[20]	EPRI Nuclear Energy Plant Optimization (NEPO) program cable system aging management projects November 2002		
[21]	IAEA Assesment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety in-containment instrumentation and control cables (volume 1 & 2) December 2000		
[22]	NMAC Power plant practices to ensure cable operability		
[23]	HT-25/05/032A Cartographie des points chauds, Analyse de la première campagne de mesures des micro-capteurs de dose et de température		
[24]	F A V P 202-01-01-A , Câbles électriques HTA, BT-Puissance, Contrôle, Mesure en condition d'ambiance « RCC-E »,		
[25]	F.A V P 202-02-01-A , Câbles électriques HTA, BT-Puissance, Contrôle, Mesure en condition d'ambiance « points chauds »,		

Durée de Vie des centrales nucléaires – Dossier durée de vie 40/60 ans des câbles électriques

2. Introduction

2.1 Périmètre de la note

Cette étude est réalisée dans le cadre du projet « Durée de Vie des centrales nucléaires », dont un des objectifs est d'évaluer le potentiel de durée de vie des tranches nucléaires. Pour cela, la réalisation d'un dossier « durée de vie 40/60 ans » sur les câbles est demandée (voir également la réf [1])

Les câbles étudiés dans cette optique durée de vie de tranche sont les câbles installés dans et hors Bâtiment Réacteur, de niveau de qualification NC/K3, K2 et K1, et faisant l'objet des « contrats I E G » (Installations Electriques Générales) – ne sont pas étudiés les câbles faisant l'objet des « contrats I E D » (Installations Electriques Diverses éclairage, téléphonie, etc)

L'étude porte sur les paliers 900 MWe et 1300 MWe

2.2 Objectif de la note

L'objectif de la présente note est de recenser les risques de dégradations des câbles pouvant conduire à des coûts ou des indisponibilités majeures. Ces dégradations sont dues au vieillissement et au type de fonctionnement. Elle liste les événements qui y sont associés. La note synthétise les connaissances d'EDF sur les cinétiques de ces dégradations.

La note présente aussi les parades qui peuvent être mises en œuvre en préventif ou correctif.

La note donne une évaluation de la durée de vie probable des câbles et des coûts induits de remplacement.

2.3 Démarche adoptée

Après avoir présenté le périmètre de l'étude (type de câbles et environnement concernés), la fonction des câbles est rappelée brièvement, ainsi que la description des principaux composants d'un câble.

Les mécanismes de vieillissement sont ensuite détaillés.

La nature et les résultats des études de durée de vie effectuées jusqu'à présent par EDF sont présentés. Leurs limites sont l'objet d'une analyse permettant de mettre en exergue le contenu des études à mener pour conforter les conclusions. Les « événements » possibles et les conséquences sont identifiés.

Les approches internationales sont également abordées.

3. Périmètre de l'étude

Le DAPE « câbles électriques » pour le palier REP 900 MWe (réf [2]) ne concernait que les câbles K1 en ambiance « points chauds ».

Durée de Vie des centrales nucléaires – Dossier durée de vie 40/60 ans des câbles électriques

La présente étude concerne l'ensemble des câbles de la tranche (K1, K2 et K3/NC) ⁽¹⁾ et pour tous types d'ambiance

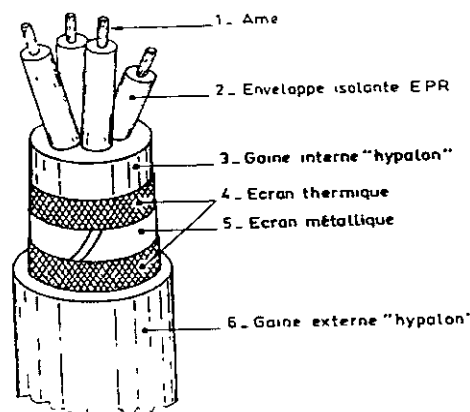
Le périmètre de l'étude est donc semblable à celui des deux fiches d'analyse de vieillissement (réf [3], [4], [24] et [25]) établies pour les palier REP 900 MWe et 1300 MWe

3.1 Description du matériel

Les câbles installés sur les tranches nucléaires du palier REP 900 et 1300 MWe sont constitués des éléments principaux ci-après (liste non exhaustive)

- Une âme en cuivre ou aluminium (aluminium pour les sections de 50 mm² et au-delà),
- Une enveloppe isolante extrudée à partir d'un mélange de matériaux organiques,
- Une gaine intermédiaire (éventuelle) extrudée à partir d'un mélange de matériaux organiques,
- Un écran de protection contre les perturbations électromagnétiques sous forme de tresse de cuivre pour les câbles Mesures,
- Une armure métallique de protection mécanique,
- Une gaine extérieure extrudée à partir d'un mélange de matériaux organiques

A titre d'illustration, la figure ci-après présente le schéma de principe d'un câble de contrôle-commande K1, répondant à la spécification EDF HN 33 S 25 (réf [5]), à isolation EPR (voir § 3 2.2) et gaine HYPALON (voir § 3 2 2) à quatre âmes en cuivre



⁽¹⁾ faisant l'objet des contrats I E G (Installations Electriques Générales) – ne sont pas étudiés les câbles faisant l'objet des contrats I E D (Installations Electriques Diverses éclairage, téléphonie, etc) Les câbles K3 et NC sont identiques et répondent aux mêmes exigences

EDF SEPTEN	Note d'étude ENSEMD050342	Indice A	Page 10/29
Durée de Vie des centrales nucléaires – Dossier durée de vie 40/60 ans des câbles électriques			
3.2 Câbles concernés 3.2.1 Familles de câbles Les quatre familles de câbles présentes sur les paliers REP 900 et 1300 MWe sont concernées par l'étude • Câble HTA unipolaire 6/10 (12) kV et tripolaire 6/6 (7,2) kV, • Câble BT-Puissance 0,6/1 (1,2) kV, • Câble Contrôle 0,6/1 (1,2) kV, • Câble Mesure 0,6/1 (1,2) kV ou 0,3/0,5 (0,6) kV Les deux voies de sûreté sont équipées par des câbles de même type (il n'y a pas de redondance technologique). 3.2.2 Type de câbles Les types de câbles (technologie matériaux) concernés sont les suivants • Câble à isolation et gaine extérieure sur base de Polychlorure de vinyle (PVC). Ces câbles répondent aux exigences du CST 74 C 057 (réf [6]) Leur niveau de qualification est K3/NC, pour certains câblers il est également K2 Ces câbles sont présents sur le palier REP 900 et 1300 MWe • Câble à isolation sur base de Polyéthylène réticulé (PRC) et gaine extérieure sur base de Polychlorure de vinyle (PVC) Ces câbles, spécifiques au palier REP 1300 MWe, répondent aux exigences de la spécification EDF HN 33 S 24 (réf [7]), ce sont des câbles HTA unipolaires Leur niveau de qualification est K3/NC • Câble à isolation sur base de caoutchouc éthylène-propylène (EPR) et gaine extérieure sur base de Polyéthylène chlorosulfoné (CSPE) – le mélange utilisé porte le nom commercial HYPALON Ces câbles répondent aux exigences de la spécification EDF HN 33 S 25 (réf [5]) Leur niveau de qualification est K1 Ces câbles sont présents sur le palier REP 900 et 1300 MWe 3.2.3 Quantitatif Les longueurs de câbles (contrat IEG) présentes sur une tranche REP 1300 MWe sont rappelées ci-après par famille/type Ces quantitatifs sont des ordres de grandeurs déterminés à partir du bordereau estimatif du contrat IEG X5501 • HTA EPR/HYPALON 0,1 km, • HTA PRC/PVC 50 km, • BT Puissance EPR/HYPALON 10 km, • BT Puissance PVC/PVC 300 km, • Contrôle et Mesure EPR/HYPALON 30 km • Contrôle et Mesure PVC/PVC 800 km			

EDF SEPTEN	Note d'étude ENSEMD050342	Indice A	Page 11/29
---------------	------------------------------	-------------	---------------

Durée de Vie des centrales nucléaires – Dossier durée de vie 40/60 ans des câbles électriques

Le total (IEG) est donc de l'ordre de 1200 km, dont un peu moins de 50 km de câbles K1

Nota Si l'on prend en compte la totalité des câbles présents sur une tranche REP 1300 MWe (soit les câbles objet des contrats IED et autres – éclairage, téléphonie, petit marché divers, etc), on obtient de l'ordre de 1500 km

4. Mécanisme de vieillissement et modes de défaillance

Dans un premier temps, les modes de défaillance fonctionnels potentiels des câbles électriques vont être identifiés et détaillés

Ensuite, le mécanisme conduisant au vieillissement (hors incident) des câbles électriques sera abordé

Il convient de rappeler que la fonctionnalité électrique est garantie par l'enveloppe isolante

4.1 Modes de défaillance

Pour un câble électrique, les modes de défaillance « théoriques » sont de 3 types

- Variation (augmentation) de la résistance linéique,
- Variation (baisse) de la résistance d'isolement,
- Mauvaise tenue diélectrique (claquage)

Ces modes de défaillance peuvent être liés à

- une situation « incidentelle » sans liaison avec l'état de vieillissement du câble
 - agression environnementale (température, humidité, contact avec un produit chimique),
 - agression mécanique (torsion, traction, écrasement, courbure prononcée, etc),
 - condition d'exploitation inadaptée (surcharge, surtension, etc),
- une évolution des propriétés des matériaux caractérisant un vieillissement prématuré du câble (éventuellement accéléré par certaines des situations citées ci-dessus).

