

Société de Calcul Mathématique SA

Outils d'aide à la décision

depuis 1995



**Utilisation des Extensomètres à Corde Vibrante
et des Fibres Optiques
pour la surveillance d'ouvrages en génie civil**

Le point sur les connaissances disponibles

Rapport adressé à l'ANDRA

en complément des contrats nos 20069690 et 20073122

**(utilisation de capteurs pour la surveillance
d'un site de stockage de déchets radioactifs)**

Rapport rédigé par Adrien Schmitt, Gottfried Berton et Alisson Stocchetti

Avril 2018

Résumé

Les ouvrages de génie civil doivent faire l'objet d'une surveillance continue, afin de s'assurer de la stabilité et du bon fonctionnement pendant les périodes de construction et d'exploitation.

Cette surveillance se fait à l'aide de capteurs. Généralement placés au cœur ou en surface de l'ouvrage, ils permettent de mesurer plusieurs grandeurs physiques (température, déformations, radioactivité, etc.). Deux types d'utilisation reviennent principalement :

- Détection d'une alerte, comme par exemple la rupture d'une canalisation ;
- Suivi permanent de l'ouvrage, pour vérifier que tout se passe bien.

C'est naturellement le second qui intéresse l'ANDRA pour le stockage des déchets : la surveillance doit s'étendre sur de très longues périodes.

Nous présentons dans ce document deux types de capteurs : les extensomètres à corde vibrante (ECV) et les fibres optiques (FO) ; nous en analysons les fragilités.

Les extensomètres mesurent des variations de longueur sur de petites distances en analysant les changements de fréquence d'oscillation d'un petit fil métallique tendu entre deux ancrages. Les fibres optiques sont capables de mesurer des variations de longueur sur plusieurs kilomètres en utilisant le principe de propagation d'une onde lumineuse.

Comme tout capteur, ils sont sujets à des dysfonctionnements, qui peuvent être de différente nature :

- La panne : le capteur n'indique plus rien ;
- Une incertitude excessive : la précision est dégradée et l'information est peu utilisable ;
- La fausse alarme : le capteur indique des situations qui ne correspondent pas à la réalité.

Il existe dans la littérature très peu de données, provenant du retour d'expérience, à propos de la durée de vie des capteurs dans des ouvrages de génie civil. Nous faisons le point ici en ce qui concerne les "fragilités" des deux types de capteurs.

Nous sommes particulièrement reconnaissants, pour les informations qu'ils nous ont transmises, à :

EDF : Dominique Minière, Anne Jancovici, José Veau ;
IRSN : Giovanni Bruna ;
Vinci Construction Grands Projets : Gilles Causse.

Mais naturellement les conclusions présentées ici sont de la responsabilité de la SCM.

Sommaire

Résumé	2
I. Ouvrages de génie civil.....	4
A. Le béton	4
B. Déformation des ouvrages.....	7
C. Fissuration des ouvrages	12
II. Extensomètre à corde vibrante.....	19
A. Présentation	19
B. Principe de fonctionnement	19
C. Durée de vie.....	21
III. Fibre optique.....	31
A. Présentation	31
B. Principe de fonctionnement	31
C. Mécanisme de noircissement des fibres optiques	33
D. Durée de vie.....	40
E. Cas particulier d'utilisation : surveillance de réacteurs	48
Annexe 1 – Les origines de fissurations.....	53
Annexe 2 – Notion de durée de survie	54
A. Définitions	54
B. Lois utilisées dans le génie civil.....	55
Références.....	57

I. Ouvrages de génie civil

A. Le béton

Le génie civil représente l'ensemble des techniques de constructions civiles. Le domaine d'application est très vaste ; il englobe les travaux publics et le bâtiment. Le béton est l'un des matériaux nécessaires à l'édification d'ouvrages de génie civil.

a. Présentation du béton

Le béton est un assemblage de grains inertes, les granulats, liés par une pâte résultant du mélange de ciment, d'eau, d'air et éventuellement d'additions minérales et/ou adjuvants organiques.

On retrouve dans le béton les éléments suivants :

— Le ciment anhydre ;

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire qu'il a la propriété de durcir au contact de l'eau, et, après durcissement, il conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. La plupart des ciments sont composés majoritairement de clincker, fabriqué à partir d'environ 80% de calcaire et 20% d'argile.

— Les granulats ;

Les granulats constituent le squelette du béton. Les caractéristiques du béton, telles que son comportement mécanique et ses performances à long terme, sont influencées par les propriétés des granulats qui le composent.

— L'eau de gâchage ;

L'eau utilisée doit répondre à certaines exigences consignées dans la norme européenne NF EN 1008 : "Eau de gâchage pour béton". Le dosage en eau du béton est un paramètre important et délicat, car l'eau agit sur la consistance et la résistance.

— Les adjuvants.

Les adjuvants sont des composés organiques permettant de modifier les propriétés du béton.

Si l'on regarde la microstructure (le mélange de granulats et de pâte de ciment) d'un béton, on observe un matériau relativement isotrope. Cela signifie que la microstructure n'est pas orientée dans une direction en particulier, contrairement aux matériaux avec des fibres orientés.

b. Caractéristiques mécaniques du béton

Le béton est un matériau qui évolue dans le temps. Le processus de durcissement du béton peut être découpé en 4 phases :

— Phase 1 : La période dormante ;

Lors de sa mise en œuvre, le béton frais est liquide, facilement malléable et sa résistance mécanique est quasiment nulle. Le béton est un fluide visqueux dans lequel les grains solides et les granulats sont en suspension dans un liant hydraulique (ou matrice).

Cette phase ne dure que quelques heures.

— Phase 2 : La prise ;

A partir d'un certain moment, le béton a suffisamment réagi pour donner une pâte cassante. Le béton ne peut plus être travaillé. Les propriétés mécaniques (résistance, etc.) varient rapidement.

Cette période dure environ 3 jours.

— Phase 3 : Le durcissement moyen terme ;

A la fin de la période de prise, le béton est durci et possède des propriétés qui sont proches de ses propriétés à maturité.

Cette phase se termine 28 jours après avoir effectué le mélange, ce qui correspond au jeune âge du béton.

— Phase 4 : Le durcissement long terme.

Le béton continue de durcir pendant le reste de sa vie, grâce aux réactions d'hydratation résiduelles possibles dans la matrice.

L'évolution de la résistance est présentée sur le graphique suivant :

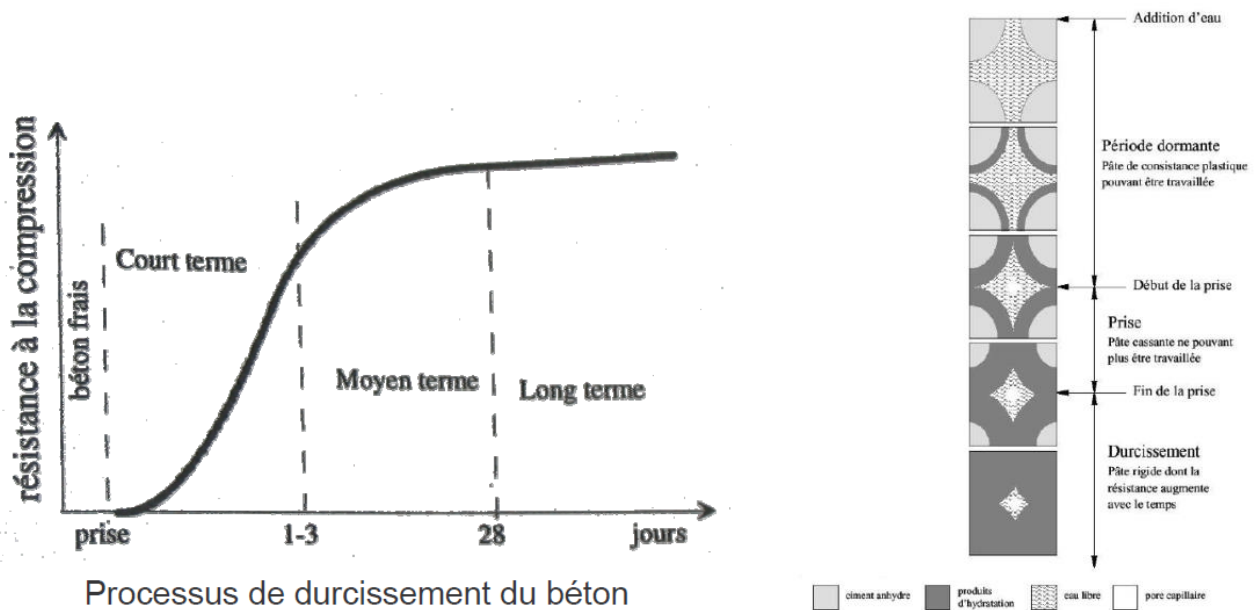


Figure 1 : Evolution de la résistance à la compression du béton [LISSANDRE] et structuration de la pâte de ciment [MOLEZ]

La dépendance du béton aux directions des contraintes mécaniques (anisotropie) n'apparaît que lorsque l'on sollicite le matériau. Les propriétés du béton sont différentes selon la sollicitation que celui-ci subit. La résistance à la rupture est de l'ordre de 12 fois plus élevée en compression qu'en traction. Pour les Bétons Hautes Performances cette dissymétrie est d'autant plus marquée.

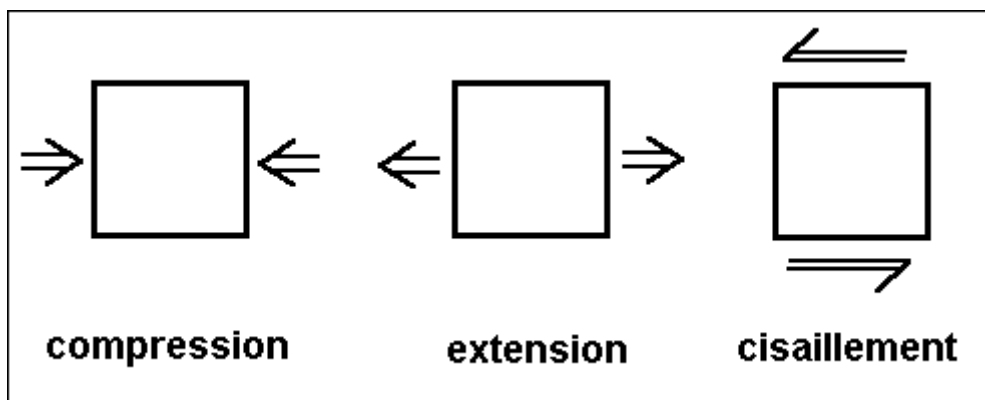


Figure 2 : Type de déformation en fonction des contraintes mécaniques appliquées

Les caractéristiques mécaniques du béton sont :

— Le module d'élasticité (module de Young) ;

Le module d'élasticité représente la contrainte qu'il faudrait appliquer au matériau pour obtenir une déformation de 100%, soit doubler la longueur initiale.

La déformation représente l'augmentation de la taille du matériau par rapport à sa taille initiale : une déformation de 5% représente une augmentation de 5 cm pour un matériau d'un mètre.

— La résistance à la compression ;

La résistance à la compression est la contrainte maximale de compression que le matériau peut supporter avant sa rupture.

— La résistance à la traction.

La résistance à la traction est la contrainte maximale de traction que le matériau peut supporter avant sa rupture.

Le béton a un comportement différent en traction et en compression : il est beaucoup plus résistant en compression.

B. Déformation des ouvrages

La déformation des ouvrages passe par la déformation du béton. Or le béton est un matériau qui peut se déformer soit :

— Naturellement, en l'absence de contrainte ;

Le changement naturel de volume du béton est appelé retrait et est lié aux phénomènes physiques et chimiques qui ont lieu dans le béton.

Le retrait peut avoir lieu avant, pendant ou après la prise du béton. Ces variations de dimension donnent lieu à l'apparition de fissurations précoces. Les fissurations liées au retrait doivent être différenciées des phénomènes de fissuration sous chargement.

— Sous contrainte.

En présence d'une contrainte, le béton, comme tous matériaux, se déforme. Le comportement du béton varie en fonction du chargement qui lui est appliqué. Pour des faibles valeurs de chargement, le béton a un comportement élastique linéaire : lorsqu'on augmente progressivement la contrainte appliquée au matériau, la déformation augmente proportionnellement. A partir d'un certain seuil celui-ci a un comportement non linéaire.

a. Déformations naturelles

En l'absence de chargement, le béton se déforme naturellement au cours du temps. La Figure 3 présente une évolution schématique de cette déformation appelée retrait :

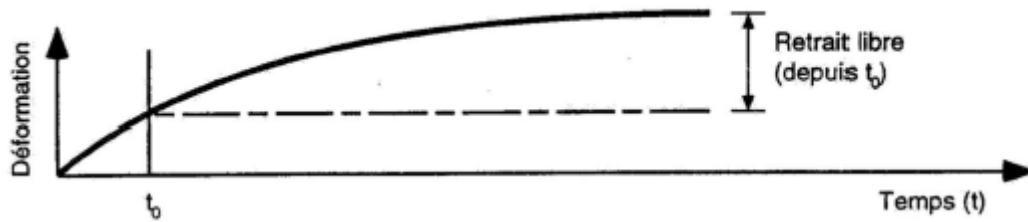


Figure 3 : Déformation en valeur absolue engendrée par les retraits [MOLEZ]

Quatre types de retrait peuvent être à l'origine de la déformation du béton [Laboratoire de la Matière] :

— Le retrait d'auto-dessiccation (endogène) ;

Le retrait endogène est provoqué par la réaction d'hydratation du ciment. Le volume des produits de la réaction (pâte de ciment) est plus faible que le volume des réactifs (ciment anhydre, eau). On nomme cette composante "retrait endogène", puisqu'elle est inhérente aux réactions chimiques du matériau.

Le retrait endogène est faible et même négligeable pour les bétons ordinaires, mais assez élevé pour les bétons de haute résistance (BHP) ; il peut atteindre 0,25 mm/m. Le graphique ci-dessous donne un ordre d'idée des déformations de retrait endogène, pour différents rapports Eau/Ciment pour un BHP.

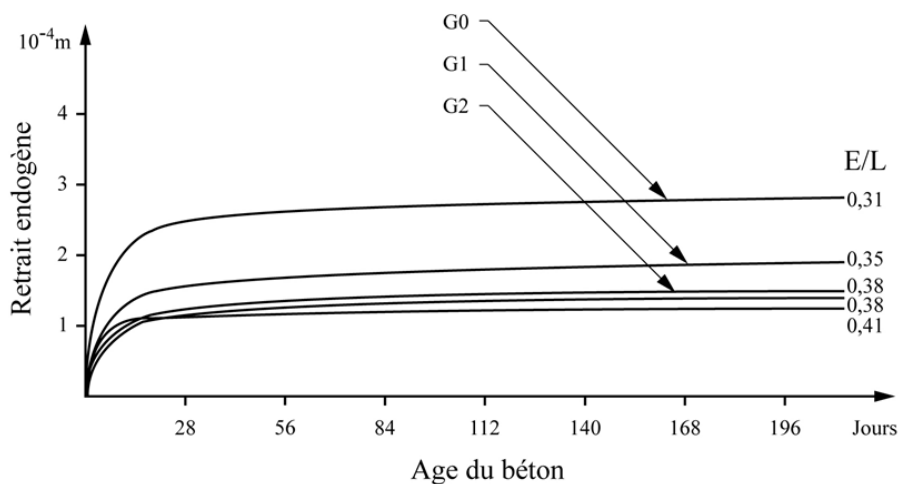


Figure 4 : Retrait endogène pour différents rapport Eau/Ciment

Pour les bétons ordinaires, le retrait endogène est de l'ordre de $100 \cdot 10^{-6}$; pour les BHP il est entre 150 et $200 \cdot 10^{-6}$ [Granger].