4.1.1 Résistance linéique

L'augmentation de la résistance linéique peut provenir d'une diminution de la section réelle de l'âme (rupture de brins en cuivre ou aluminium constituant l'âme aux extrémités lors du dénudage des conducteurs) ou d'un mauvais contact au niveau des connexions. Ceci peut conduire, pour les câbles de puissance essentiellement, à un échauffement localisé. Un vieillissement prématuré peut alors apparaître très localement. Les examens effectués dans le cadre de la mise en œuvre des PBMP des différents actionneurs connectés et de la « doctrine de maintenance des câbles et connectiques associées » (réf [8]) n'ont pas mis en évidence ce type de situation pour les câbles K1 « EPR/HYPALON » du parc EDF. Par contre, en mars 1995 sur la tranche de Graveline 2, lors d'un contrôle systématique du moteur SEC, un des conducteurs du câble HTA PVC/PVC K3 d'alimentation a été trouvé fortement détérioré à son extrémité (dégradation de l'isolant) (réf [16]). L'âme du conducteur concerné a été trouvée avec 17 brins aluminium sur 20 coupés. Ce défaut amorcé lors de l'opération de premier montage (outil de dénudage de l'isolant du conducteur inadapté) s'est

EDF SEPTEN	Note d'étude ENSEMD050342	Indice A	Page 12/29
---------------	------------------------------	-------------	---------------

Durée de Vie des centrales nucléaires – Dossier durée de vie 40/60 ans des câbles électriques

ensuite propagé, jusqu'à la rupture des brins, lors des manipulations successives du câble lors des interventions de maintenance. Ce défaut a conduit à une augmentation de la résistance linéique (réduction de section) entraînant un échauffement localisé dégradant le PVC de l'isolant. L'évolution de ce défaut, s'il n'avait pas été découvert aurait conduit à un claquage du conducteur, l'isolant ne pouvant plus assurer sa fonction de tenue diélectrique.

4.1.2 Résistance d'isolement

La baisse d'isolement d'un câble peut être liée à la dégradation des caractéristiques des matériaux constituant l'enveloppe isolante sous l'effet des conditions d'environnement.

Une baisse d'isolement peut conduire pour les câbles mesure/contrôle à une perturbation de l'information transportée. Pour les câbles puissance, cela peut être le signe précurseur d'un claquage.

La surveillance de l'isolement des réseaux de distribution électrique (réseaux isolés 6,6 kV, réseaux 380 V du CP0, réseaux de tension continue) et les mesures effectuées dans le cadre de la mise en œuvre des PBMP des différents matériels connectés et de la « doctrine de maintenance des câbles et connectiques associées » (réf [8]) n'ont pas mis en évidence de baisse de résistance d'isolement pour les câbles K1 « EPR/HYPALON » du parc EDF.

Pour les câbles K3 unipolaires HTA, des baisses d'isolement pour l'instant inexplicables sont apparues sur plusieurs sites et de manière variable dans le temps. Une première série d'études a été menée au milieu des années 90 par R&D sans donner de résultats concluants. Dans le cadre du projet MORGANE 2, un lot est destiné à la poursuite de la recherche des causes potentielles de ces baisses d'isolement.

4.1.3 Tenue diélectrique

Le claquage, phénomène correspondant à un amorçage entre âme conductrice et masse ou entre conducteurs conduisant à la perte de la liaison électrique, est extrêmement rare sur les tranches EDF. Il sera en général le résultat d'une agression « externe ». Aucun cas n'a été recensé pour les câbles K1 « EPR/HYPALON » du parc EDF.

Sur les câbles K3, il n'y a pas de cas de claquage répertoriés dans les bases de données de l'exploitant.

4.2 Mécanisme de vieillissement

Les causes de perte éventuelle de fonctionnalité électrique d'un câble sont liées aux évolutions physico-chimiques des matériaux organiques constitutifs des isolants et gaines.

Les matériaux organiques (isolation des conducteurs, gaine externe, etc.) sont toujours constitués d'un mélange d'un (ou plusieurs) polymères et de différentes charges (celles-ci peuvent représenter plus de la moitié du mélange). Le mélange porte souvent le nom générique du polymère de base.

Le vieillissement d'un matériau est défini comme une altération lente et irréversible de ses propriétés (physiques, chimiques, etc.) résultant de son instabilité propre ou d'effets de l'environnement dans lequel il est utilisé. Cette altération peut concerner la structure chimique des macromolécules (polymère) et/ou des adjuvants (charges) – il s'agit alors de vieillissement chimique – ou son état physique (taux de cristallinité, contraintes internes, etc.) – il s'agit alors de vieillissement physique (réf [9]).

EDF SEPTEN	Note d'étude ENSEMD050342	Indice A	Page 13/29
---------------	------------------------------	-------------	---------------

Durée de Vie des centrales nucléaires – Dossier durée de vie 40/60 ans des câbles électriques

Concernant le polymère, le vieillissement peut entraîner trois types de modifications structurales (réf [10])

- des coupures de chaînes,
- des soudures de chaînes (réticulation),
- des modifications des groupements latéraux (par exemple greffage de groupements oxygénés, etc) – processus d'oxydation par voie radicalaire (réf [9])

Ces trois mécanismes coexistent Selon les conditions environnementales (température, irradiation, type de rayonnement, etc) et la nature du polymère ils seront plus ou moins prépondérants La présence d'une ou plusieurs des conditions environnementales en simultanée ou en « série » modifie également la compétition entre ces mécanismes

Dans la suite de cette note, le terme « dégradation » sera utilisé pour désigner tout mécanisme altérant les propriétés d'utilisation quelles qu'elles soient

Les processus de vieillissement et de dégradation d'un polymère, liés à l'exposition de ce dernier à différents facteurs environnementaux tels que les irradiations ou la température, sont donc très diversifiés et complexes (voir à titre d'exemple la réf [10] qui détaille les différents effets possibles de l'irradiation sur la structure de la chaîne macromoléculaire)

Les matériaux organiques industriels sont, comme dit plus haut, des mélanges constitués outre du/des polymères de différents additifs ayant chacun un rôle particulier (ignifugeant, plastifiant, anti-oxydant, charge dite neutre pour augmenter le volume, etc) Ces additifs ont, au travers de leur interaction avec le polymère et entre eux, un effet sur les processus de dégradation du matériau Pour un additif donné (adjuvant ou composé chimique) l'effet sera influencé par les autres constituants du mélange, ainsi que par les facteurs environnementaux. Pour un matériau industriel, à la complexité des processus de dégradation propre au polymère se rajoute celle liée à l'action des additifs Les types d'additif (correspondant à une action attendue : par exemple ignifugeant) sont nombreux et pour chacune d'elle, différents composés chimiques peuvent être utilisés par l'industriel, ces composés n'auront pas le même comportement face aux différentes contraintes environnementales Pour toutes contraintes appliquées (dont fait partie par exemple le temps d'exploitation d'une tranche) la dégradation est dite à « formulation dépendante » (formulation = mélange industriel dont tous les composés sont figés) La compréhension de l'ensemble des mécanismes s'avère donc difficile La complexité de la prédiction du comportement dans le temps d'un matériau organique industriel est renforcée par le fait qu'en général il n'y a pas une seule contrainte vue par le matériau mais plusieurs (thermique, irradiation, condition incidentelle, accidentelle, etc) Même en cas de bonne connaissance de la réponse à chacune des contraintes prises isolément (ce qui est déjà rare) on ne saura pas pour autant conclure pour un matériau organique la dégradation liée à l'application de n contraintes conjointes ou successives n'est pas égale à la somme des n dégradations liées à chaque contrainte appliquée seule

A titre d'illustration, on considérera le cas des « anti-oxydants » La référence [11], considère un des modes significatifs de dégradation des polymères le mécanisme radicalaire d'oxydation Deux grands types de stabilisation sont utilisés pour inhiber ou du moins ralentir la dégradation liée à l'oxydation. L'oxydation se traduit par la production de composés appelés hydroperoxydes dont la décomposition, liée à leur instabilité, dégrade les caractéristiques du matériau Le premier type de stabilisation empêche la constitution des hydroperoxydes, le deuxième type les décompose en espèce stable au fur et à mesure de leur apparition.