— Le retrait de dessiccation ;

Le retrait de dessiccation (ou retrait de séchage) est dû au séchage du béton. L'évaporation trop rapide de l'eau de gâchage d'un béton frais génère des retraites qui, s'ils sont importants, provoquent la fissuration du béton.

L'eau qui migre de l'intérieur vers l'extérieur de la structure sous forme de vapeur va provoquer une dessiccation. Cette dessiccation est à rapprocher de l'image d'une éponge qui rétrécit en séchant, ou de la boue qui craquelle au fond d'une ancienne flaque d'eau sur un chemin.

Le retrait de dessiccation se développe lentement et ce d'autant plus que l'élément en béton est épais ; en multipliant par 2 l'épaisseur d'un mur, on multiplie par 4 le temps de séchage. Les bétons de hautes performances, gâchés avec peu d'eau, ont un retrait de dessiccation faible, pouvant être inférieur à 0,2 mm/m. Celui des bétons ordinaires peut être 4 fois plus important.

Contrairement au retrait endogène, le retrait de dessiccation décroît avec le rapport Eau/Ciment :

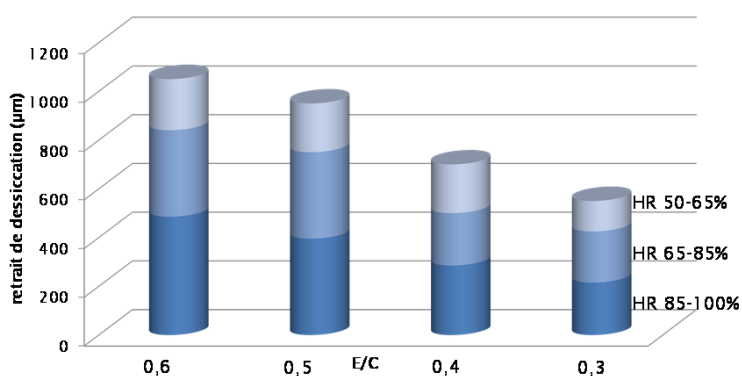


Figure 5 : Retrait de dessiccation pour différents rapport Eau/Ciment et différents taux humidité (HR)

— Le retrait thermique ;

Le premier phénomène qui accompagne le durcissement du béton est un dégagement de chaleur. Le retour à la température ambiante provoque donc un retrait thermique (contraction du volume). Il est de moindre importance que le retrait endogène et de dessiccation.

La chaleur produite provoque une élévation de température qui peut atteindre 30 à 60°C de plus par rapport à la température ambiante (pour un béton sous vide).

— Le retrait plastique.

Il intervient à très jeune âge, avant la prise. L'eau de surface s'évapore plus rapidement que celle qui remonte à la surface par tassement du béton.

b. Déformations mécaniques

Le béton peut également se déformer lorsqu'on applique un chargement mécanique.

Lorsqu'un chargement est appliqué à une structure en béton, celle-ci se déforme instantanément. Ce phénomène s'appelle la déformation élastique instantanée. Si le chargement est maintenu constant, la structure continue de se déformer au cours du temps. La déformation ainsi engendrée est appelée déformation de fluage.

On distingue deux types de fluage :

— le fluage propre ;

La déformation de fluage propre est la déformation mesurée sur une éprouvette chargée lorsqu'elle est séchée. Les réactions de dessiccation sont considérées comme inexistantes [Benboudjema].

— Le fluage de dessiccation.

La déformation de fluage de dessiccation est la déformation mesurée sur une éprouvette chargée lorsqu'elle est saturée en eau. C'est une déformation qui est causée par les réactions de dessiccation résiduelles.

Le fluage de dessiccation est provoqué par la perte d'eau du béton vers le milieu extérieur. Le fluage de dessiccation dépend de la quantité d'eau présente dans le béton et de l'humidité relative du milieu.

La Figure 6 présente schématiquement la déformation du béton lors d'un chargement continu :

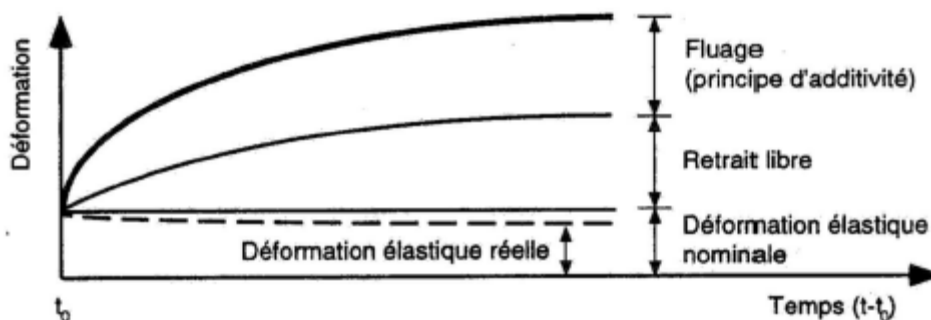


Figure 6 : Déformation du béton sous chargement

Au final on retrouve :

— La déformation élastique : elle correspond à la réponse instantanée du béton au chargement instantané à l'instant t_0 ;

- Le retrait libre : cette déformation est indépendante du chargement et est propre au béton ;
- Le fluage : cette déformation est la somme de la déformation de fluage propre et de dessiccation.

La surveillance d'un ouvrage implique un contrôle sur du long terme. Ainsi les déformations mesurées par les capteurs concernent principalement les déformations dues au fluage.

c. Déformation thermique

Le béton étant formé d'une matrice et de granulats, l'étude de la déformation thermique du béton nécessite de connaître la déformation thermique de chacun de ses composants. Comme il est majoritairement composé de granulats, sa déformation thermique est fortement liée à la nature des granulats qui le constituent [NGUYEN].

En effet, les granulats occupent 60 à 80% du volume du béton. Les propriétés du granulat à haute température sont [KHOURY] :

- Un faible coefficient de déformation thermique ;
- L'absence de déformations résiduelles après refroidissement ;
- Une bonne stabilité thermique.

Les propriétés des granulats et les performances des bétons sont généralement classées en deux catégories basées sur leur composition chimique : les bétons de granulats calcaires et les bétons de granulats siliceux.

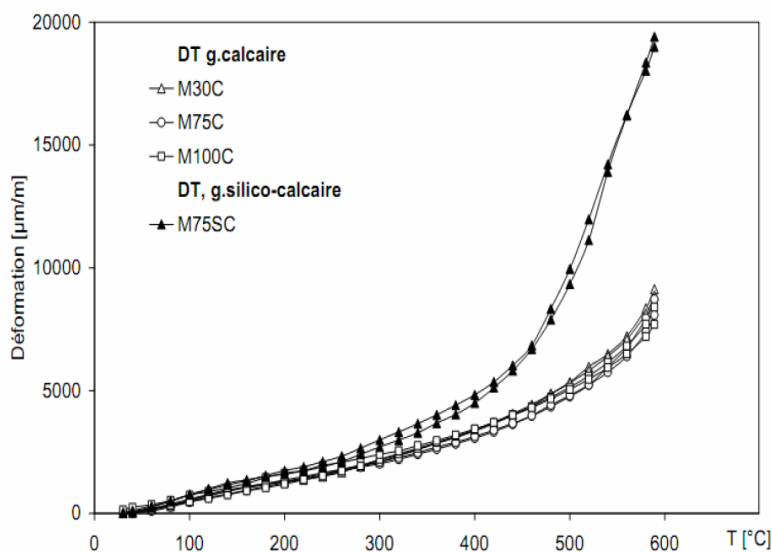


Figure 7 : Comparaison des déformations thermiques de différents bétons : béton de granulats silico-calcaire et de granulats calcaire [HAGER]

Le granulat silico-calcaire possède un coefficient de dilatation thermique plus élevé que celui du granulat calcaire, ce qui implique que la dilatation thermique du béton de granulats silico-calcaires est plus élevée que celle du béton de granulats calcaires.

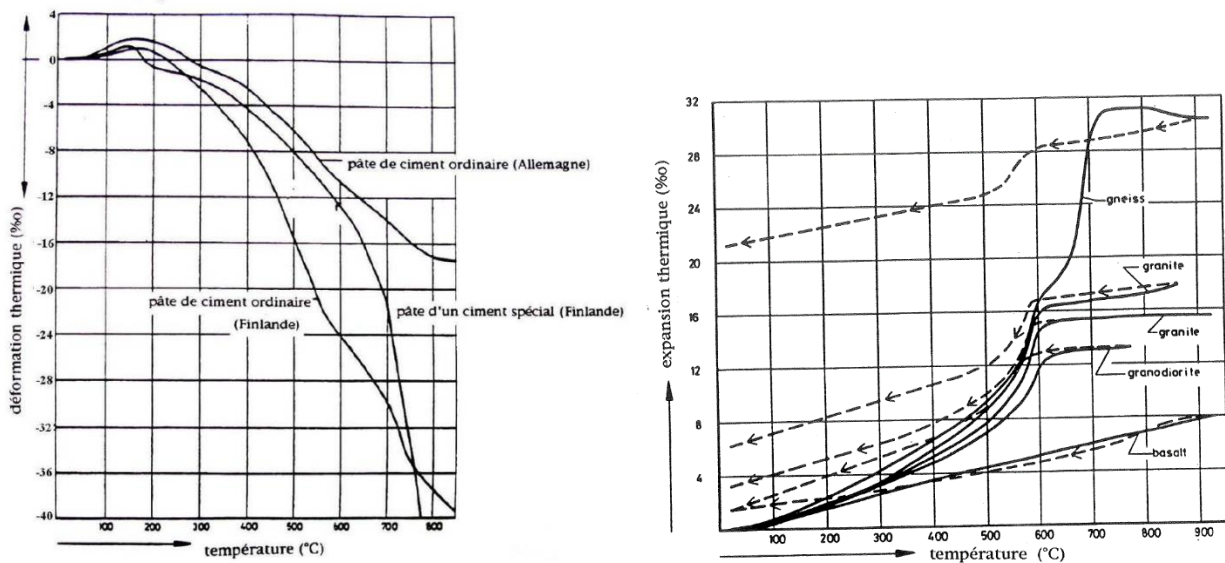


Figure 8 : Déformation thermique des pâtes de ciment (à gauche) et des granulats (à droite) [DIEDERICHS]

Au-delà de 150°C, la pâte de ciment subit un retrait qui devient très important au-delà de 300°C. Le retrait est lié au départ de l'eau contenue dans le matériau. Au contraire, au-delà de 300°C les granulats subissent des expansions.

Les déformations entre la pâte de ciment (retrait) et les granulats (dilatation) sont incompatibles au-delà de 400°C. Ces résultats montrent l'influence de l'hétérogénéité du béton, et plus particulièrement de l'incompatibilité des déformations entre pâte de ciment et granulats à hautes températures. Ce comportement opposé granulats / pâte de ciment engendre l'endommagement du béton.

L'apparition de fissures est localisée tout d'abord aux interfaces pâte de ciment / granulats puis se propage au sein de la pâte de ciment (Figure 9).

C. Fissuration des ouvrages

a. Présentation de la fissuration

La fissuration du béton peut avoir trois origines :

— La qualité du matériau ;

On retrouve comme phénomène le retrait (retrait plastique, premier retrait, retrait endogène, retrait thermique après prise, retrait hydraulique).

— La mise en œuvre ;

L'ajout d'eau, la météo, les liaisons entre les éléments, les réseaux (gaines électriques, plomberie...), la vibration, sont des éléments influençant l'apparition des fissures.

— Le fonctionnement de la structure.

L'aspect mécanique (tassement, changement de destination de l'ouvrage, modélisation non représentative du fonctionnement réel) et thermique (isolation thermique, joint de dilatation) sont à prendre en compte.

La liste complète des causes de fissuration est donnée en Annexe.

Une fissure peut être caractérisée par cinq éléments :

- Son ouverture ;
- Sa longueur ;
- Son tracé ;
- Sa profondeur : fissure de surface, traversante, aveugle ;
- Son activité : passive (morte), active.

Selon ses caractéristiques, une fissure peut être classée en plusieurs types :

- Microfissure : fissure très fine au tracé plus ou moins régulier et le plus souvent discontinu et ayant une ouverture inférieure à 0,2 mm ;
- Fissure : ouverture linéaire au tracé plus ou moins régulier dont la largeur est comprise entre 0,2 et 2 mm ;
- Lézardes : fissure d'ouverture supérieure à 2 mm.

Les microfissures apparaissent dans les zones les plus fragiles et où il y a des inhomogénéités comme des cavités ou des interfaces pâte-granulat.

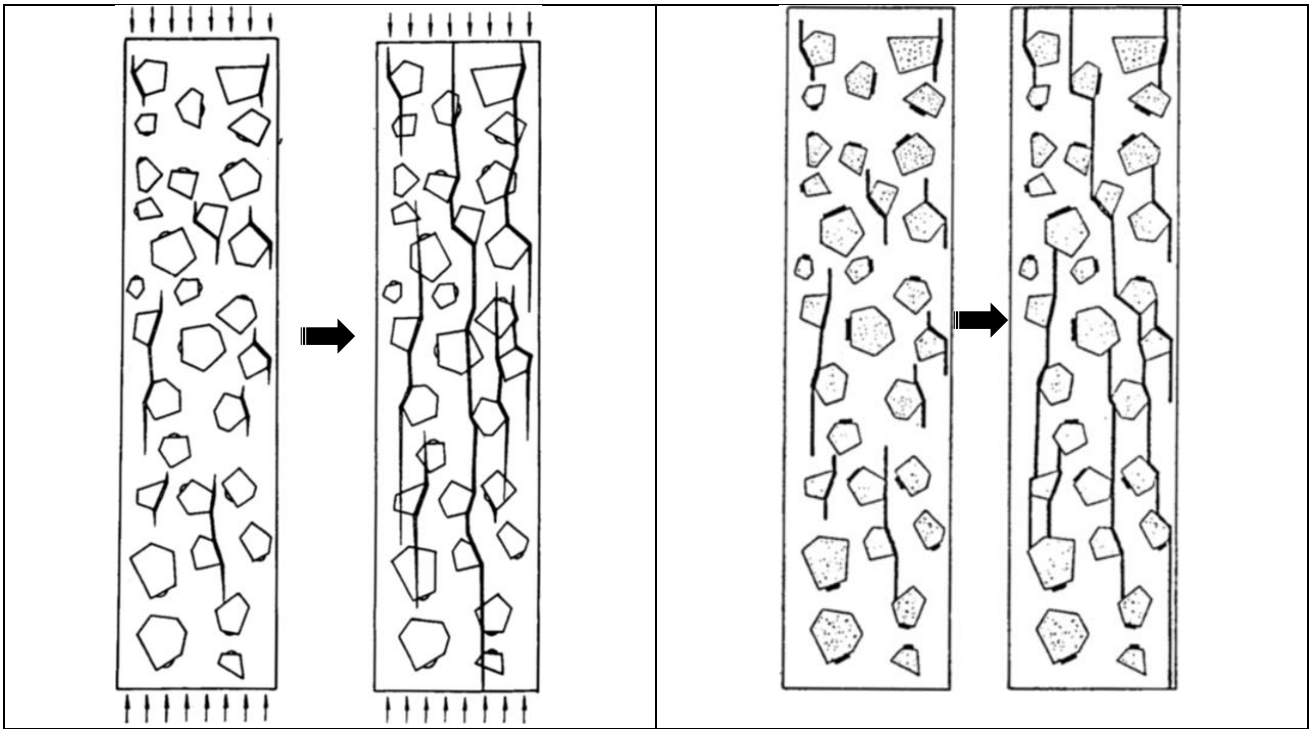


Figure 9 : Fissuration d'un béton haute performance (gauche), d'un béton normal (droite) à faible et haut chargement en compression

b. Fissuration à hautes températures

La zone d'interface pâte-granulat est considérée comme le point faible du béton. Que ce soit sur les bétons ordinaires ou sur les hautes performances (bétons caractérisés par une très forte résistance à la compression), les modes de fissuration sont indépendants de la matrice cimentaire et dépendent essentiellement de la nature du granulat.