Bien que l'effet visé soit le même (inhiber ou ralentir l'oxydation pour augmenter la durée de vie), selon le type de stabilisant (anti-oxydant) choisi, le matériau organique concerné et les

EDF SEPTEN	Note d'étude ENSEMD050342	Indice A	Page 14/29
---------------	------------------------------	-------------	---------------

Durée de Vie des centrales nucléaires – Dossier durée de vie 40/60 ans des câbles électriques

caractéristiques environnementales rencontrées, le comportement dans le temps et le niveau de dégradation des matériaux seront très variables

Les différents mécanismes de dégradations cités jusqu'ici, à défaut d'être tous parfaitement modélisés et quantifiés, sont identifiés. Ces mécanismes concernent la chimie du matériau. On sait que ces réactions chimiques ont des conséquences sur les caractéristiques « macroscopiques » et physiques du matériau. Pour autant, à ce jour, le passage des unes aux autres par des modèles scientifiques validés n'est pas réalisé. Il en est de même pour le passage des caractéristiques physiques du matériau aux caractéristiques fonctionnelles du matériel dans le cas des câbles : passage de grandeurs « matériau » du type « allongement à la rupture » aux caractéristiques fonctionnelles comme la tenue diélectrique ou la résistance d'isolement.

Les études de durée de vie menées sur les câbles, par EDF ou en externe EDF, sont donc toutes basées sur une approche empirique ou semi-empirique permettant de décrire l'évolution d'une caractéristique physique du matériau prélevé sur le câble en fonction du temps. L'extension des conclusions ainsi obtenues aux paramètres fonctionnels du matériel se fait ensuite sur une base empirique.

5. Etude de durée de vie

EDF a mené des études de durée de vie sur les câbles électriques dans les années 1990-2000, en quatre grandes phases. Une première consacrée aux câbles PVC/PVC avec une méthodologie empirique, une deuxième consacrée à la mise au point d'un modèle semi-empirique appliqué aux câbles K1 des paliers REP 900 MWe et 1300 MWe, une troisième consacrée à l'application et l'adaptation de ce modèle au cas des câbles PVC/PVC et une quatrième concernant la mise en œuvre de ce modèle au cas des câbles K1 du palier N4. Nous n'aborderons ici que les trois premières phases qui concernent les paliers REP 900 et 1300 MWe.

5.1 Câbles PVC/PVC K3/K2 – Approche empirique

L'étude (réf [12]) a été menée à la fois sur matériaux et sur câbles. Elle s'appuie sur des essais de laboratoire et des expertises de câbles de centrales effectués entre 1987 et 1993. Les contraintes environnementales prises en compte sont la température et l'irradiation (de manières séparée et combinée).

Les mesures effectuées, aussi bien sur matériau que sur câble en essai de laboratoire ou suite à expertise, sont :

- Taux de plastifiant,
- Consommation de stabilisants thermiques,
- Allongement et contrainte à la rupture,
- Résistance d'isolement et rigidité diélectrique

Elles ont permis de déterminer des critères d'évolution sur des paramètres tels que le taux de plastifiant ou la consommation de stabilisants thermiques garantissant la fonctionnalité.

EDF SEPTEN	Note d'étude ENSEMD050342	Indice A	Page 15/29
---------------	------------------------------	-------------	---------------

Durée de Vie des centrales nucléaires – Dossier durée de vie 40/60 ans des câbles électriques

électrique L'ensemble de la démarche est d'ordre empirique et ne repose pas réellement sur un modèle prédictif Elle permet cependant de disposer de critères pour juger de la fonctionnalité d'un câble à un instant donné, mais également à l'issue d'un essai simulant un vieillissement (y compris sous irradiation) Ceci permet donc de disposer d'une évaluation de la durée de vie des câbles PVC/PVC du parc nucléaire d'EDF Celle-ci est estimée à 50 ans (voire plus), hors prise en compte de « points chauds » particuliers

Ces études ont débouché sur la mise au point d'un guide d'expertise des câbles PVC/PVC basé sur la mesure du taux de plastifiant (réf [13])

5.2 Modèle semi-empirique – Cas des câbles K1 (EPR/HYPALON)

Dans le cadre des réflexions sur la prolongation de la durée de vie des tranches à 40 ans et au-delà, EDF a mené des études qui ont apporté une meilleure connaissance de la cinétique de dégradation des caractéristiques des matériaux d'isolation à base EPR et des matériaux de gaine à base d'HYPALON constitutifs des câbles K1 des paliers REP 900 et 1300 MWe Un modèle de prédiction de durée de vie a été développé. Ce modèle permet de décrire l'évolution de l'allongement à la rupture des matériaux en fonction du temps, de la température et de l'irradiation Les paramètres de ce modèle semi-empirique ont été déterminés à partir de résultats expérimentaux La synthèse des études effectuées pour l'établissement et la validation de ce modèle fait l'objet de la référence [14].

Les grandes lignes de la démarche retenue et des résultats obtenus sont rappelés ci-après

5.2.1 Démarche retenue

L'approche méthodologique mise en œuvre se décompose en 3 étapes successives

- simuler des vieillissements accélérés pour plusieurs conditions de température - débit de dose
- identifier les mécanismes de vieillissement mis en jeu (diagramme de « prédominance »)
- développer des lois de comportement pour prédire la durée de vie en conditions d'exploitation

5.2.2 Vieillissement accéléré et mécanismes de vieillissement

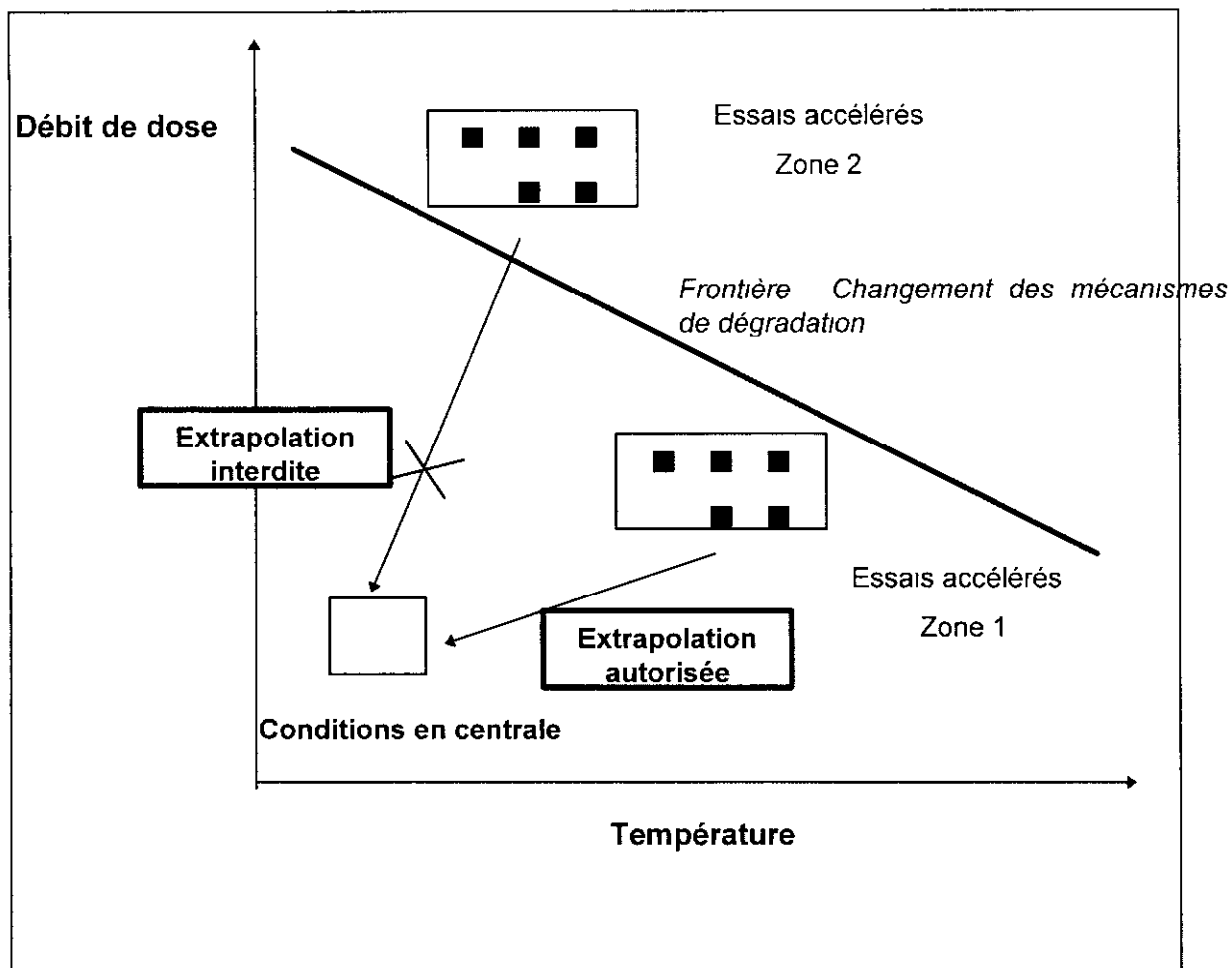
Le programme de vieillissement est bâti en sélectionnant plusieurs couples de température - débit de dose (jusqu'à 10 conditions), sur la base de données disponibles dans la littérature et d'essais préliminaires Les échantillons vieillis sont ensuite analysés en ayant recours à des outils de caractérisation de type .