La Figure 10 présente le comportement de bétons hautes performances à 750°C. Ces bétons sont confectionnés à partir de différents types de granulats : granulats de silex (X), de granites (G), de calcaire dense noir (N) et de calcaire poreux blanc (B). Le granite et le silex sont de nature siliceuse et le calcaire noir et blanc de nature calcaire [GRANULATS].

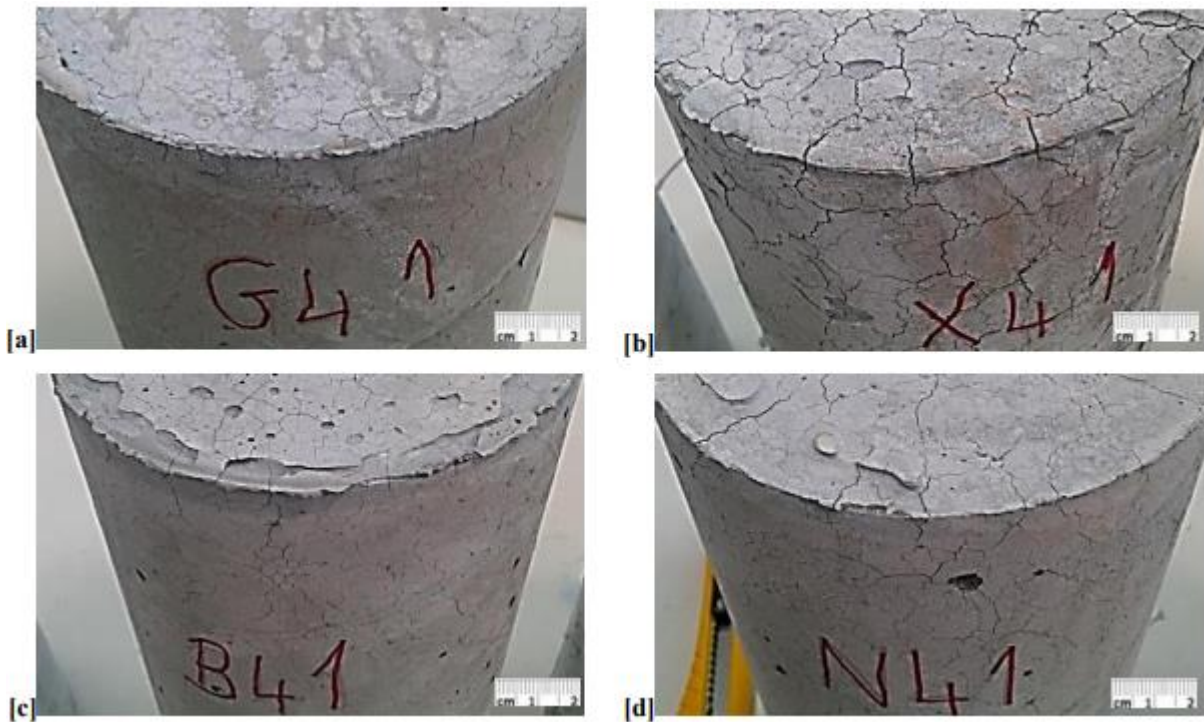


Figure 10 : Fissurations des bétons hautes performances après un cycle à 750 °C : [a] BHP-G ; [b] BHP-X ; [c] BHP-B ; [d] BHP-N. [GRANULATS]

Les fissures se forment en développant des réseaux aux frontières du matériau. Les bétons à base de granite [a] sont les moins fissurés. A l'échelle macroscopique, les bétons à base de calcaire noir [d] se dégradent plus que ceux à base de calcaire blanc [c] car les fissures présentent des ouvertures plus importantes et un réseau plus dense. Les ouvertures de fissures principales sont plus importantes pour les bétons à base de silice [b].

La nature de la matrice cimentaire influe sur le gain de résistance pour les bétons hautes performances étant donné que l'interface pâte de ciment / granulats est meilleure pour cette formulation et notamment pour la résistance en compression des bétons à 750 °C.

c. Traitements des fissures

Les fissures sont inévitables. Elles peuvent être classées comme accessibles et visibles ou comme inaccessibles et cachées. Selon le type, le traitement n'est pas obligatoire comme par exemple lorsqu'elles sont abritées et ne présentent aucun risque structurel.

Pour les fissures qui nécessitent un traitement, celui-ci a lieu a posteriori et il n'est possible que si elles sont présentes aux frontières de l'ouvrage, c'est-à-dire accessibles et visibles.

Il existe diverses méthodes ayant pour but de rétablir une liaison et une étanchéité lorsque les fissures doivent être protégées des infiltrations [LISSANDRE] :

— L'injection ;

Une « colle » (classiquement du coulis de ciment, du mortier, de l'enduit ou une résine) est injectée dans la fissure et vient la boucher. Une liaison mécanique est ainsi créée et l'étanchéité est conservée entre les parties disjointes.

On dispose à ce jour de très peu d'informations à propos de la sensibilité des résines aux radiations (Vinci Construction Grands Projets).



Figure 11 : Enduit de rebouchage liquide pour microfissures (à gauche) et résine de réparation pour fissure souple (à droite).

— Le calfeutrement ;

La fissure est colmatée par des matières non solides (c.-à-d. souples) en profondeur offrant ainsi une étanchéité des fissures à l'eau et à l'air, et évitant des pénétrations de matières solides risquant de bloquer le mouvement de la fissure. Dans ce cas, la fissure est libre d'évoluer.

Le calfeutrement implique la création d'une saignée pour pouvoir traiter et stopper la fissure en profondeur. Ainsi, cette technique est réalisable pour des fissures dont on connaît la localisation et qui ne sont pas encore apparues sur la frontière de l'ouvrage.

Cette technique est facile mais elle reste une solution à court-terme. Après quelques années, le colmatage se détache facilement.

CALFEUTREMENT

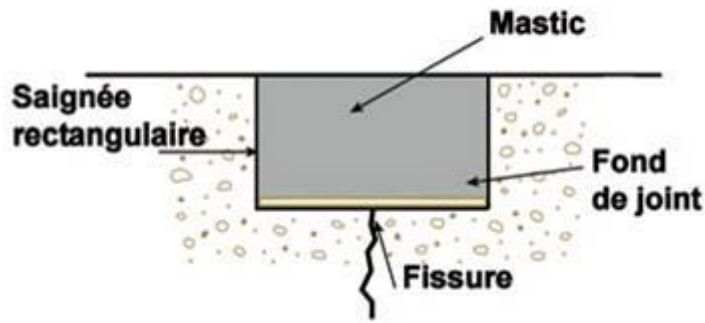


Figure 12 : Calfeutrement d'une fissure

— Le pontage ;

Il s'agit de recouvrir en surface des fissures pour les protéger du ruissellement ou de l'infiltration d'eau.

— La protection superficielle ;

C'est un recouvrement superficiel des fissures par du mortier ou par une règle métallique. Les fissures réapparaissent très rapidement avec cette technique.



Figure 13 : Traitement de la fissure à l'aide d'une règle métallique

— Le traitement général ;

Il s'agit de poser plusieurs revêtements étanches, imperméabilisants et esthétiques pour cacher les fissures.

Ces méthodes ne sont valables que s'il n'y a pas de risque structurel. En cas de risque structurel, il faut renforcer l'ouvrage à l'aide par exemple de vérins, de poteaux supplémentaires ou de renforts composites.

L'utilisation de capteurs est efficace : elle permettra de déceler l'apparition de fissures (avec les mesures de déformation) et donc d'agir en conséquence avant d'être obligé de détruire une partie, voire la totalité, de l'ouvrage et de le reconstruire.

II. Extensomètres à corde vibrante

A. Présentation

L'extensomètre à corde vibrante est un capteur permettant de mesurer les déformations d'un élément d'ouvrage. Il est régulièrement présent dans le domaine des structures et de la mécanique des roches. Il est souvent choisi à cause de sa bonne solidité et de sa longévité. Il peut être noyé dans le béton ou installé en surface. Avec sa structure rigide, ce capteur est efficace en compression, mais moins en traction. En effet, lors de la traction, il peut "bloquer" la déformation de l'ouvrage comme les barres d'acier dans le béton armé.

Les extensomètres sont des capteurs "ponctuels", c'est-à-dire qu'ils ne mesurent les déformations que sur de petites distances. Les extensomètres seuls sont peu adaptés pour la mesure de déplacement sur un ouvrage de grandes dimensions du fait de la petite taille de leur domaine de détection (11 cm). La position des fissures a une influence très forte sur une mesure locale et le lieu d'apparition des fissures n'étant pas prévisible, l'extensomètre n'est pas suffisant pour ausculter convenablement de grands ouvrages.

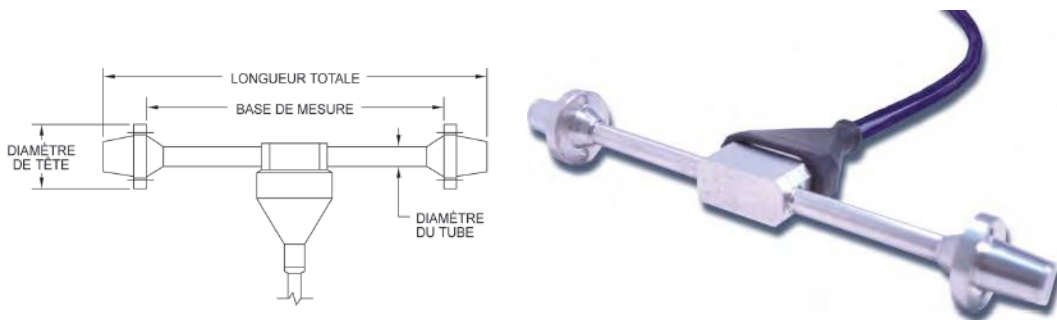


Figure 14 - Représentations d'un extensomètre à corde vibrante

De plus, comme tous les autres capteurs, il mesure des déformations sans pour autant qu'il y ait des fissures. De ce fait, les capteurs ne donnent pas d'informations sur le nombre de fissures, leur longueur, leur ouverture ou encore leur profondeur. Ils ne donnent pas non plus d'informations sur l'origine des contraintes. Ils mesurent des déformations, qui peuvent venir de plusieurs contraintes différentes ou alors d'une unique contrainte comme par exemple une compression simple ou une compression combinée à du cisaillement.

B. Principe de fonctionnement

L'extensomètre à corde vibrante est constitué d'une corde vibrante, de deux ancrages, d'une bobine d'excitation et d'une bobine de mesure.

Le principe de fonctionnement d'un extensomètre à corde vibrante est basé sur la mesure de la fréquence d'oscillation d'un petit fil métallique tendu (aussi appelé corde) entre deux ancrages fixés à la structure à surveiller. La longueur initiale de la corde est déterminée lors de sa fabrication. À partir de la tension de la corde, on déduit son allongement. Un allongement ou un

rétrécissement se traduit par une altération de la tension de la corde, et donc de la fréquence d'oscillation (ou de résonance). Ainsi, lorsque la distance entre ces deux ancrages varie au cours du temps, suite à une déformation de la structure, la tension de la corde va changer et entraîner une variation de sa fréquence de résonance. Si l'on connaît la variation de la fréquence d'oscillation du fil, il est possible de calculer la variation de déformation en combinant les équations décrivant les oscillations des corps à celles de la propagation des ondes. L'oscillation de la corde est réalisée à l'aide de la bobine d'excitation et la mesure de fréquence de résonance est réalisée par la bobine de mesure.

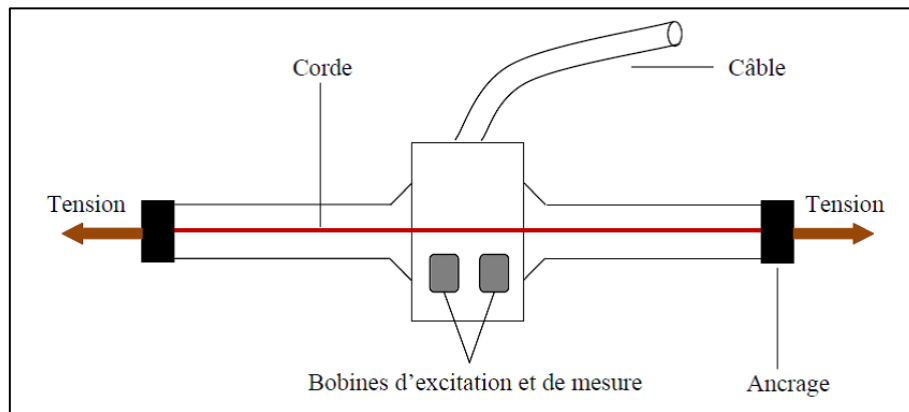


Figure 15 : Schéma d'un extensomètre à corde vibrante [MEI]

Il existe deux modes de fonctionnement pour les extensomètres : le mode amorti et le mode entreteuu.

a. Mode amorti

Le mode amorti consiste à imposer un déplacement initial à la corde, puis à mesurer la fréquence de vibration libre amortie. La procédure de fonctionnement en mode amorti est illustrée sur la figure suivante :

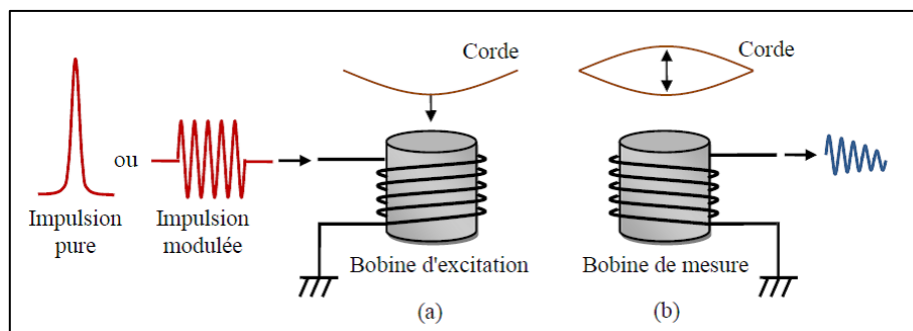


Figure 16: Fonctionnement en mode amorti. (a) excitation impulsionnelle et (b) mesure de l'oscillation libre de la corde [MEI]

Un signal électrique (impulsion pure ou modulée) est envoyé dans la bobine d'excitation. Le signal électrique permet alors de créer un champ magnétique qui excite la corde vibrante. La corde vibre librement jusqu'à son amortissement. Le mouvement de la corde crée un champ magnétique dans la bobine de mesure, qui est à son tour transformé en signal électrique.

b. Mode entretenu

Le mode entretenu consiste à maintenir la corde en résonance, et en même temps à mesurer sa fréquence de résonance. Une première bobine excite continuellement la corde et une autre détecte simultanément la résonance de la corde. La procédure de fonctionnement en mode entretenu est illustrée sur la figure suivante :

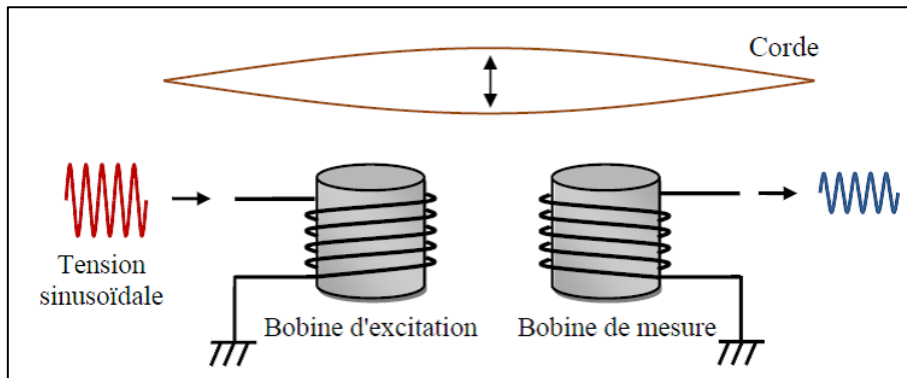


Figure 17 : Fonctionnement en mode entretenu [MEI]

La bobine d'excitation est alimentée par une tension sinusoïdale dont la fréquence est égale à la fréquence de résonance de la corde. Cela génère un champ magnétique variant de façon sinusoïdale qui maintient la corde en résonance. Le couplage magnétique entre la bobine d'excitation et la bobine de mesure est alors modifié par les mouvements de la corde, ce qui produit dans la bobine de mesure un signal dépendant du déplacement de la corde et de sa fréquence de résonance.