- mécanique essai de traction qui conduit aux caractéristiques allongement et contrainte à la rupture,
- électrique résistance d'isolement, rigidité diélectrique,
- physico-chimique analyse par spectroscopie Infra Rouge à Transformée de Fourier, taux de gonflement, Analyse Mécanique Dynamique

L'analyse de l'évolution des grandeurs mesurées permet d'en déduire les mécanismes de vieillissement mis en jeu au niveau des matériaux polymères qui entrent dans la constitution

Durée de Vie des centrales nucléaires – Dossier durée de vie 40/60 ans des câbles électriques

du câble étudié. On construit de cette manière, pour chaque matériau, un *diagramme de prédominance* (Figure ci-après). Ce diagramme de prédominance permet d'identifier, dans un graphe température (en °C) - débit de dose (en Gy/h), les mécanismes prépondérants, pour une condition température - débit de dose sélectionnée.



Concept de représentativité des essais de simulation accélérés

5.2.3 Loi de comportement - Principe de construction

La construction d'une loi de comportement repose sur un principe de représentativité. Pour cela, il est nécessaire de sélectionner les données obtenues pour les conditions d'essais accélérés qui simulent le mécanisme de vieillissement mis en jeu en centrale. La loi de comportement exprime la dépendance d'une propriété sensible au vieillissement (évolution monotone) en fonction de la température, du débit de dose, et du temps, soit $P = f(T, t, DDD)$.

La propriété la plus usuelle est l'allongement à la rupture. Elle offre l'avantage d'être fonctionnelle, et l'on peut définir un critère de fin de vie (50 % d'allongement à la rupture absolu).

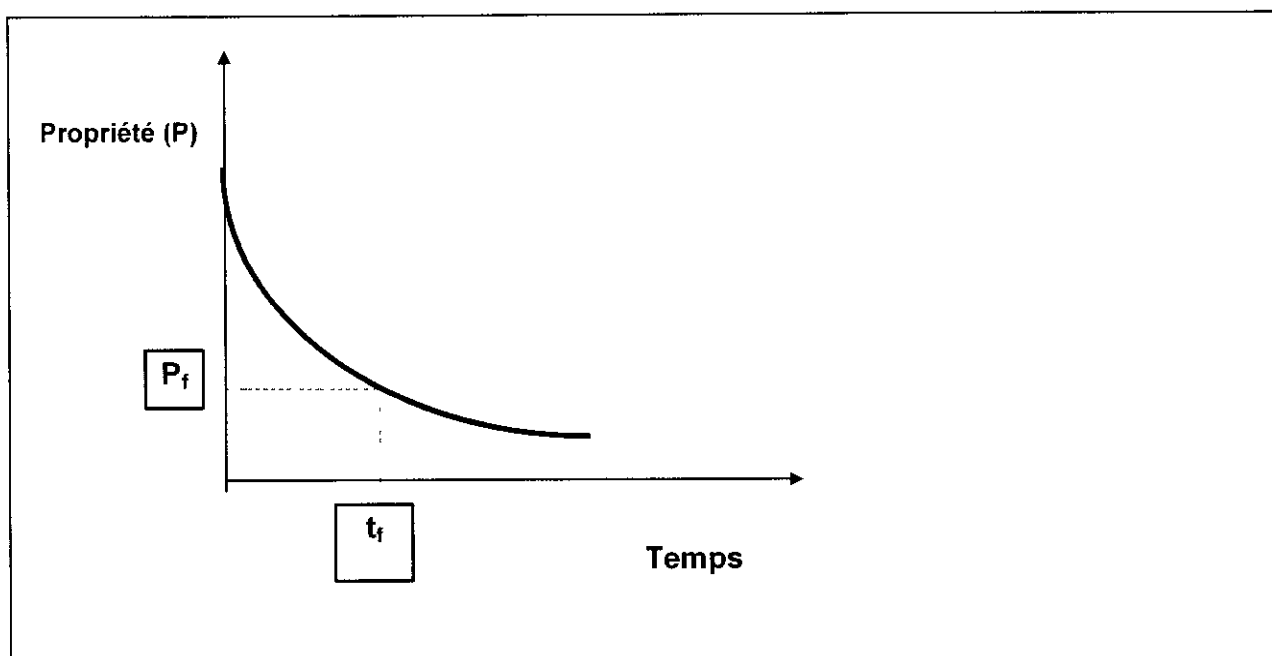
La résistance d'isolement n'est pas, en règle générale, directement corrélable de manière simple aux propriétés mécaniques des matériaux. Comment concilier cet aspect avec le choix de l'allongement à la rupture comme propriété sensible du vieillissement ?

Durée de Vie des centrales nucléaires – Dossier durée de vie 40/60 ans des câbles électriques

Comme l'ont montré les études durée de vie dans leur première phase et les essais de qualification, pour la majorité des matériaux de câbles étudiés, notamment l'EPR et l'HYPALON, l'allongement à la rupture et plus largement les propriétés mécaniques, sont des indicateurs plus précoces du vieillissement que ne l'est la résistance d'isolement

5.2.4 Loi de comportement - Prédiction de la durée de vie

L'établissement de la loi de comportement à partir des données expérimentales et des lois classiques de la physique (par exemple, la loi d'Arrhénius qui exprime la dépendance de la vitesse d'évolution de la propriété considérée avec la température), permet de simuler l'évolution temporelle de la propriété sensible pour un couple température - débit de dose sélectionné



Obtention de la durée de vie (t_f) à partir d'un critère de fin de vie (P_f)
sur une propriété sensible du vieillissement (P)

On peut simuler les conditions moyennes présentes dans l'enceinte du bâtiment réacteur, telles qu'elles sont proposées dans le RCC-E 40-50°C en température, sous 0,01 - 0,1 Gy/h en débit de dose. La dernière étape consiste à comparer la valeur de la propriété simulée après 50 ans à la valeur du critère de fin de vie sur cette même propriété.

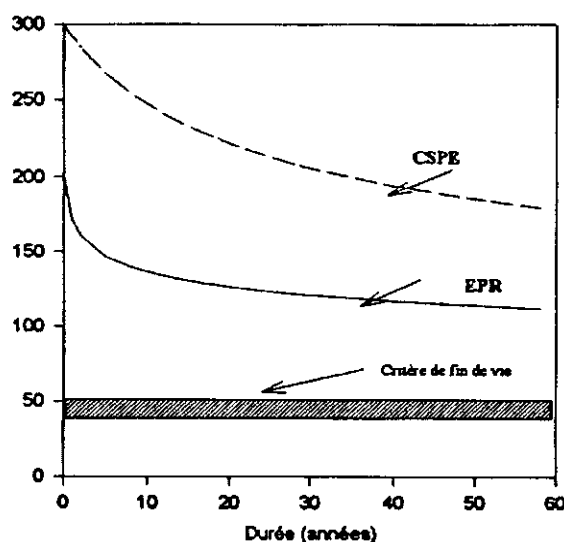
5.2.5 Résultats obtenus

L'interprétation de l'évolution de propriétés sensibles du vieillissement a permis d'identifier les mécanismes prépondérants du vieillissement des matériaux entrant dans la constitution des câbles « EPR/HYPALON ».

L'allongement à la rupture est la propriété sensible du vieillissement retenue pour la construction de la loi de comportement.

Durée de Vie des centrales nucléaires – Dossier durée de vie 40/60 ans des câbles électriques

L'extrapolation en régime standard de fonctionnement (conditions les plus fortes 50°C et 0,1 Gy/h) de la courbe simulée d'allongement à la rupture démontre clairement que le critère de fin de vie de 50% d'allongement à la rupture absolu n'est pas atteint à 50 ans. A titre d'illustration, la figure ci-après présente la courbe obtenue pour la gaine externe à base d'HYPALON et l'isolant à base d'EPR pour le câble K1 « EPR/HYPALON »



Courbe simulée sur la propriété d'allongement à la rupture pour les matériaux EPR et HYPALON d'un câble EPR / HYPALON pour les conditions : 40°C - 0,1 Gy/h

5.3 Modèle semi-empirique – Cas des câbles PVC/PVC K3/K2

L'application du modèle décrit dans le paragraphe ci-dessus a été effectuée pour le cas des câbles PVC/PVC. La modélisation a été envisagée sur les données relatives à la propriété d'allongement à la rupture ainsi que sur des mesures du taux d'acide chlorhydrique dégagé (dosage des ions chlorures) au cours du vieillissement. La synthèse des études effectuées pour l'adaptation et l'application de ce modèle au cas des câbles PVC/PVC fait l'objet de la référence [15].

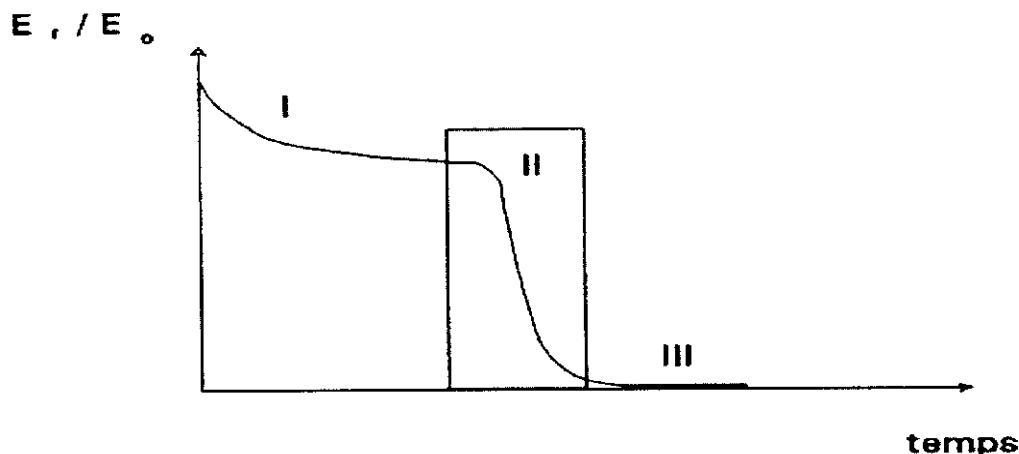
Les différentes campagnes d'essais sur matériaux et sur câbles utilisées pour ces études sont identiques à celles de l'étude faisant l'objet de la référence [12].

5.3.1 Propriété d'allongement à la rupture

A température ambiante, le polymère PVC est un composé rigide et cassant. Pour permettre son utilisation, en particulier en câblerie, on lui adjoint des plastifiants permettant de rendre le matériau souple. Au cours du vieillissement, sous l'effet des contraintes extérieures (température, irradiation, etc), on observe l'exsudation des plastifiants – d'autres mécanismes se superposent à celui-ci (réticulation à hautes températures, déshydrochloruration, etc). Ces mécanismes conduisent à une chute de la propriété d'allongement à la rupture. Cette propriété évolue en fonction du temps suivant 3 phases.

Durée de Vie des centrales nucléaires – Dossier durée de vie 40/60 ans des câbles électriques

que l'on peut schématiquement représenter comme suit (E_0 et E_r représentent l'allongement à la rupture à l'état initial et à l'instant t)



Dans le domaine I, le matériau a un comportement mécanique de type caoutchoutique, puis le taux de plastifiant diminuant avec le temps, on observe une chute brutale (domaine II). Le matériau devient ensuite (domaine III) rigide et cassant – taux de plastifiant résiduel très faible.

L'étude effectuée à l'aide du modèle sur deux matériaux PVC (avec formulation différente) et celle faite sur câble montre que pour des contraintes du type 45°C et 0,1Gy/h (proche des conditions d'exploitation pour les câbles PVC/PVC K2), il n'y a pas de chute (type domaine II) des propriétés mécaniques avant 60 ans pour un câble dont la formulation du PVC a un taux de plastifiant à l'état neuf de l'ordre de 25% (cas des câbles présents sur le parc EDF). Au-delà, les études existantes ne permettent pas de se prononcer.

5.3.2 Dosage des ions chlorures

Les stabilisants thermiques introduits dans le PVC ont pour rôle de fixer l'acide chlorhydrique formé à partir des processus de dégradation du polymère (vieillessement thermique et radiochimique). Ils évitent ainsi que le chlorure d'hydrogène dégagé ne catalyse la décomposition du PVC. L'acide chlorhydrique se retrouve ainsi piégé sous la forme d'un complexe stable et inerte. La méthode dite de « coulométrie » permet de mesurer directement la quantité d'acide chlorhydrique libérée par le matériau PVC à un instant donné. Cette mesure peut donc servir de « traceur » de l'évolution du matériau.

Deux études ont été effectuées : l'une avec la contrainte thermique, l'autre avec la contrainte irradiative.

Contrainte thermique :

L'étude (essais et simulation avec le modèle) montre que le mécanisme conduisant à la perte d'acide chlorhydrique à basses températures (températures d'exploitation) est négligeable. Dans ces conditions, le dosage des ions chlorures par la méthode coulométrique n'est pas un critère sensible du vieillissement (les temps de vie extrapolés vont en effet de une à plusieurs centaines d'années). Cela signifie que la dégradation thermique au cours du temps du matériau PVC, à basses températures, est imputable à d'autres mécanismes (migration/évaporation de plastifiants).

Durée de Vie des centrales nucléaires – Dossier durée de vie 40/60 ans des câbles électriquesContrainte irradiative

Dans ce cas, le phénomène de déshydrochloruration est significatif. Les essais menés sous différentes contraintes d'irradiation ont permis de déterminer les paramètres nécessaires à l'exploitation du modèle semi-empirique. Les simulations effectuées à 25°C et 0,1 Gy/h montrent qu'après 50 ans de fonctionnement la valeur estimée de perte d'ions chlorure est de 27 mmol kg⁻¹ de PVC (pour un critère de fin de vie de 50 mmol kg⁻¹ de PVC). La valeur de perte d'ion chlorure obtenue est donc de l'ordre de la moitié de celle représentant la fin de vie du matériau.

5.3.3 Résultats obtenus

Ces études effectuées sur les câbles PVC/PVC avec le modèle semi-empirique mis en œuvre pour deux caractéristiques du matériau différentes montrent que la durée de vie des câbles PVC/PVC est de l'ordre de 50 ans au moins.

Elles confirment les résultats de l'étude empirique présentée au § 5.1

5.4 Points potentiellement fragiles des dossiers (à méthode non remise en cause)

Les points soulevés ici le sont sans prendre en compte d'éventuelles limitations liées à la méthode semi-empirique elle-même (cet aspect fera l'objet du §6).

Les études de durée de vie effectuées jusqu'à présent par EDF l'ont été avec un échantillonnage basé sur des tronçons de câbles mis en forme comme suit :

- Longueur rectiligne,
- Câble complet avec la gaine externe présente sur toute la longueur.

Cette pratique soulève deux questions par rapport à la réalité de l'installation sur les sites :

- Les contraintes mécaniques liées aux courbures des câbles, qui peuvent représenter une contrainte supplémentaire vis-à-vis du vieillissement,
- A l'extrémité des liaisons, les conducteurs électriques (âme + isolant) sont installés dans les boîtiers de raccordement (côté aboutissant, boîtiers intermédiaires, coffrets des traversées électriques, etc.) sans aucun revêtement de protection (gaine externe, bourrage, etc.). Ceci conduit à un vieillissement avec une présence d'oxygène plus importante que ce qui est représenté en essais (vieillessement quasiment anaérobie).