C. Durée de vie

Les extensomètres à corde vibrante, comme tout capteur, sont sujets à des dysfonctionnements. Nous distinguons trois types de dysfonctionnements :

- La panne : le capteur n'indique plus rien ;
- Une incertitude excessive : la précision est dégradée et l'information est peu utilisable ;
- La fausse alarme : le capteur indique des situations qui ne correspondent pas à la réalité.

Nous ne prenons en compte que le dysfonctionnement dit "de panne". Nous listons dans un premier temps les causes de dysfonctionnements, puis dans un deuxième temps, nous définissons la loi de durée de vie des capteurs, c'est-à-dire la loi de probabilité qu'a un capteur de tomber en panne au bout d'un certain temps.

a. Causes de dysfonctionnements

Ces capteurs étant mécaniques, sans électronique associée, les facteurs pouvant entraîner une dérive de la mesure sont nettement réduits. Nous listons ci-dessous quelques causes de dysfonctionnements des extensomètres à corde vibrante :

— Le claquage électrique et la foudre ;

Le claquage électrique se produit soit lorsque l'excitation électrique de la corde est trop forte, soit lorsque le capteur est affecté par la foudre.

Dans le premier cas, il est possible de diminuer la probabilité de claquage électrique en restreignant le niveau d'excitation. Dans le deuxième cas, l'effet de la foudre est inévitable, mais peut être réduit. En cas de défaillance, un capteur équipé d'une seule bobine est totalement perdu. En revanche, un capteur équipé de deux bobines est récupérable si une des deux bobines est restée intacte. [MEI]

Par ailleurs le foudroiement peut engendrer la magnétisation du capteur, ce qui conduit au collage magnétique de la corde sur la bobine ou à la modification de sa fréquence de résonance. Le fonctionnement du capteur est par conséquent modifié, voire empêché, bien que le capteur ne soit pas détérioré.

— Pertes de capteurs dues à l'endommagement de câbles ;

Cette panne a lieu le plus souvent à l'installation ou lors de travaux ultérieurs, quelquefois aussi lorsque les tassements différentiels dans la structure auscultée sont importants (au contact "ouvrage en terre/ouvrage béton") ;

— Pertes de capteurs dues à un défaut d'étanchéité (ou corrosion) aux endroits des connexions, en particulier la connexion avec les boîtiers de jonction ou la carte multiplexeurs ;

— Pertes de capteurs dues à la démagnétisation des électro-aimants.

b. Loi de durée de vie

Dans cette partie, nous estimons la fonction de survie des capteurs à corde vibrante à partir des données récoltées sur plusieurs études. Nous présentons en annexe certains aspects des modèles de durées de vie utilisés dans le génie civil.

Il s'agit de déterminer le taux de défaillance instantané, qui fournit la probabilité qu'un capteur tombe en panne entre deux instants t_1 et t_2 sachant qu'il est toujours fonctionnel à l'année t_1 .

Nous listons dans le tableau ci-dessous les données utilisées (les données en rouge sont des données recalculées). Les capteurs qui ont une durée écoulée égale à 1 jour correspondent aux capteurs qui sont tombés en panne lors de la mise en service.

Sources	Année d'installation	Durée écoulée		Nombre de capteurs installés	Nombre de capteurs toujours fonctionnels	Pourcentage de capteurs toujours fonctionnels
		[Années]	[Jours]			
[ROSIN]	2006	6	2 190	5	5	100,0%
[ROSIN]	1959	53	19 345	263	210	80,0%
[ROSIN]	1958	54	19 710	18	15	83,0%
[IMG]	1975	40	14 600	173	109	63,0%
[ALONSO]	2000	2,7	1 000	21	20	95,2%
[ALONSO]	2001	1,9	690	42	37	88,1%
[ALONSO]	2003	0,3	125	38	38	100,0%
[BORDES]		1	365	3 346	3 179	95,0%
[BORDES]		30	10 950	3 346	2 744	82,0%
[MEI]		20	7 300	90	90	100,0%
[MEI]		27	9 855	240	212	88,3%
[MEI]		29	10 585	216	211	97,7%
[MEI]		30	10 950	3 143	2 531	80,5%
[MEI]		0	1	261	248	95,0%
[MEI]		0	1	62	58	93,5%
[MEI]		0	1	110	108	98,2%
[MEI]		0	1	114	96	84,2%
[MEI]		0	1	132	129	97,7%
[MEI]		0	1	120	116	96,7%

Les conditions d'utilisations des capteurs ne sont pas toutes équivalentes pour l'ensemble des études sélectionnées :

- Les données provenant de la source [ROSIN] correspondent à des données d'exploitation de deux barrages (Arras en Drôme et Kariba au Zimbabwe) ;
- Les données provenant de la source [IMG] correspondent à des données d'exploitation sur une soufflerie pressurisée en béton ;
- Les données provenant de la source [ALONSO] correspondent à des données d'une étude réalisée en Suède (Ähr) sur le couplage thermohydraulique ;
- Les données provenant de la source [BORDES] correspondent à des données d'exploitation d'Électricité de France ;
- Les données provenant de la source [MEI] correspondent à des données d'exploitation de quatre centrales nucléaires ;

Le nombre de capteurs installés varie également beaucoup selon l'étude. Certaines études proviennent de données d'exploitations sur 3 346 capteurs alors que d'autres ne reposent que sur seulement 5 capteurs.

La seule information dont nous disposons est le nombre de capteurs opérationnels au bout d'un certain temps. Parmi les capteurs opérationnels, nous ne savons pas si le capteur mesure correctement les déformations, ou s'il y a un dysfonctionnement sur la mesure.

Les études de durée de vie sont généralement réalisées pour un référentiel constant. Les données que nous avons à notre disposition ne sont pas nécessairement représentatives.

Sur le graphique ci-dessous, nous représentons le pourcentage de capteurs opérationnels en fonction du temps. Le nombre de capteurs opérationnels diminue au cours du temps plus ou moins rapidement selon l'étude prise en compte. Les sources sont largement contradictoires : pour un horizon de temps donné, certaines sources indiquent 95% de capteurs survivants et d'autres indiquent 80%.

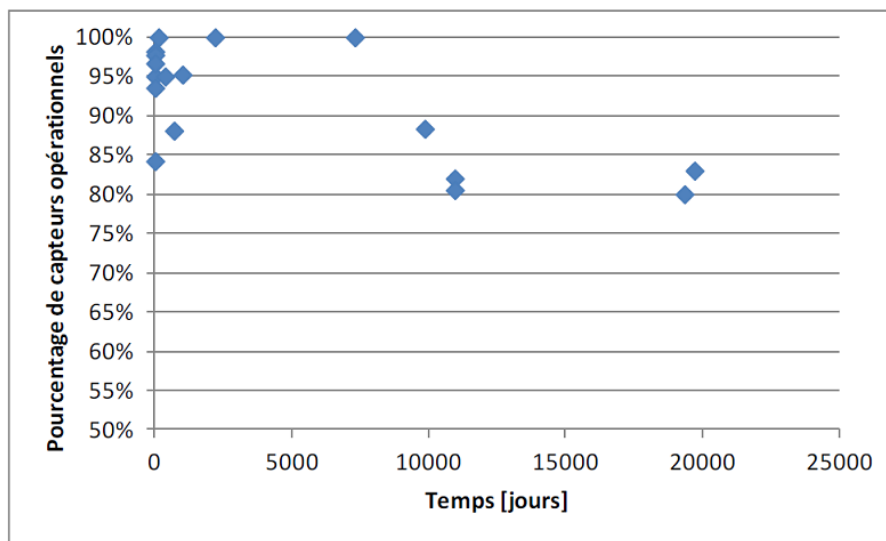


Figure 18 : Pourcentage de capteurs opérationnels en fonction du temps

Nous décidons de tester la loi exponentielle, la loi de Weibull et la loi de Weibull généralisée sur nos jeux de données. Nous sélectionnerons l'une d'entre elles pour la suite de notre étude.

- Loi exponentielle

Sur le graphique ci-dessous, nous représentons le logarithme du pourcentage de capteurs opérationnels en fonction du logarithme du temps, ce qui nous permet de déduire le coefficient dans la fonction de survie.

$$\ln S(t) = -\theta \cdot t \quad \text{Avec } S(t) = e^{-\theta t} \quad (1)$$

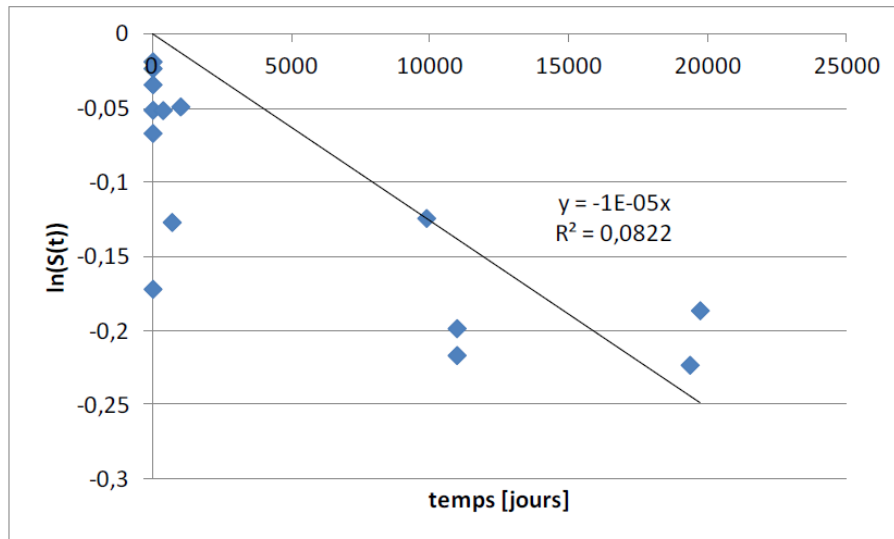


Figure 19 : Pourcentage de capteurs opérationnels en fonction du temps

Avec cette loi, le taux de défaillance instantané λ est homogène et est égal à 0,00001. Cela signifie que la probabilité de tomber en panne pour le capteur au bout d'un jour, sachant que celui-ci fonctionne depuis 5 ans, est la même que si celui-ci fonctionnait depuis 10 ans.

La fonction de survie S est représentée sur le graphique ci-dessous.

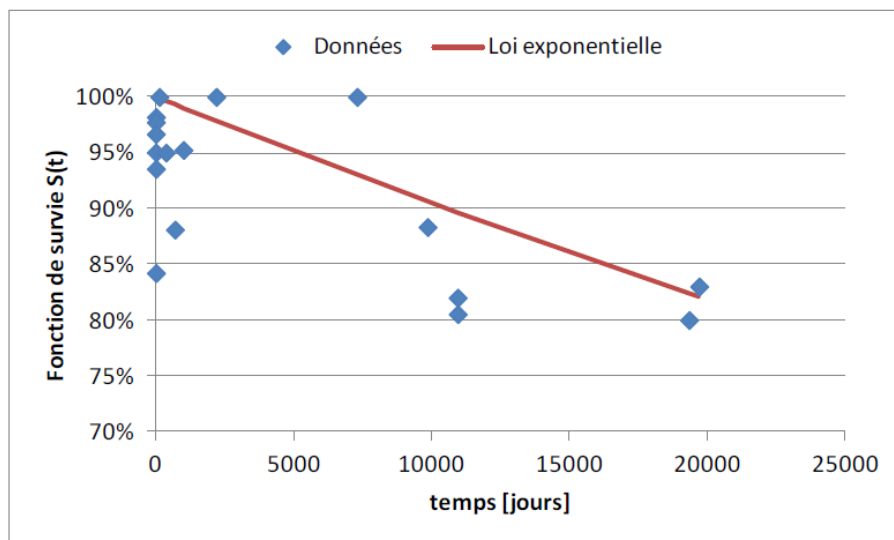


Figure 20 : Résultat de la loi exponentielle

- Loi de Weibull

Nous faisons l'hypothèse que les données suivent une loi de Weibull de paramètres θ et $\nu > 0$.

$$\ln(-\ln S(t)) = -\nu \ln(\theta) + \nu \ln(t) \quad \text{Avec } S(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\nu\right) \quad (2)$$

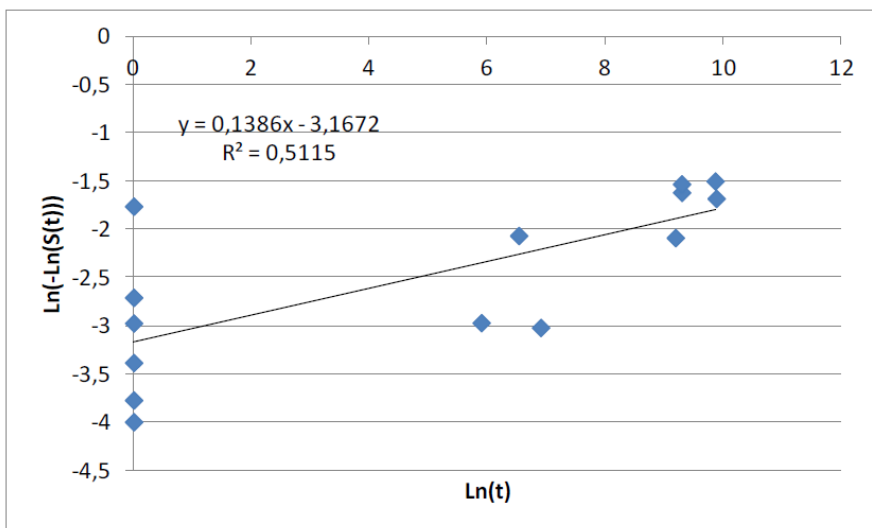


Figure 21 : Linéarisation pour la loi de Weibull

Avec cette loi, le taux de défaillance instantané λ diminue au cours du temps selon la courbe du graphique ci-dessous. Cela signifie que le capteur a une plus forte probabilité de tomber en panne au bout d'un jour, sachant que celui-ci fonctionne depuis 5 ans, que si celui-ci fonctionnait depuis 10 ans.