Ces éléments ont d'ailleurs été relevés par l'IRSN dans le cadre de la préparation du GPR « vieillissement » de mai 2006 (réf [17]).

Pour les nouvelles études, les plans d'expérience intègrent dès le début ces questions.

Pour les études déjà effectuées et sur lesquelles reposent les démonstrations actuelles pour le parc en exploitation, il semble difficile de relancer des expérimentations spécifiques, compte tenu des coûts, délais et impossibilité de disposer des câbles maintenant frappés d'obsolescence. La prise en compte de ces points pourra éventuellement être examinée dans le cadre des analyses sur échantillons prélevés sur site.

Doctrine de maintenance des câbles et PBMP des actionneurs

Dans les dossiers présentés à l'A S N (par exemple type DAPE et FAV), nous mettons en avant une pratique EDF reposant sur une démarche triple : la qualification, les études

EDF SEPTEN	Note d'étude ENSEMD050342	Indice A	Page 21/29
---------------	------------------------------	-------------	---------------

Durée de Vie des centrales nucléaires – Dossier durée de vie 40/60 ans des câbles électriques

spécifiques « durée de vie » et le suivi sur site au travers des prescriptions de la doctrine de maintenance des câbles et des PBMP des actionneurs. Il faut cependant avoir présent à l'esprit que les contrôles possibles et prévus dans ce cadre (contrôle visuel, électrique, etc.) s'ils permettent une détection d'un problème avéré sont par nature peu porteurs d'éléments techniques d'anticipation pour un problème à venir. Dans le cadre de Projet de R&D comme MORGANE, des actions sont identifiées pour la mise au point de méthodes de contrôle non destructif prédictives (dans le cadre de collaboration internationale HALDEN, EPRI). Les possibilités de déboucher à court et même moyen terme (5 ans) sont extrêmement faibles.

6. Démonstration complémentaire

L'avantage du modèle semi-empirique décrit au §5.2 est de s'intéresser directement à une caractéristique « macroscopique » du matériau. Il dispense ainsi d'une modélisation des processus chimiques proprement dit et du passage de ceux-ci à une grandeur physique représentant la fonctionnalité du matériau. Ce modèle est « calé » sur de très nombreux points expérimentaux concernant les matériaux formulés industriellement (isolant et gaine des câbles). Il permet ainsi de disposer d'un niveau de fiabilité des résultats obtenus important, tant qu'il n'y a pas d'effet de rupture (effet « falaise ») dans le processus de dégradation des matériaux. En effet, les points expérimentaux dont on peut raisonnablement disposer par des essais de laboratoire sont forcément attachés à des durées d'essais courtes au regard de la durée de vie d'une tranche.

D'autre part, cette méthodologie revient à considérer implicitement que l'évolution des propriétés mécaniques du matériau représente correctement dans tous les cas les modifications de la structure macromoléculaire. La relation structure/propriétés n'est pas forcément constante. Des évolutions au niveau chimique peuvent se produire sans avoir de conséquences immédiates au niveau des caractéristiques physiques du matériau : par exemple, lors du vieillissement aux conditions d'ambiance standard peuvent s'accumuler des composés hydroperoxydes (résultats de la réaction d'oxydation) qui ne modifient pas le comportement du matériau en situation normale, alors qu'une évolution forte de la température (transitoire accidentel) conduira à leur décomposition avec effet dégradant sur les caractéristiques physiques du matériau. Le modèle semi-empirique ne peut pas prendre en compte des effets de ce type (le couplage structure/propriété n'est pas simulé et est donc considéré constant). Cette limitation du modèle peut s'avérer potentiellement, pour les câbles K1, une source d'insuffisance pour des études de prédiction.

Pour remédier à ces insuffisances, les études des projets MORGANE 1 et 2 doivent déboucher sur la mise au point d'un modèle de cinétique d'oxydation permettant de simuler les modifications de la structure chimique du matériau. Il devrait donc permettre d'identifier les phénomènes et d'apprécier s'ils sont effectivement déterminants pour les prédictions de durée de vie, y compris pour le matériel K1. Il permettra donc d'éclairer les résultats des études semi-empiriques par des éléments de compréhension plus fine et scientifique du phénomène d'oxydation. Par contre, il ne permettra pas de remonter aux grandeurs physiques ou macroscopiques du matériau. Dans l'attente de nouveaux développements de R&D allant dans ce sens, on pourra néanmoins mettre en « perspective » les résultats des études semi-empiriques et les études du phénomène d'oxydation pour disposer d'éléments de réponse fiabilisés sur la durée de vie des câbles.

Durée de Vie des centrales nucléaires – Dossier durée de vie 40/60 ans des câbles électriques

7. Perspectives

L'ensemble des études menées par EDF depuis le début des années 1990 permet, y compris en intégrant les limitations et incertitudes évoquées dans le paragraphe précédent, de considérer qu'il ne sera probablement (études à conforter) pas nécessaire d'envisager un recâblage complet des tranches pour aller à une durée de vie de 50 ans, voire plus. A titre d'information, les conséquences d'un recâblage complet sont abordées de manière rapide dans le paragraphe suivant.

Le besoin de recâblage partiel ne peut pas à ce jour être écarté. Celui-ci peut être lié à plusieurs particularités :

- Câbles dans des conditions d'ambiance très contraignantes du point de vue température et/ou irradiation (« points chauds »),
- Contraintes mécaniques (courbure) sévères s'avérant fortement influentes,
- Conception et/ou formulation des matériaux se révélant inadaptées pour certaines catégories de câbles (par exemple câbles HTA présentant une baisse d'isolement lente depuis le début du parc) ou certaines fabrications particulières d'un câblage (cas des câbles PVC/PVC du câblage CROSNE situation identifiée et suivie),

Le cas le plus probable concerne les conditions d'ambiance plus contraignantes que la moyenne d'ambiance dite « points chauds ». Pour tenter d'en déterminer l'importance (en contrainte et en quantité), une première campagne de mesures sur site a été effectuée dans le B R de la centrale de Saint-Laurent B2 de janvier 2004 à février 2005 (lot n°2 du projet MORGANE 1). Des enregistrements de température et dose ont été mis en place en une douzaine de points. L'analyse des résultats (réf [23]) ne fait pas apparaître de contraintes importantes en terme de température et irradiation. Cette première campagne n'est à elle seule pas suffisante pour statuer : une seule tranche et un nombre de points de mesure limité. C'est pour cela que les résultats obtenus dans le cadre de l'affaire « A11B2 » - Surveillance de l'environnement – seront également utilisés pour compléter l'analyse.

8. Eléments de coût et de délai

8.1 Recâblage complet d'une tranche

8.1.1 Délai

Les données utilisées pour faire une estimation d'un recâblage complet d'une tranche sont issues du planning prévisionnel de l'EPR (Dossier de crédibilité des 3 « soumissionnaires » potentiels).

Le délai global pour une installation neuve est de l'ordre de 50 mois (phase étude, approvisionnement et montage). Le montage lui-même représente de l'ordre de 36 à 40 mois (une partie des études s'effectue en parallèle).

Il faut retenir que ce délai est valable pour une installation neuve et concerne donc uniquement l'aspect installation. Dans le cas d'un recâblage il faut ajouter une phase de « démontage » préalable. La durée d'une telle phase est difficile à évaluer faute de retour d'expérience. En première approximation, on peut considérer que ce type de travaux est au moins aussi long et compliqué qu'une phase d'installation. Par contre son impact sur le délai global peut être fortement limité dans la mesure où il n'est pas nécessaire d'attendre le

Durée de Vie des centrales nucléaires – Dossier durée de vie 40/60 ans des câbles électriques

démontage complet dans tous les locaux pour commencer une nouvelle installation. Les deux phases peuvent donc être superposées pour une partie significative.

Les éléments dont nous disposons sur des réalisations de recâblage (rénovation de CC essentiellement) sont difficilement utilisables. EDF/SEPTEN a examiné l'exemple de la centrale de Beznau : la configuration des locaux est très différente de celle des tranches du parc EDF, ce qui rend la comparaison peu pertinente (réf [18]). L'espace disponible dans les locaux permettant en particulier un pré-câblage entraînant un gain de temps important (1/3 du travail effectué en « temps masqué »).