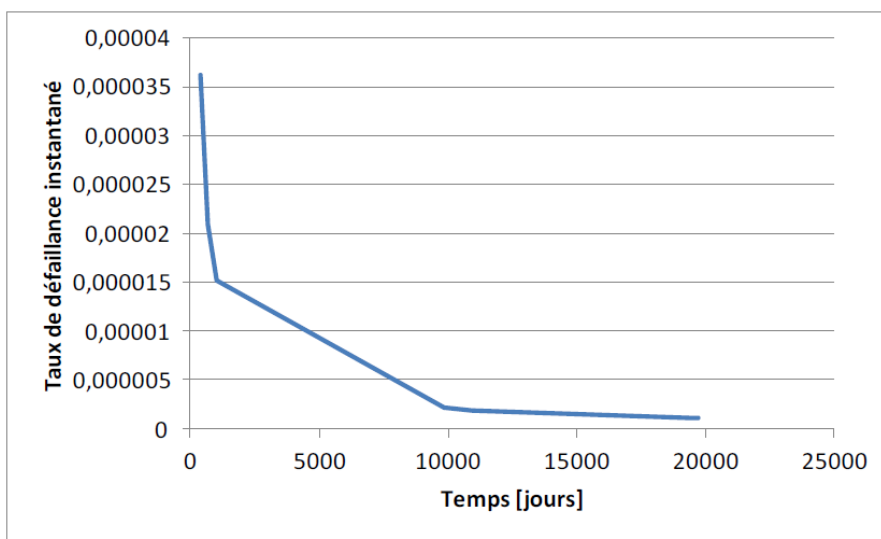


Figure 22 : Taux de défaillance pour la loi de Weibull

La fonction de survie S correspondante est représentée sur le graphique ci-dessous. La probabilité de survie décroît fortement pour des temps faibles (mortalité infantile) pour ensuite décroître plus lentement pendant la durée de vie.

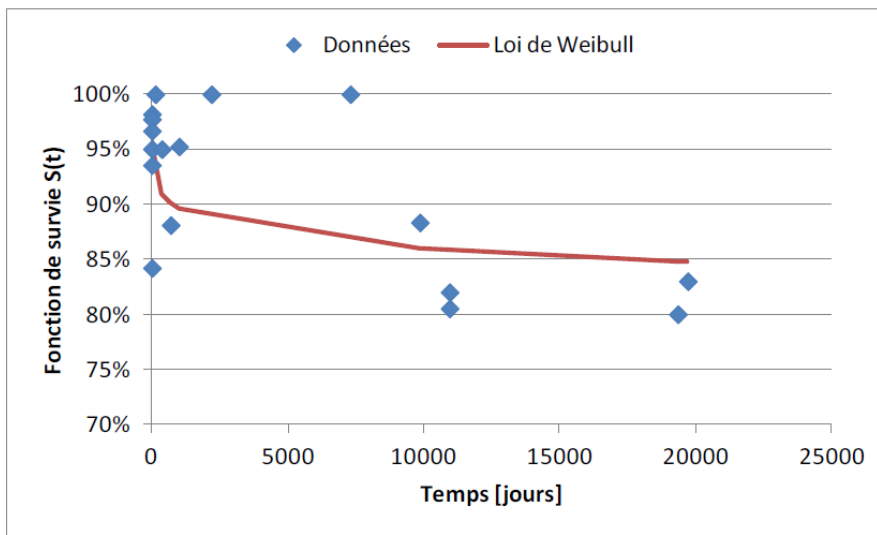


Figure 23 : Résultat de la loi de Weibull

- Loi de Weibull généralisée

Nous faisons l'hypothèse que les données suivent une loi de Weibull généralisée de paramètres $\theta=1$ et $\nu=0,3$.

$$\ln(1 - \ln S(t)) = \frac{1}{\gamma} \ln(1 + t^\nu) \quad \text{Avec} \quad S(t) = \exp \left[1 - \left(1 + \left(\frac{t}{\theta} \right)^\nu \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right] \quad (3)$$

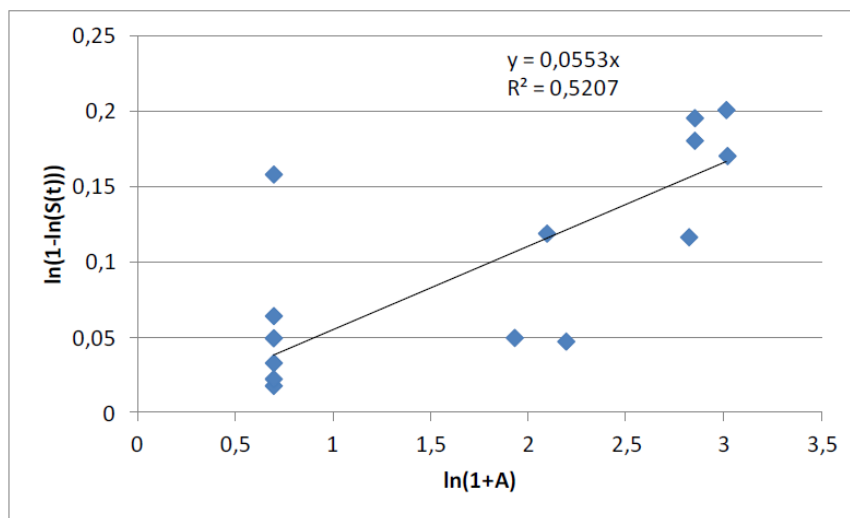


Figure 24 : Linéarisation pour la loi de Weibull généralisée

Avec cette loi, le taux de défaillance instantané λ diminue au cours du temps selon la courbe du graphique ci-dessous. Cela signifie que les capteurs sont encore dans les phases de "mortalité infantile" et de "durée de vie utile". Selon le modèle, le taux de défaillance doit croître pour des âges de capteurs non encore explorés.

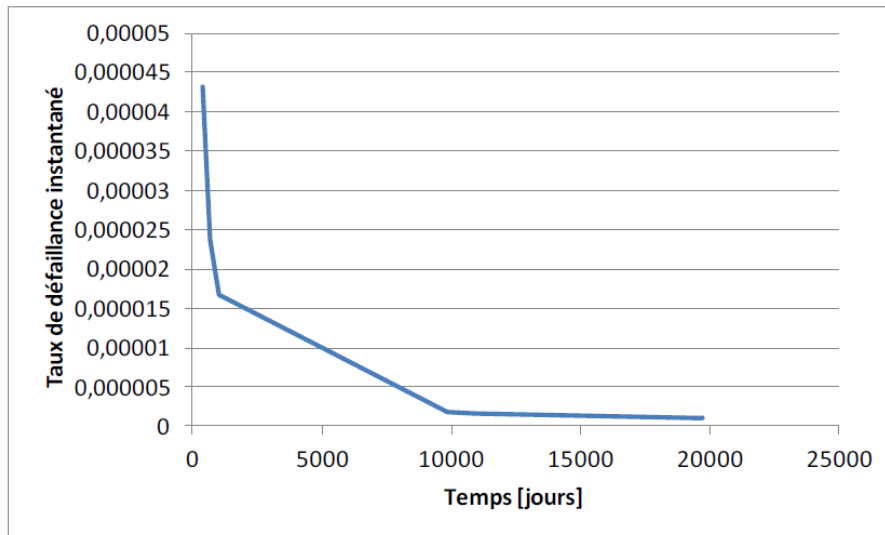


Figure 25 : Taux de défaillance pour la loi de Weibull généralisée

La fonction de survie S correspondante est représentée sur le graphique ci-dessous.

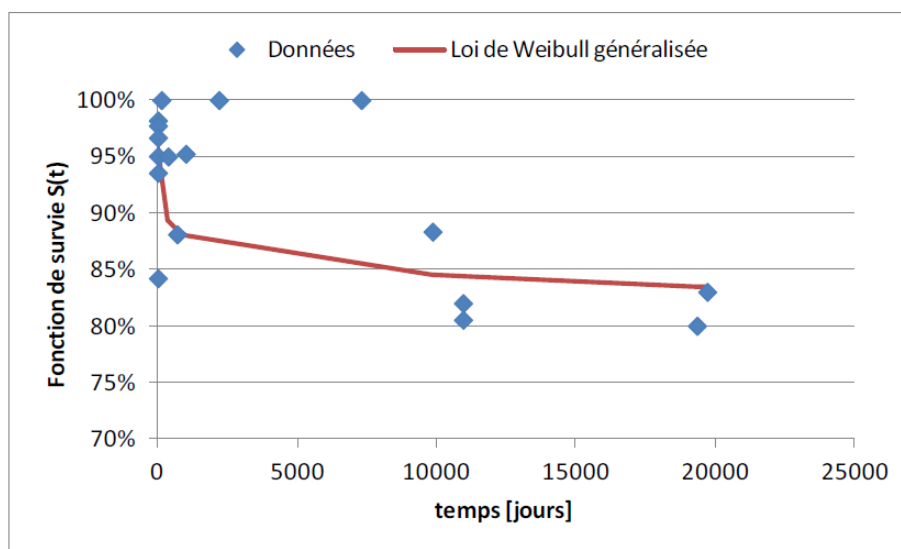


Figure 26 : résultat de la loi de Weibull généralisée

- Choix conseillé

Les données que nous avons récoltées ne sont pas suffisantes pour déterminer correctement la loi de probabilité de défaillance des extensomètres à corde vibrante. Comme nous l'avons déjà dit, les sources sont contradictoires : pour un horizon de temps donné, certaines sources indiquent 95% de capteurs survivants et d'autres indiquent 80%.

Grossièrement, on peut admettre que, à 50 ans, la probabilité de survie est de 80%, ce qu'indiquent différentes sources, par exemple [BORDES]:

"It can be reasonably estimated that, with modern methods and reasonably good site conditions, 80 percent of the instruments can be expected to be operating satisfactorily after 50 years if the notion of utility, mentioned previously, is disregarded."

On constate que les ajustements de courbes sur tous les graphiques ci-dessus sont mauvais. De manière générale, la SCM ne préconise pas l'utilisation de lois paramétriques, et c'est particulièrement vrai en ce cas. Si l'on veut un ajustement paramétrique à choisir parmi les lois présentées ci-dessus, le moins mauvais sera obtenu avec la loi de Weibull. Cette loi ne dépend que de deux paramètres qui sont facilement identifiables à partir d'une faible quantité de données (c'est généralement l'avantage des ajustements paramétriques, qui réclament peu d'informations pour le calage).

Nous ne conservons pas la loi exponentielle, car le risque instantané est homogène et ne permet pas de prendre en compte les "mortalités infantiles" des capteurs.

La loi de Weibull généralisée est plus appropriée pour décrire le comportement de durée de vie des extensomètres, cependant cette loi dépend de trop nombreux paramètres qu'il est difficile d'identifier à partir de nos données.

$$\begin{cases} \lambda(t | \theta, \nu) = \nu \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\nu} t^{\nu-1} \\ S(t | \theta, \nu) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\nu}\right) \end{cases} \quad \text{Avec } \theta = 8.10^9 \text{ et } \nu = 0,14 \quad (4)$$

À l'instant $t=0$, la fonction de survie $S(t)$ est égale à 1. Cela signifie que la probabilité de tomber en panne lors de la mise en service du capteur est nulle. Cependant, pour des temps très faibles, la probabilité de panne $1-S(t)$ augmente fortement au cours du temps. C'est cette augmentation rapide de la probabilité de panne qui permet de décrire la "mortalité infantile" du capteur.

Au bout d'un certain temps, la fonction de survie continue de décroître, mais lentement. Cela signifie que la probabilité de panne augmente avec la durée de fonctionnement. Cette faible diminution permet de prendre en compte le vieillissement du capteur.

Le modèle retenu corrobore les conclusions d'une autre étude réalisée par EDF sur 3 346 capteurs sur des centrales électriques et barrages. Le taux de survie instantané en fonction du temps (rapporté pour mille capteurs) de l'étude est affiché ci-dessous. Il s'agit pour chaque année de la proportion de capteurs qui sont tombés en panne entre l'année a et $a+1$:

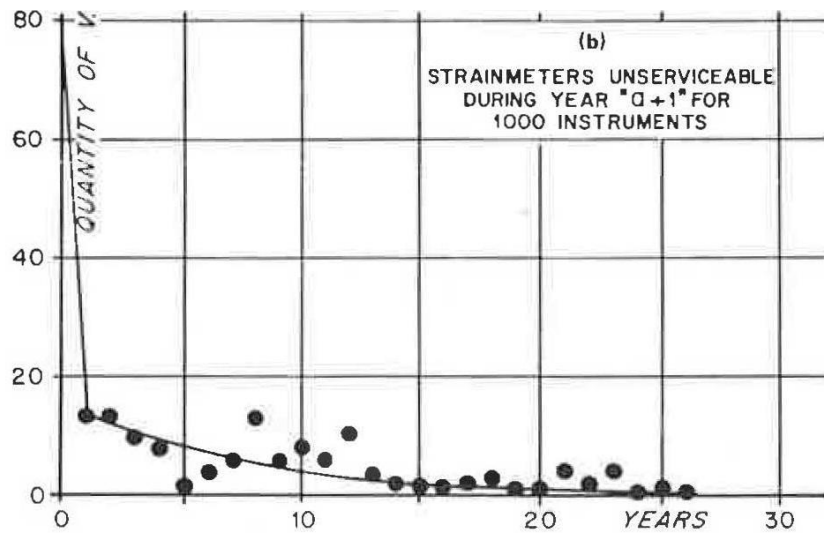


Figure 27 : Taux de défaillance instantané pour l'étude d'EDF [BORDES]

Les résultats pour notre modèle sont sensiblement les mêmes. Nous intégrons la fonction $\lambda(t)$ sur chaque année pour obtenir comme ci-dessus le taux de capteurs qui tombent en panne sur l'année.

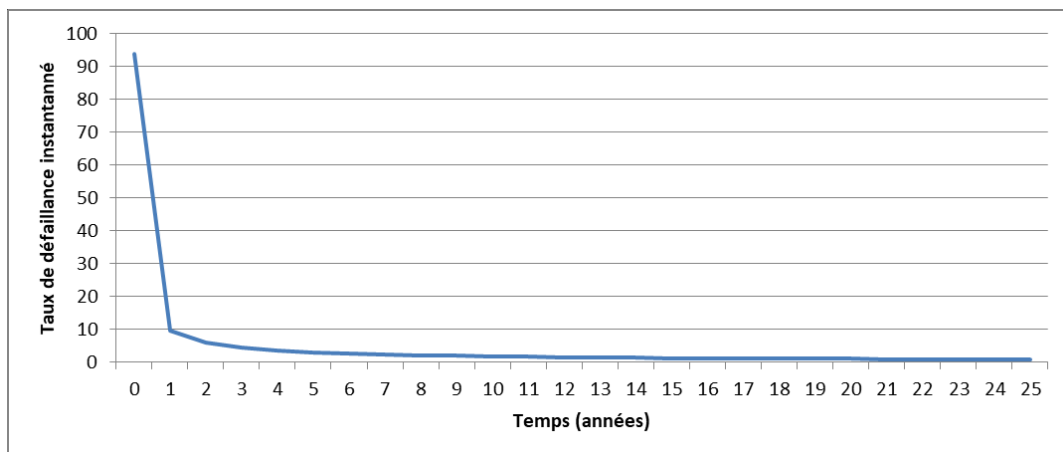


Figure 28 : Taux de défaillance instantané pour le modèle de Weibull retenu dans notre étude

Lors des simulations, nous découpons la durée de simulation en plusieurs petits intervalles. Pour chaque intervalle, nous déterminons la probabilité qu'a chaque capteur de tomber en panne, sachant que celui-ci a survécu jusqu'à l'instant t , c'est-à-dire en utilisant le taux de défaillance instantané λ du capteur.