En tout état de cause, même s'il est difficile d'estimer le délai supplémentaire lié aux opérations de « démontage », celles-ci prendront plusieurs mois s'ajoutant à un délai déjà très long qui rend une opération de ce type extrêmement coûteuse.

8.1.2 Coût

Les données prises en compte sont celles du contrat IEG de la centrale de CIVAUX (cas le plus récent pour EDF). Les chiffres sont ceux de 1992 convertis simplement en euros. Le montant global (hors étude) est de l'ordre de $25 \cdot 10^6$ euros (environ 2/3 liés aux câbles et 1/3 aux chemins de câbles). Ce montant ne prend pas en compte le coût du démontage préalable des installations en place et des études correspondantes. Il s'agit donc d'un coût très minorant et approximatif. Il n'a pas été jugé utile d'aller plus loin dans les estimations de ces coûts dans la mesure où ce ne sont pas ceux-ci qui sont « dimensionnants » mais la durée d'arrêt de la tranche (voir § ci-dessus).

8.2 Recâblage partiel d'une tranche

Les éléments ci-après ont été élaborés à partir du marché CQML 5000 (« contrat cadre » entre CIPN et le groupement d'entreprises IEG mis en place pour la réalisation des modifications sur le Parc).

La structure d'un contrat IEG est relativement complexe. Ce type de contrat ne correspond pas à un simple achat de matériel. Il intègre un poste étude (étude liée à l'installation), un poste achat de matériel (câbles, chemins de câbles, divers), un poste montage, un poste connexion des liaisons et un poste vérification/qualification des liaisons avant mise en service.

Le poids respectif des différents postes va être différent suivant le type de modification.

- Le poste étude peut être d'un poids très différent suivant qu'il s'agit d'une modification concernant une portion de liaison ou une modification concernant plusieurs liaisons complètes,
- le poste achat peut être très variable suivant que la modification n'intégrera que du tirage de câble ou s'il faut installer des chemins de câbles,
- le poids entre le poste connexion et le poste achat de câble n'aura pas du tout le même rapport si la modification concerne de nombreuses liaisons de courtes longueurs ou si elle concerne peu de liaisons mais très longues.

Il ne s'agit ci-dessus que de quelques exemples « simplifiés » pour montrer toute la difficulté à estimer les coûts d'un recâblage partiel lorsqu'on ne connaît pas précisément la nature exacte de celui-ci. Il est impossible d'avoir des coûts « génériques » valables pour toutes les modifications. Le contrat cadre CQML 5000 est décomposé en coût unitaire pour de très nombreux postes pour cette raison.

Durée de Vie des centrales nucléaires – Dossier durée de vie 40/60 ans des câbles électriques

Pour déterminer des coûts il faut donc se fixer des hypothèses préalables sur la nature de la modification. Le coût obtenu ne sera donc que d'ordre « estimatif » et très approximatif.

Les hypothèses à fixer concernent le périmètre de la modification et la façon de la faire.

Pour le périmètre, 3 situations, toutes dans le B R, ont été étudiées afin de disposer d'ordres de grandeurs comparatifs.

- cas n°1 : tous les câbles présents dans le B R sont remplacés,
- cas n°2 : ne sont remplacés que les câbles K1,
- cas n°3 : une liaison électrique est concernée, avec 2 situations : changement de tous les câbles de la liaison depuis la traversée électrique d'enceinte jusqu'à l'actionneur et changement sur une partie seulement de cette liaison. Le cas traité est celui de l'alimentation des chaufferettes du pressuriseur (cas n°3 = remplacement sur une longueur partielle, cas n°3bis = remplacement sur toute la longueur).

Pour établir le coût de la modification les hypothèses suivantes sont faites :

- tranche de référence étudiée : Cattenom 1,
- l'incidence de la perte financière liée à la perte de production de la tranche n'est pas incluse,
- les repères et itinéraires de câbles sont conservés,
- les études « IEG » se limitent au « standard » d'une modification ordinaire (nomenclature de câbles par système, schémas de synthèse, spécification de montage, analyses de risques, procédures d'essais, etc.),
- les coûts et délais de reconnexion sont pris en compte (les câbles K1 sont raccordés avec des jonctions K1 Raychem pour le contrôle et la mesure ou Air-LB pour la puissance),
- 100% des capots mesure sont ouverts, 75% sont reposés, 25% sont des capots neufs,
- l'intégralité des protections feu type MECATISS sont reposées,
- un maximum de 50 personnes travaillent simultanément dans le B R pour cette modification et une organisation en 2 équipes/jour,
- non prise en compte d'une éventuelle incompatibilité avec d'autres modifications non « IEG »,
- en raison du manque de place dans les chemins de câble, ainsi que pour éviter de doubler la masse calorifique des câbles dans le B R, les vieux câbles sont déposés. Seuls les câbles situés en zone rouge ou orange resteront en place (matériel activé),
- les travaux sont réalisés en deux ensembles de voie (globalement A puis B),
- les travaux s'effectuent cœur déchargé avec fonctionnement de la voie B pendant la réalisation des travaux sur la voie A et vice versa,
- les coûts et temps de requalification des lignes ne sont pas intégrés,
- les opérations de mise en place d'échafaudages, de protection, de montage de sas ne sont pas prises en compte,
- les incidences financières liées à l'évacuation de la laine de céramique, des câbles déposés, des capots, déchets trémie, etc. vers des filières spécialisées ne sont pas prises en compte.

Durée de Vie des centrales nucléaires – Dossier durée de vie 40/60 ans des câbles électriques

L'ensemble de l'étude de coût, avec le détail des hypothèses et des calculs, fait l'objet de la référence [19]

Le tableau ci-après récapitule les résultats de l'étude pour chaque cas avec le coût global (étude+réalisation de la modification) et le délai (en séparant le délai « étude » qui incorpore le délai d'approvisionnement et le délai réalisation) Ces coûts et délais s'entendent pour 1 tranche

Cas	Coût (arrondi)	Délai « étude »	Délai « réalisation »
N°1	10 Millions d'euros	18 mois	25 à 27 semaines par voie
N°2	4 Millions d'euros	14 mois	18 semaines pour les deux voies
N°3	150 000 euros	11 mois	4 semaines
N°3Bis	500 000 euros	11 mois	8 semaines

9. Eléments internationaux

La question de la maîtrise de la durée de vie des câbles de centrales nucléaires est une préoccupation partagée au niveau international par les exploitants, les organismes de recherche et les autorités de sûreté

Les approches des autres exploitants sont très variables d'un pays à l'autre. Les comparaisons sont donc rendues difficiles. On peut néanmoins retenir qu'il existe une approche rencontrée régulièrement reposant sur le principe résumé ci-après.

Cette approche, reposant principalement sur les principes présents dans le standard IEEE 323, consiste à effectuer une qualification pour une durée de vie précise. Les principes généraux de la qualification (succession des différentes phases : vieillissement, irradiation, accident, post-accident) sont comparables à ceux retenus par EDF, même si les contraintes appliquées peuvent être très différentes. La « durée de vie qualifiée » est affichée à partir de l'application de la loi d'Arrhenius vis-à-vis de la seule contrainte thermique. Des vieillissements thermiques à température élevée sont effectués, les résultats sont ensuite extrapolés pour la température ambiante en déterminant le temps correspondant. Ce temps est considéré comme la « durée de vie qualifiée ». Plusieurs centrales US ont ainsi renouvelé leur licence d'exploitation jusqu'à 60 ans.

Cette approche ne s'accompagne pas d'étude spécifique « durée de vie » menée à l'aide d'un modèle prédictif.

Le suivi et la maintenance sur site peuvent être plus ou moins développés. Ils reposent en général sur des actions de surveillance et de contrôle des caractéristiques électriques et de l'état des matériaux. Dans quelques cas plus rares, l'exploitant peut mettre en place une politique de prélèvements à échéances données, les câbles « témoins » sont ensuite expertisés ou peuvent subir des essais de vieillissement accélérés puis thermodynamiques.

Comme on le constate, la philosophie générale des approches est très différente et est à apprécier dans sa globalité. En effet, comparer tel ou tel élément partiel pour en tirer des conclusions reconductibles n'a pas forcément de validité technique puisque chacun d'eux est la conséquence d'une démarche globale ayant sa propre logique.