III. Fibre optique

A. Présentation

L'usage des capteurs à fibres optiques devient pratique courante en génie civil, et ce typiquement pour les mesures de déformations à cœur ou en surface des matériaux de structures. Elles sont également conçues pour la mesure des températures, des pressions, des déformations, du pH, de l'opacité des fluides, de la concentration des gaz, etc.

Selon la norme NF C 93-800 (1991), un *capteur à fibres optiques est un dispositif comprenant une ou plusieurs fibres, permettant de recueillir des informations représentatives de grandeurs mesurées sans autre apport d'énergie que celui des phénomènes observés et/ou des ondes lumineuses circulant dans la ou les fibre(s).*

Contrairement aux extensomètres, les fibres optiques ont l'avantage de transporter de l'information sur des kilomètres. Elles permettent de recouvrir une plus grande surface et il est possible d'effectuer plusieurs mesures sur une même fibre. L'inconvénient de ce type de capteur est que si celui-ci vient à tomber en panne, c'est l'ensemble de la fibre qui devient inutilisable. De plus, comme tous les autres capteurs, les fibres ne donnent pas d'informations sur le nombre de fissures, leur longueur, leur ouverture ou encore leur profondeur, ni sur l'origine des contraintes.

B. Principe de fonctionnement

Le système de mesures par fibre optique est composé de deux éléments : un interrogateur et une fibre optique. L'interrogateur sert à émettre et à analyser un signal lumineux. La fibre optique sert à diffuser le signal lumineux. Elle se compose d'un cœur en silice (fibre de verre), d'une gaine optique, généralement en silice, et d'une gaine mécanique. La gaine mécanique vise essentiellement à protéger la fibre contre les agressions physiques, chimiques, physico-chimiques.

Le fonctionnement du système de mesures réparties par fibre optique est le suivant : l'interrogateur émet une onde lumineuse dans la fibre optique. En parcourant la fibre, l'onde est en partie absorbée ou diffusée par la fibre de verre. La partie de l'onde diffusée est ensuite analysée par l'interrogateur. Le signal reçu par l'interrogateur est un spectre de rétrodiffusion. Il comprend plusieurs raies caractéristiques :

- La raie Rayleigh représente les fluctuations de densité et de composition de la silice. Dans le cas d'un instrument de mesure répartie, elle est sensible aux variations de déformation et de température. C'est un phénomène de diffusion élastique, ce qui signifie que le signal rétrodiffusé est à la même longueur d'onde que le signal incident. Autrement dit, il n'y a aucun échange d'énergie lors de cette diffusion. Les photons incidents et diffusés ont la même énergie ;

- Les raies Brillouin sont liées aux modes acousto-optiques. Elles sont dépendantes de la température et de la déformation de la fibre. C'est un mécanisme de diffusion inélastique, ce qui signifie que l'échange d'énergie entre la matière et la lumière implique un décalage des longueurs d'onde du signal rétrodiffusé et incident ;
- Les raies Raman sont liées aux vibrations moléculaires de la silice. Le rapport d'intensité des deux raies stokes et anti-stokes est directement lié à la température de la fibre. Il s'agit aussi d'un phénomène de diffusion inélastique. Lors d'une diffusion avec décalage stokes, la molécule absorbe de l'énergie et le photon diffusé a moins d'énergie que le photon incident. Lors d'une diffusion avec décalage anti-stokes c'est le contraire. La molécule perd de l'énergie et le photon diffusé a plus d'énergie que le photon incident.

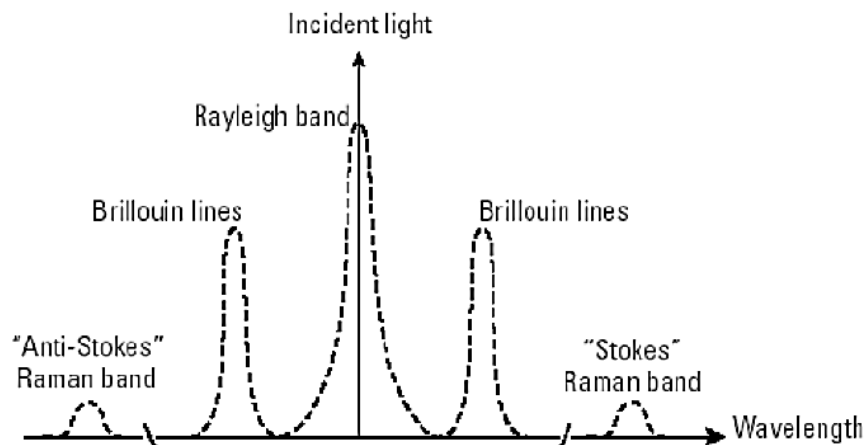


Figure 29 : Spectre de rétrodiffusion de la silice [EDF]

Il existe deux types de fibres optiques :

- Les multimodes : dispositifs utilisant des LED et ayant plusieurs trajets possibles pour les rayons lumineux au sein de la fibre ;
- Les monomodes : dispositifs utilisant un laser et comprenant un seul trajet possible.

Selon le type de fibre, le rayonnement diffusé n'est pas le même. Les multimodes diffusent les longueurs d'onde vers 850 ou 1 300 nm alors que les monomodes diffusent vers 1 300, 1550 nm ou 1 625 nm.

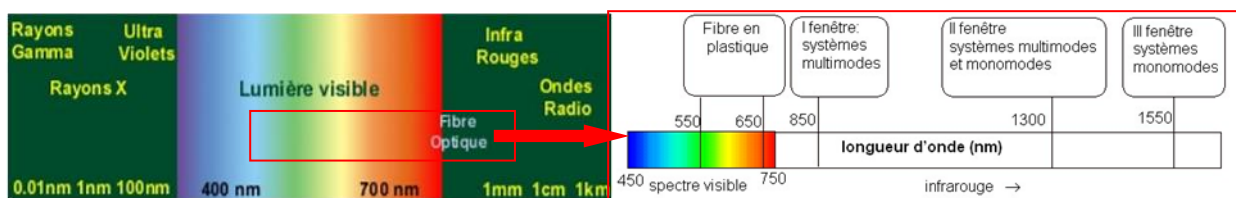


Figure 30 : Spectre de transmission optique des fibres optiques [SPECTRE]

Il est possible d'amplifier le signal lumineux en "dopant" la fibre de verre. Le dopage consiste à ajouter des éléments de terres rares dans le cœur en silice de la fibre. Les terres rares sont les 15 éléments de la classification périodique entre le Lanthane (La) et le Lutécium (Lu) représentant le groupe des lanthanides.

L'amplification du signal se fait par une réaction physique et par un échange d'énergie entre le rayon lumineux et le milieu de propagation, dans notre cas la silice. Dans les fibres dopées, le signal lumineux est généralement doublé.

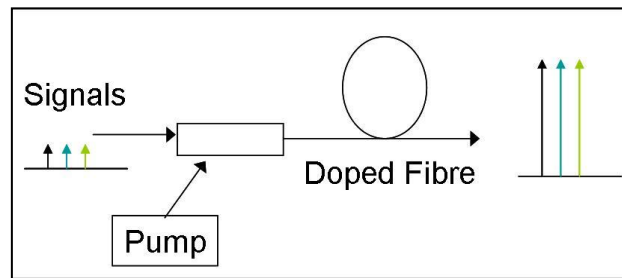


Figure 31 : Influence du dopage des fibres optiques

C. Mécanisme de noircissement des fibres optiques

a. Description

Les fibres optiques possèdent une immunité électromagnétique, c'est-à-dire qu'elle peuvent fonctionner normalement même sous l'effet de contraintes électromagnétiques externes (volontaires ou non, naturelles ou artificielles) comme des décharges électrostatiques, des champs électromagnétiques venant d'autres équipements ou des ondes de foudre.

Cette immunité électromagnétique est cependant altérée par l'exposition à des rayonnements ionisants (par exemple les rayons gamma ou X) et non ionisants (par exemple les rayons UV, visibles ou IR). Lors d'une exposition à ces rayonnements, les fibres en silice développent des pertes optiques (ou atténuations) sur une très large gamme de longueurs d'onde s'étalant de l'ultra-violet (UV) au proche infrarouge (IR) : c'est l'opacification ou noircissement.

Ces pertes sont dues à la formation et/ou à la transformation de certains défauts ponctuels présents dans la silice (par ionisation ou par déplacement atomique) qui engendrent des modifications structurales au sein de la matrice vitreuse (à l'échelle du nanomètre). Toutefois, aucune étude n'a encore permis d'acquérir une vision claire des mécanismes physiques mis en jeu lors de ce processus.

Ce phénomène est aussi appelé noircissement, en référence à la diminution de la transparence du verre qui peut devenir visible à l'œil nu. La figure ci-dessous donne un exemple de ce qu'il est possible de distinguer à l'œil nu pour des préformes (cylindre en silice) de fibres dopées à l'Ytterbium.

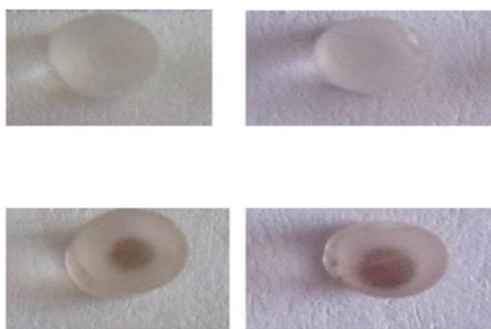


Figure 32 : Cœurs des préformes de fibres optiques dopées avant (en haut) et après (en bas) exposition aux radiations. Un noircissement des cœurs (ou formation de centres colorés) est visible après irradiation [MADY]

On distingue deux types de noircissement :

- Le photo-noircissement (PN) : les centres sont issus de rayonnements non ionisants tels que les UV ou les IR ;
- Le radio-noircissement (RN) : les centres sont issus de rayonnements ionisants ou de flux de particules tels que les Rayons X, les protons ou les rayons gamma.

Le noircissement est un processus réversible. Une méthode permettant de diminuer le noircissement est appelée blanchiment. Il consiste à chauffer la fibre à de forte température comme par exemple 500°C pour obtenir une diminution de 90% de la concentration des défauts.

b. Les facteurs du noircissement

Deux principaux paramètres caractérisent le noircissement :

- La présence de dopage dans la fibre ;

La composition des fibres optiques a une influence importante sur l'altération causée par les radiations. Les fibres ayant un cœur en silice pur sont plus résistantes que celles dopées par des éléments de terres rares.

- La quantité de radiations absorbée.

Plus la fibre optique absorbe de radiation, plus elle noircit.

D'après les travaux de [DUCHEZ], la nature des radiations n'a pas d'influence sur le noircissement. Le radio-noircissement ne dépend pas du type d'irradiation et toutes les comparaisons réalisées entre les sources d'irradiations et même avec le photo-noircissement tendent à montrer que les centres colorés créés lors des irradiations sont de même nature.

c. Les conséquences du noircissement

Le noircissement engendre plusieurs phénomènes :

— L'atténuation du signal induite par irradiation ;

Le principal effet du noircissement est une hausse des pertes optiques linéiques, ce qui signifie que la puissance du signal décroît en fonction de la longueur de la fibre optique noircie.

Cette atténuation de la puissance peut être calculée à partir de la longueur d'onde et de la quantité de radioactivité absorbée avec la formule suivante :

$$RIA(\lambda, D) = \frac{10}{L_0} \log_{10} \left(\frac{I(\lambda, D)}{I(\lambda, 0)} \right) \quad (5)$$

Avec :

Paramètre	Unité	Description
$RIA(\lambda, D)$	[dB/km]	Atténuation induite par irradiation.
λ	[nm]	Longueur d'onde.
D	[Gy]	Dose absorbée.
L_0	[km]	Longueur du segment de fibre illuminé.
$I(\lambda, D)$	[W/m ²]	Intensité lumineuse transmise enregistrée à la dose D .
$I(\lambda, 0)$	[W/m ²]	Intensité lumineuse transmise enregistrée sans radiation.

La dose absorbée D se mesure en Gray (Gy). Cette unité représente la quantité d'énergie absorbée par la matière exposée aux rayonnements ionisants. 1 Gray correspond à une énergie absorbée de 1 joule par kilo de matière.

En pratique, l'atténuation induite par irradiation (RIA, Radiation Induced Attenuation) n'est pas nulle, même s'il n'y a pas de radiation. Les pertes linéiques sont d'environ 3 dB/km à 850 nm et 1 dB/km à 1300 nm pour les fibres multimodes et d'environ 0.5 dB/km à 1300 nm et 0.4 dB/km à 1550 nm pour les fibres monomodes.

— L'émission induite par irradiation (RIE, Radiation Induced Emission) ;

Les impuretés présentes dans la fibre de verre émettent une radio-luminescence ce qui correspond à un signal lumineux parasite.

— La compaction (RIC, Refractive Index Change).

Les radiations modifient l'indice de réfraction de la fibre de verre et modifient la forme du signal lumineux.

Ces trois répercussions engendrent une dégradation du signal propagé dans la fibre optique (l'atténuation étant celle qui provoque le plus d'endommagement), mais elles n'impactent pas la durée de vie des fibres optiques. Le signal lumineux continue d'être diffusé par la fibre de verre, mais celui-ci perd en puissance lorsqu'il passe dans des zones noircies (figure ci-dessous). Plus la zone absorbe de radiations, plus le signal perd en intensité.

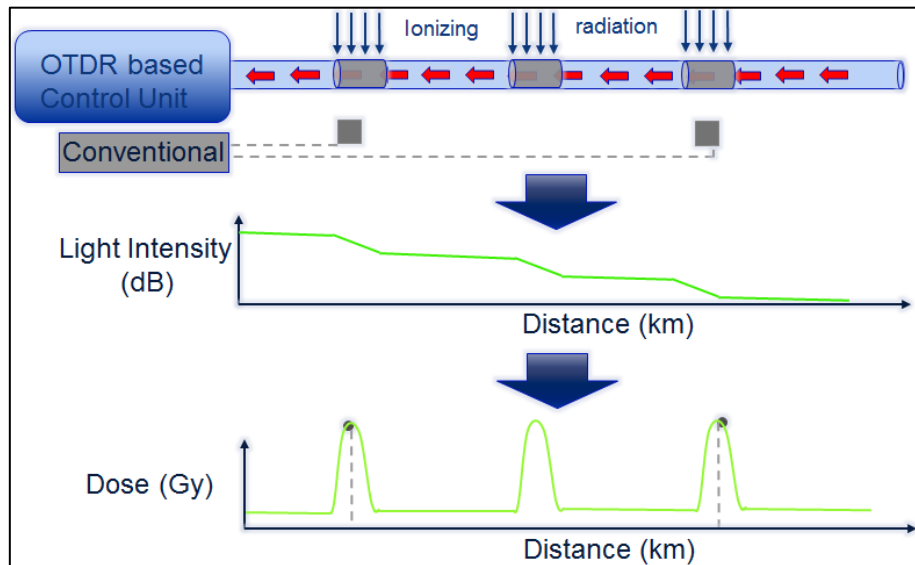


Figure 33 : Effet des radiations sur les fibres optiques et leur signal [TOCCAFONDO]

d. Analyse de l'atténuation induite par irradiations (RIA)

Plusieurs paramètres peuvent avoir une influence sur le RIA. Il est possible de les regrouper en trois grandes catégories :

— Rayonnements (type, énergie, débit de dose, dose cumulée, temps de récupération) ;

Pour tous les rayonnements (ionisants ou non), plus la dose de radiation est élevée, plus l'atténuation est importante et moins la fibre optique est efficace. Le résultat est le même pour des doses exprimées en Gray ou en Gray par heure, en cumulée ou non.

— Optiques (longueur d'onde, puissance optique, type de fibre, dopants) ;

Comme pour le noircissement, l'atténuation est liée à la nature du cœur de silice (dopé ou non) et à la dose de radiation. Mais elle est aussi liée à la longueur d'onde à laquelle le faisceau est diffusé.

optical fiber types	G.651/50/125		G.651/62.5/125		G.652		G.655	
detection wavelength /nm	1310	1550	1310	1550	1310	1550	1310	1550
radiation-induced loss /dB/m/Gy	0.027	0.016	0.037	0.017	0.023	0.015	0.031	0.011

Tableau 1 : Moyenne de pertes induites par irradiation passagère sous de faibles pulsations de rayons gamma pour quatre fibres optiques nues (c.-à-d. à l'état brut). [LIU]

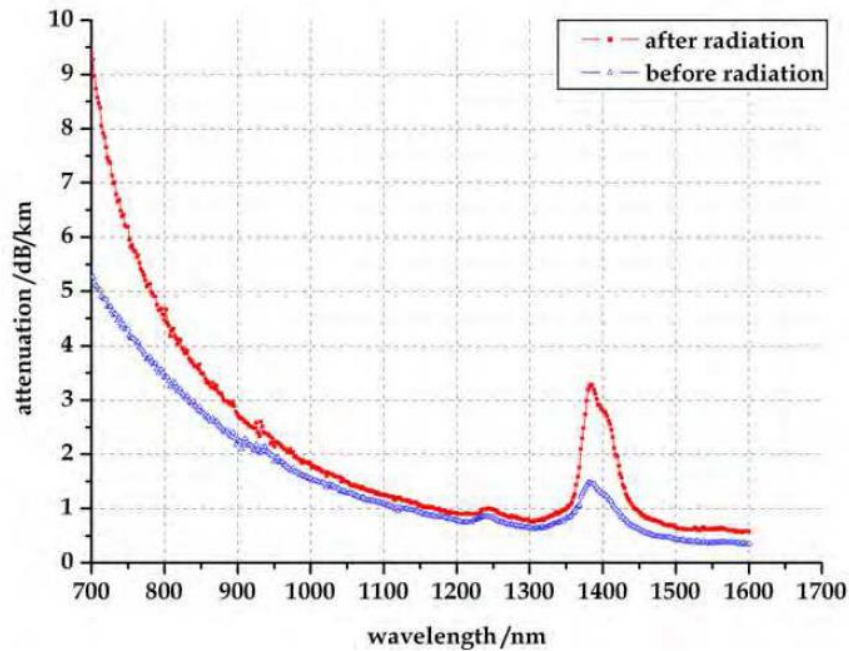


Figure 34 : Comparaison RIA avant et après l'exposition aux rayonnements gamma [LIU]

Au niveau de l'intervalle de diffusion des fibres optiques (850 nm – 1625 nm), l'atténuation est accrue avec les radiations, en particulier pour les petites longueurs d'onde (700 nm – 900 nm) et aux environs de 1400 nm. Or une fibre multimode diffuse vers 850 nm et 1300 nm et une monomode vers 1300 nm et 1550 nm. Pour ces longueurs d'onde, l'atténuation est supérieure lorsqu'il y a irradiation mais elle reste proche de celle de référence.

Les figures ci-dessous illustrent l'évolution du RIA pour des fibres dopées à différentes concentrations en Germanium pour plusieurs niveaux d'exposition aux rayons gamma.

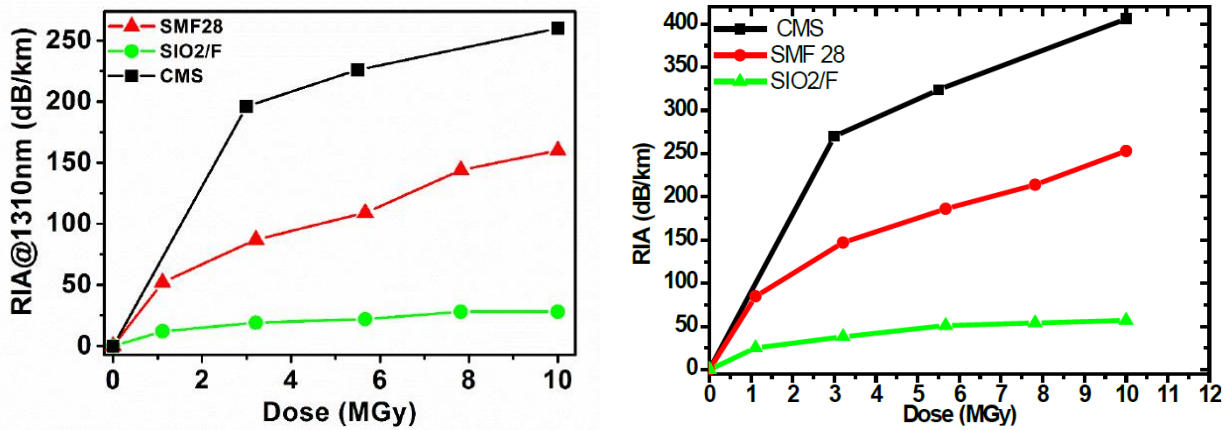


Figure 35 : Evolution des pertes linéiques induites à 1 310 nm (à gauche) et à 1 550 nm (à droite) par les radiations Gamma dans trois fibres différentes en fonction de la dose déposée en MGy. Le choix de ces fibres est lié à la concentration en Germanium que l'on retrouve dans leur cœur : forte concentration (CMS), standard (SMF 28), absence de Ge (SiO₂/F) [PHERON]

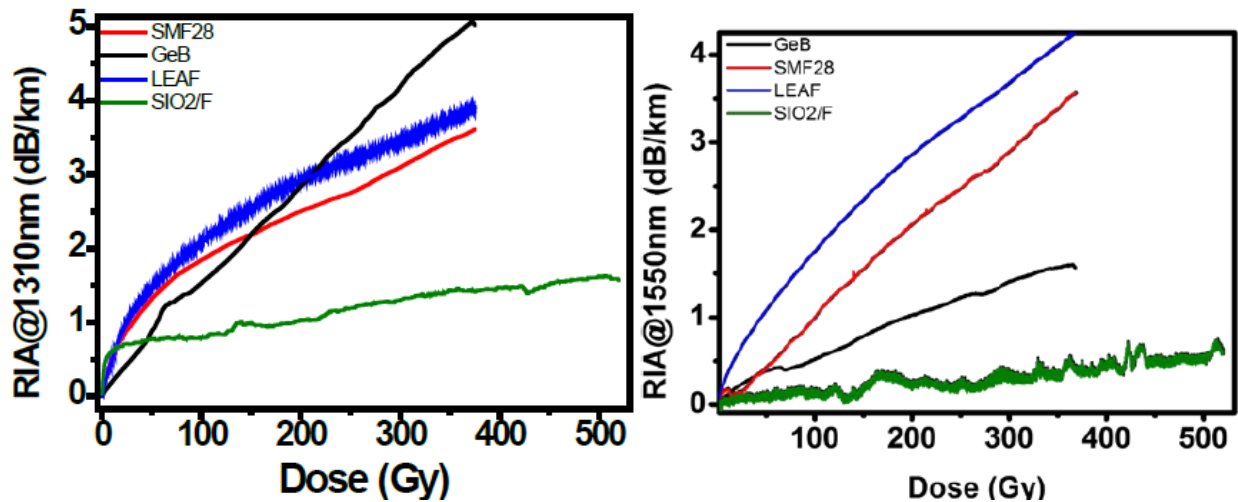


Figure 36 : Evolution des pertes linéiques à 1310 nm (à gauche) et 1550 nm (à droite) des fibres optiques sous irradiation gamma à un débit de dose de 10Gy/h et une dose cumulée d'environ 375 Gy. Les fibres optiques LEAF, SMF28 et GeB correspondent à différentes concentrations en Germanium et SiO₂/F à la silice pure [PHERON]

Quelle que soit la quantité d'irradiation à laquelle les fibres ont été exposées (en cumulée ou non), les fibres dopées restent plus sensibles que les fibres pures. L'influence des rayonnements gamma sur les fibres optiques dépend aussi du dopage et les fibres à cœur de silice pur semblent avoir un comportement différent des fibres dopées.

— Systèmes (température, blindage, courbure).

La température a un effet bénéfique sur l'atténuation induite par irradiation. Plus la température est élevée, plus le phénomène de blanchiment est favorisé, ce qui implique une diminution de l'atténuation. Certains défauts sont corrigés mais pas la totalité [DUCHEZ]. Toutefois, toutes les fibres optiques ne résistent pas à de fortes températures. Les fibres standard fondent après quelques semaines d'exposition. Celles qui résistent le mieux sont celles qui ont un revêtement métallique comme par exemple de l'or [EDF2].

Par ailleurs, lorsqu'une courbure excessive perturbe la transmission de la lumière, l'atténuation augmente, ce qui compromet l'intégrité des données (figure ci-dessous). L'influence de la courbure est d'autant plus importante que la longueur d'onde de diffusion de la fibre optique est élevée. Par exemple, sur la Figure 37, à 1310 nm l'effet de la macro-courbure (courbe rouge) va avoir plus d'impact sur l'atténuation que dans le cas d'une fibre sans courbure (courbe verte), mais cette différence est nettement plus marquée à 1550 nm et à 1625 nm. Pour rappel, ces longueurs d'onde correspondent aux longueurs d'onde de diffusion des fibres monomodes [ISATEL].

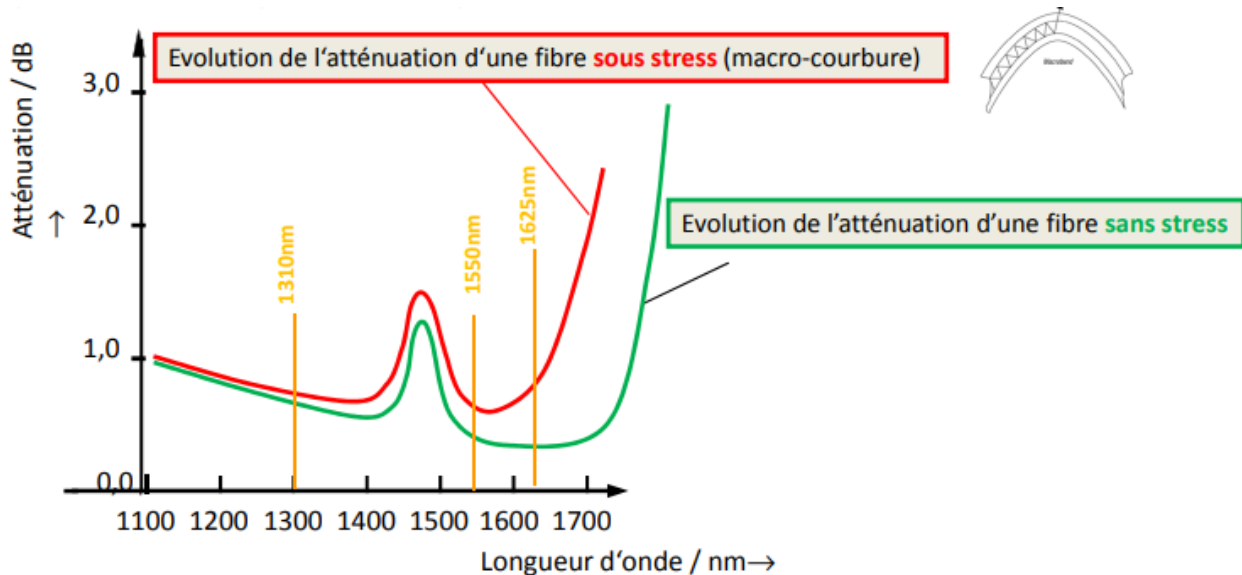


Figure 37 : Evolution de l'atténuation en fonction de la courbure de la fibre et de la longueur d'onde [ISATEL]

e. Phénomène de saturation

Les fibres possèdent un seuil de saturation à partir duquel elles ne se dégradent quasiment plus. Autrement dit, l'atténuation engendrée par les radiations se stabilise. D'un point de vue macroscopique, cela ne signifie pas nécessairement que la portion irradiée soit entièrement noire. Le signal continue à se propager dans la fibre, mais sans subir plus de détérioration qu'il n'a déjà subi.

La saturation dépend de la composition de la fibre. Par exemple, lorsque les doses sont élevées, les fibres en silice pure arrivent à saturation à partir de 3 MGy. Autres exemples, des fibres multimodes dopées au phosphore ayant reçu une dose totale de 60 kGy sont arrivées à saturation vers 20 kGy (expériences réalisées à 830 nm et 1300 nm) et des fibres monomodes dopées au phosphore ayant reçu une dose totale de 55 kGy sont arrivées à saturation vers 30 kGy (expériences réalisées à 1300 nm et 1500 nm).

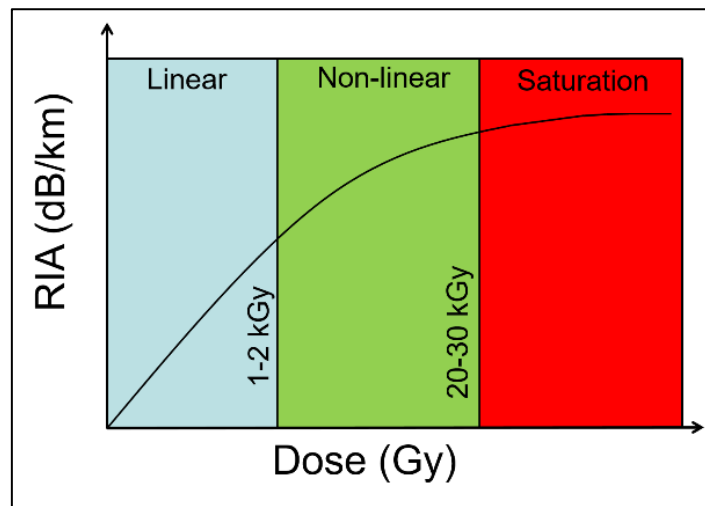


Figure 38 : Evolution et stabilisation des pertes linéiques de fibres optiques P-dopées (c.-à-d. dopées au phosphore) exposées au cobalt 60 (isotope radioactif, source de rayon gamma) [TOCCAFONDO]

f. Conclusion

Si une fibre est opaque sur la totalité de sa longueur, alors le signal reçu peut être très faible mais il existe. Par conséquent, il n'y a aucune influence sur la durée de vie : une fibre optique opaque n'est pas en panne.

Le noircissement a un impact sur la mesure et la qualité des informations relevées par la fibre mais pas sur sa probabilité de panne. Les informations relevées par ce type de fibre risquent d'être moins précises, du fait que le signal est détérioré par les zones noircies de la fibre. Par exemple, avec des fibres optiques dopées au germanium, la portée des mesures possibles est trop réduite après 10 MGy [PHERON].