Durée de Vie des centrales nucléaires – Dossier durée de vie 40/60 ans des câbles électriques

Compte tenu de cela, il apparaît donc difficile de tirer des enseignements directement utilisables dans la pratique EDF (et inversement)

On constatera cependant qu'au-delà de la variété des approches, les travaux d'organismes internationaux ou étrangers (EPRI [20], AIEA [21], NMAC [22]) convergent tous vers le même type de conclusion : le retour d'expérience sur le vieillissement des câbles installés est bon (ceci par nature ne peut prendre bien entendu en compte que les situations de fonctionnement non accidentelles). Les méthodes d'analyses peuvent être améliorées, ainsi que l'aide à l'exploitant pour le diagnostic, notamment pour les câbles en ambiance les plus contraignantes. Dans cette optique, EDF participe aux travaux internationaux sur le sujet (EPRI, HALDEN, IEEE, etc.). Dans ce cadre, EDF porte une attention particulière aux travaux qui peuvent être menés sur les méthodes de contrôle non destructif (activité menée au sein du Projet de R&D MORGANE).

Cette conclusion globale que l'on peut « afficher » officiellement présente néanmoins quelques points discutables :

- Comme indiqué au § 6, les approches type « Arrhenius » ont une représentativité limitée voire contestable dans certains cas,
- La prise en compte du facteur « irradiation » est très sommaire. Il est considéré que la dose vue en exploitation est inférieure à la dose vue en essais et qu'il n'y a donc pas de problème. Les répercussions liées au « temps d'exposition » (débit de dose) et au mécanisme spécifique de dégradation conséquence du rayonnement ne sont pas intégrées,
- La politique, parfois mise en œuvre, de prélèvement suivi d'essais de vieillissement accélérés n'apporte pas de réelle réponse, dans la mesure où les vieillissements accélérés et les conclusions qui en sont tirées reposent exactement sur la même démarche que celle des démonstrations initiales (par exemple méthode Arrhenius) et souffre donc des mêmes limites.

10. Synthèse Evénements/Options/Conséquences

A partir de l'ensemble des éléments abordés dans les paragraphes précédents, est présentée ici une synthèse des événements à incidence négative pour EDF vis-à-vis de la problématique « durée de vie des tranches ». En regard sont identifiées les options et conséquences possibles. Une probabilité est également indiquée pour l'événement, mais à titre très qualitatif. Lorsqu'un « point dur » potentiel existe par rapport à l'option proposée, il est signalé avec son impact.

10.1 Points chauds

Evénement

L'existence de « points chauds » au sens contrainte environnementale (essentiellement température et/ou irradiation) ayant un effet accélérateur du vieillissement est avérée en un nombre de locaux significatifs sur chaque tranche du parc.

EDF SEPTEN	Note d'étude ENSEMD050342	Indice A	Page 27/29
Durée de Vie des centrales nucléaires – Dossier durée de vie 40/60 ans des câbles électriques			
<u>Option</u> Remplacement localisé des câbles en privilégiant chaque fois que possible un remplacement sur la seule portion de câble concernée <u>Conséquence</u> Elle se limite à un coût financier du type « modification IEG », il n'y a pas en particulier d'impact sur la durée des arrêts. Le placement des modifications peut se faire au mieux en fonction du type d'arrêt et en lissant dans le temps d'une tranche à l'autre dans la mesure où le processus de dégradation accéléré ne va pas intervenir au même instant sur l'ensemble du parc (tranches d'âge différents et environnement pas complètement identique d'une tranche à l'autre) <u>Probabilité</u> Elevée <u>Point dur</u> Une difficulté peut perturber la mise en œuvre du remplacement des câbles. L'apparition d'une obsolescence sur les câbles qualifiés (notamment K1) entraînant des délais et des coûts supplémentaires liés à la qualification de nouveaux câbles. Compte tenu des échelles de temps d'apparition de l'événement traité ici, cette difficulté est très probable, voire quasiment sûre. Les groupes industriels de la chimie procèdent à des rationalisations et restructurations de plus en plus fréquentes et ne donnent aucune garantie sur la pérennité de leur produit. Le domaine du câble représentant une part très faible de leur marché, les câbliers ne peuvent que « subir » la situation. La seule parade possible consiste à avancer suffisamment dans la compréhension des mécanismes de dégradation des matériaux de câbles pour faire évoluer les pratiques de qualification afin de les rendre plus rapides et moins coûteuses.			
10.2 Contrainte locale de pose			
<u>Evénement</u> Les contraintes mécaniques locales liées au courbure des câbles installés entraînent un vieillissement (dégradation des caractéristiques des matériaux) supplémentaire <u>Option</u> Remplacement très localisé des câbles sur de courtes longueurs <u>Conséquence</u> Elle se limite à un coût financier du type « modification IEG », il n'y a pas en particulier d'impact sur la durée des arrêts <u>Probabilité</u> Moyennement faible <u>Point dur</u> Idem §10 1			

EDF SEPTEN	Note d'étude ENSEMD050342	Indice A	Page 28/29
Durée de Vie des centrales nucléaires – Dossier durée de vie 40/60 ans des câbles électriques			
10.3 Formulation/conception du câble <u>Evénement</u> Une(des) famille(s) de câbles d'un câblage présente un problème de formulation conduisant à un phénomène générique (pour cette famille) de vieillissement/dégradation accéléré <u>Option</u> Remplacement de tous les câbles concernés <u>Conséquence</u> Un premier travail important de recensement et d'identification de toutes les liaisons concernées sur le parc Un coût financier du type « modification IEG », mais englobant ici des quantitatifs plus importants Un impact sur la durée des arrêts de tranche peut se faire jour selon l'importance du kilométrage de câble à changer <u>Probabilité</u> Très faible 10.4 Résultats des études de recherche et développement <u>Evénement</u> Les résultats des études de R&D invalident les conclusions des dossiers actuels <u>Option</u> • Option A Remplacement de tous les câbles K1 et K3 avec ambiance Capacité d'EDF a démontrer que l'on peut fonctionner avec les autres câbles dans un état dégradé • Option B Remplacement de tous les câbles suite à l'échec de l'option A <u>Conséquence</u> • Option A coûts et délais indiqués au § 8 2 • Option B voir § 8 1 <u>Probabilité</u> Très faible 10.5 Arrêt des études de recherche et développement <u>Evénement</u> EDF décide de l'arrêt des études (type Projet MORGANE) <u>Option</u> Poursuite des études de type empirique et intégration du REX <u>Conséquence</u> Aucune visibilité pour EDF et aucune capacité d'anticipation Risque très important d'apparition de problème, s'il y a problème avéré, dans des temps courts (phénomène d'effet			

EDF SEPTEN	Note d'étude ENSEMD050342	Indice A	Page 29/29
---------------	------------------------------	-------------	---------------

Durée de Vie des centrales nucléaires – Dossier durée de vie 40/60 ans des câbles électriques

faillaise non anticipé) L'impact sur la disponibilité du parc peut être très forte Il s'agit d'un scénario de « rupture »

Probabilité

Impossible à estimer, dépend uniquement de la politique interne EDF

10.6 Position de l'Autorité de Sureté

Evénement

L'ASN durcit sa position et rejette les démonstrations d'EDF, avec une probable demande de mise en place de qualification progressive par prélèvement régulier sur site

Option

Poursuite et approfondissement des études de compréhension des phénomènes de vieillissement des matériaux organiques et de ce qui « fait le résultat » pour un câble, afin de consolider les démonstrations Prévoir en anticipation un dialogue renforcé en amont avec l'IRSN (actuellement difficile compte tenu de l'attitude de l'IRSN instruisant systématiquement « à charge » sans réel échange technique) Proposer en parade une politique de surveillance préventive sur site plus systématique

Conséquence

Coût de recherche et développement et d'ingénierie en augmentation Coût supplémentaire en surveillance pour l'exploitant Si la qualification progressive par prélèvement ne peut pas être évitée danger important lié à l'absence de maîtrise pour EDF d'une telle démarche (c'est l'ASN qui « pilote »)

Probabilité

Moyenne (une demande d'analyse sur prélèvement déjà existante pour un sujet suite au GP qualification de 2003)

11. Conclusion

L'analyse présentée dans cette note fait ressortir le besoin d'études, appuyées sur des avancées de R&D, pour conforter définitivement les conclusions du « DAPE câbles électriques »

Les conclusions actuelles, à conforter, ne font pas apparaître un besoin de recâblage complet des tranches pour aller à une durée de vie de 50 ans et plus

Une estimation de l'impact d'un recâblage partiel est faite Elle montre, en fonction des hypothèses retenues, le coût des éventuelles opérations qui pourraient être nécessaires

Une synthèse Evénements/Options/Conséquences identifie les principaux risques et parades possibles avec leurs limites, ainsi qu'une estimation qualitative de la probabilité d'apparition

1. 2. 3. 4.

5.