Néanmoins, il existe des fibres avec lesquelles les erreurs sur la mesure sont dérisoires lorsqu'elles sont irradiées ou à saturation. En effet, d'après les travaux de [PHERON], les fibres dopées au fluor et exposées aux radiations n'ont qu'une erreur sur la mesure de déformation de $20 \mu\text{m}/\text{m}\varepsilon$ maximum à la dose de 10 MGy. Ces fibres présentent une faible sensibilité d'un point de vue des pertes linéiques dues aux radiations jusqu'à des doses cumulées de 10 MGy.

Le phénomène de noircissement est sans impact pour l'Andra.

D. Durée de vie

Les fibres optiques, comme tout capteur, sont sujet à des dysfonctionnements. Nous ne prenons en compte que le dysfonctionnement dit "de panne". Nous listons dans un premier temps les causes de dysfonctionnements puis dans un deuxième temps nous définissons la loi de durée de vie des capteurs, c'est-à-dire la loi de probabilité qu'a un capteur de tomber en panne au bout d'un certain temps.

a. Causes de dysfonctionnements

Les capteurs à fibre optique tombent en panne lorsqu'il y a rupture mécanique de la fibre de verre. Les causes de rupture mécanique de la fibre peuvent être séparées en deux catégories [SUMITOMO] :

- La rupture extrinsèque : elle est causée par des erreurs de manipulation, d'installation et de fabrication ;
- La rupture intrinsèque : elle dépend uniquement de la résistance du matériau en l'absence de défaut.

Le comportement mécanique d'une fibre optique est très différent de celui d'un fil métallique. Les fils métalliques se brisent lorsqu'ils atteignent des déformations de l'ordre de 0,5% et des contraintes de 1 500 MPa en traction. Une fibre optique exempte de microfissure se brise lorsqu'elle atteint des déformations d'environ 10%, ce qui correspond à des contraintes de l'ordre de 5 000 MPa en traction. Une fibre optique comportant des défauts se brise lorsqu'elle atteint des contraintes autour de 1 400 MPa.

La principale différence entre ces matériaux, du point de vue du comportement mécanique, est leur ductilité. La ductilité d'un matériau est sa capacité à se déformer plastiquement (c.-à-d. ne retourne plus à son état initial lorsqu'il n'est plus soumis à une contrainte) sans se rompre.

Le métal, par exemple, présente un comportement ductile ce qui le rend malléable. Il peut se déformer plastiquement sans pour autant se casser. Le verre a un comportement fragile, c'est-à-dire que celui-ci peut se déformer tant que le chargement reste inférieur à sa résistance élastique, sinon il se rompt.

Les microfissures dans le verre fragilisent la structure. Lorsque le verre est sollicité mécaniquement, les zones proches des microfissures subissent des contraintes plus importantes que dans le reste du matériau, ce qui provoque une propagation de la fissure jusqu'à sa rupture. La résistance mécanique des fibres optiques est intimement liée à la présence de défauts dans celles-ci et les calculs de résistance font alors intervenir les concepts de mécanique de la rupture.

Du point de vue de la résistance aux agressions chimiques, si on fait référence au cas particulier d'une fibre enfouie dans le béton, celle-ci est très vulnérable si elle n'est pas bien protégée. Les liaisons Si-O-Si peuvent réagir avec les molécules d'eau selon le mécanisme présenté sur la figure ci-dessous. Les microfissures présentes en surface sur la fibre optique peuvent se propager à cause des réactions avec les molécules d'eau.

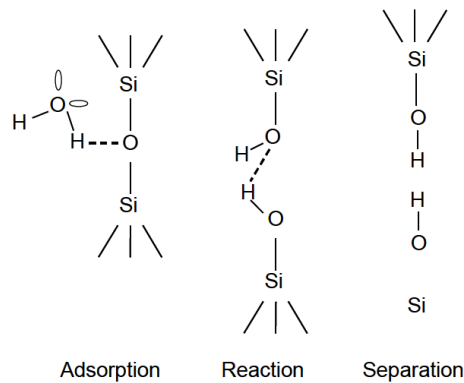


Figure 39 : Modèle d'interaction entre une molécule d'eau et une liaison Si-O-Si

Les causes de ruptures des fibres optiques sont multiples. Une étude a été réalisée sur environ 300 fibres optiques et les principales causes de rupture des fibres optiques sont [SUMI-TOMO] :

- l'installation (57%) ;
- les mauvaises manipulations (7%) ;
- les rongeurs (4%) ;
- les incendies (4%), etc.

b. Loi de durée de vie

Les structures contenant des fibres optiques sont conçues pour avoir une durée de vie de plusieurs décennies. Les modèles permettant de décrire la fiabilité des capteurs à fibre optique se basent sur des études à court terme et à des études de vieillissement accéléré.

Dans le domaine des télécommunications, la principale cause de panne des capteurs à fibre optique est la rupture du câble. Celle-ci est principalement due à des facteurs externes, mais dans certains cas elle est causée par la perte de la résistance de la fibre.

La mécanique de la rupture est l'étude du comportement des fissures dans les matériaux. À partir des caractéristiques des défauts et des propriétés du matériau, il est possible de déterminer la résistance à la rupture de l'élément.

Les modèles de la mécanique de la rupture reposent sur plusieurs hypothèses :

- Le matériau est homogène isotrope, c'est-à-dire que ses propriétés sont constantes dans toutes les directions ;
- Le matériau a un comportement élastique linéaire, c'est-à-dire que celui-ci se déforme linéairement en fonction de la contrainte appliquée. Le matériau retourne à son état initial lorsqu'il n'est plus sollicité mécaniquement ;

— On suppose l'existence d'une fissure initiale dans la structure étudiée et un système de sollicitations extérieures. La fissure initiale est soit une fissure créée par endommagement sous l'effet de cette sollicitation, soit un défaut créé lors de l'élaboration du matériau ou de sa mise en forme. Les défauts présents dans la structure tendent à redistribuer les champs de contraintes internes en provoquant des concentrations de contraintes en pointe de fissure.

- Propriétés mécaniques

Une fibre optique peut être considérée comme un cylindre de verre ayant une très grande longueur avec une distribution donnée de défauts à sa surface. La fissure la plus sévère limite la résistance de la fibre. Par exemple, si une fibre contient 10 fissures bénignes et une grosse fissure, c'est la grosse fissure qui va définir la résistance de la fibre, car c'est elle qui engendre la rupture de la fibre.

La résistance à la rupture du verre varie largement du fait des défauts de surface ou des micro-fissures qui peuvent être inhérentes au verre.

La fragilité du verre est bien connue. C'est une propriété facile à constater, mais plus difficile à définir de manière quantitative. Sous l'action d'une contrainte de traction, le verre se déforme élastiquement jusqu'à la rupture. La fracture s'initie dans une direction approximativement perpendiculaire à la direction de contrainte maximale. La rupture survient brutalement sans qu'aucune déformation plastique ne soit décelée. Pour de faibles contraintes appliquées, la loi de Hooke est vérifiée :

$$\sigma = E_0 \cdot \varepsilon = E_0 \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad (6)$$

Où E_0 représente le module d'Young de la silice (~ 73 GPa), σ la contrainte, ε l'allongement relatif de l'échantillon ou déformation, l la longueur de l'échantillon et Δl l'allongement de l'échantillon.

Pour le verre (SiO_2) et en l'absence de défauts, la résistance théorique, c'est-à-dire la valeur maximale qui peut être appliquée avant de passer du domaine de comportement élastique à plastique, est estimée à environ 20 GPa. Mais, expérimentalement, une valeur aussi élevée n'a jamais été observée. En effet, aujourd'hui, les fibres standard présentent une résistance mécanique de l'ordre de 5 à 6 GPa dans des conditions normales d'utilisation.

Les fissures agissent comme un amplificateur de contrainte et causent la rupture du verre. Il existe une équation reliant le facteur d'intensité de contrainte K_I et la contrainte appliquée σ à la longueur de la fibre.

$$K_I = \sigma \cdot Y \cdot \sqrt{a} \quad (7)$$

Dans cette équation, Y est le paramètre de forme géométrique de la fissure qui est constante pour une géométrie de défaut donnée, σ est la contrainte appliquée et a la profondeur de la fissure.

L'équation ci-dessus décrit la contrainte maximale qu'un matériau fragile peut supporter. Si le coefficient K_I dépasse un seuil critique K_{IC} , cela signifie que le chargement appliqué entraîne une rupture du matériau.

Par exemple, dans le cas d'une fissure elliptique soumise à une contrainte de traction, on a $Y=1,24$. C'est cette valeur d' Y qui est généralement utilisée pour les fibres optiques. Lorsque K_I excède l'effort critique du matériau K_{IC} , une fissure peut se propager rapidement, ce qui conduit à la rupture. Pour la silice, le facteur critique K_{IC} est considéré comme constant et prend une valeur de $K_{IC}=0,789 \text{ MPa.m}^{1/2}$.

- Probabilité de rupture

Pour expliquer la rupture des matériaux fragiles, comme le verre et en particulier les fibres optiques, on utilise en général la théorie du maillon le plus faible : la fibre est considérée comme la juxtaposition d'éléments parfaitement indépendants du point de vue de la rupture et c'est l'élément le plus faible qui entraîne la rupture du solide tout entier.

Ainsi, la probabilité de rupture d'une fibre de longueur L soumise à une contrainte σ s'écrit :

$$F(\sigma, L) = 1 - \exp(-LN(\sigma)) \quad (8)$$

La loi statistique qui semble la plus adaptée à l'étude de la résistance mécanique des fibres optiques est dite de Weibull, à savoir lorsque le nombre cumulatif de défauts $N(\sigma)$ est de la forme :

$$N(\sigma) = \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m \quad (9)$$

Généralement, on pose $\sigma_u = 0$, car la loi de Weibull sous cette forme constitue pour les fibres optiques un excellent modèle pour la distribution des résistances. Ainsi la probabilité de rupture $F(\sigma, L)$ d'une fibre de longueur L peut s'écrire :

$$F(\sigma, L) = 1 - \exp\left(-L \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m\right) \quad (10)$$

En écrivant l'équation ci-dessus sous forme logarithmique, on obtient l'expression suivante :

$$\ln\left(\frac{1}{L}\left[\ln\left(\frac{1}{1-F}\right)\right]\right) = m(\ln\sigma - \ln\sigma_0) \quad (11)$$

La représentation graphique de l'équation logarithmique est appelée diagramme de Weibull. Ce diagramme permet de déterminer les paramètres m et σ_0 , qui correspondent respectivement à la pente de la courbe et à l'intersection de la courbe avec l'axe des contraintes.

Le paramètre m caractérise la dispersion de la taille des défauts. Une valeur élevée du paramètre m indique que les défauts le long de la fibre ont une taille relativement similaire. Une faible valeur de m révèle que les défauts présents à la surface de la fibre ont des dimensions très diverses et donc entraînent la rupture pour des valeurs de contraintes très différentes.

Quant au paramètre σ_0 , il représente la contrainte pour laquelle la probabilité cumulée de rupture F de la fibre est égale à 63%.

- Données utilisées

Dans le document [HAL], plusieurs essais de traction uniaxiaux ont été réalisés sur des fibres optiques.

Lors de ces tests, la longueur de fibre testée est d'environ 30 mm. La fibre est étirée à une vitesse constante de 0,02 mm/s jusqu'à la rupture. Le niveau de force pour lequel la fibre casse est enregistré. Pour un minimum de 20 ruptures, la distribution de la résistance des fibres est représentée selon la statistique de Weibull.

Pour observer le comportement mécanique des différentes fibres ainsi que l'influence du revêtement, cinq types de fibres ont été testés, permettant de déterminer leur résistance mécanique. Cela permet également d'évaluer si une fibre optique de 250 μm de diamètre a les mêmes caractéristiques qu'une fibre de 140 μm . Le tableau ci-dessous récapitule les caractéristiques morphologiques des cinq fibres testées.

Fibre optique (désignation commerciale)	Nature de la fibre	Diamètre cœur [μm]	Diamètre gaine [μm]	Diamètre revêtement [μm]	Nature du revêtement
SMF28e	Monomode	8	125	250	Acrylate
SMT-A1310H	Monomode	5.8	125	155	Polyimide
TCG-MA100H	Multimode	100	11	140	Polyimide
TCG-MA200H	Multimode	200	220	250	Polyimide
HCP-M0125T	Multimode	125	140	250	ETFE

Tableau 2 : Tableau récapitulatif des morphologies des différentes fibres optiques testées

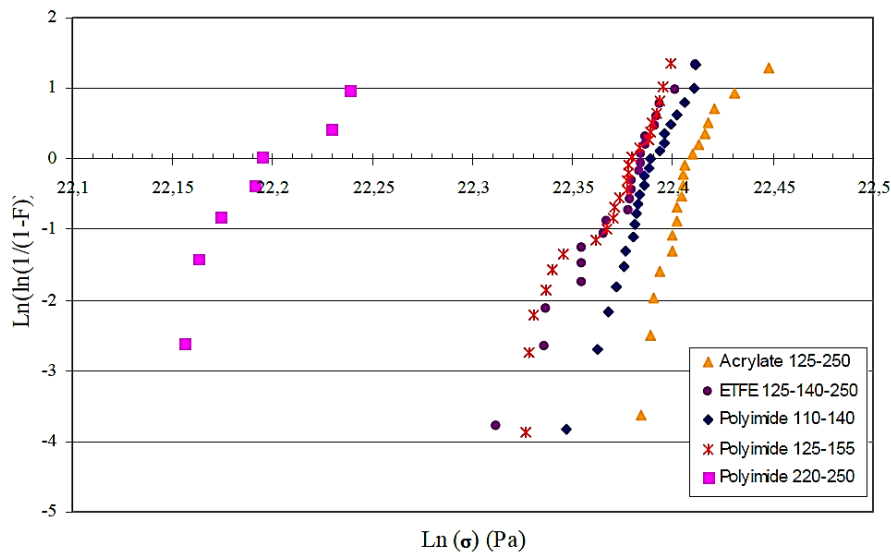


Figure 40 : Courbes de probabilité de rupture obtenues pour différentes fibres

Les coefficients du modèle sont déterminés en linéarisant les courbes de la figure ci-dessus. Le module de Weibull m est compris entre 50 et 70, ce qui est plus élevé que pour des fibres de verre où m vaut 30. L'étude l'explique par les incertitudes sur les diamètres.

Fibre optique	Nature du revêtement (diamètre silice)	Probabilité de rupture à 63% (GPa) ou σ_0	Module de Weibull m
SMF28e	Acrylate (125 μm)	5,4	73,89
SMT-A1310H	Polyimide (125 μm)	5,2	52,62
TCG-MA100H	Polyimide (110 μm)	5,3	79,84
TCG-MA200H	Polyimide (220 μm)	4,4	35,36
HCP-M0125T	ETFE (125 μm)	5,25	52,07

Tableau 3 : Caractéristiques mécaniques de différentes fibres optiques

- Choix conseillé

Le phénomène de noircissement engendre une dégradation de la mesure, mais il n'intervient pas dans la durée de survie des fibres optiques, ni dans la détermination de la loi de probabilité de pannes.

La SCM ne recommande pas l'utilisation de lois paramétriques, mais, à défaut d'un retour d'expérience suffisant, nous conseillons d'utiliser, pour les pannes des fibres optiques, une loi de Weibull du type suivant :

$$F(\sigma, L) = 1 - \exp\left(-L\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right) \quad (12)$$

Avec $\sigma_0 = 4,4 \text{ GPa}$, $m = 35,36$. La longueur L dépend du domaine de détection de la fibre que nous utiliserons lors de la simulation.

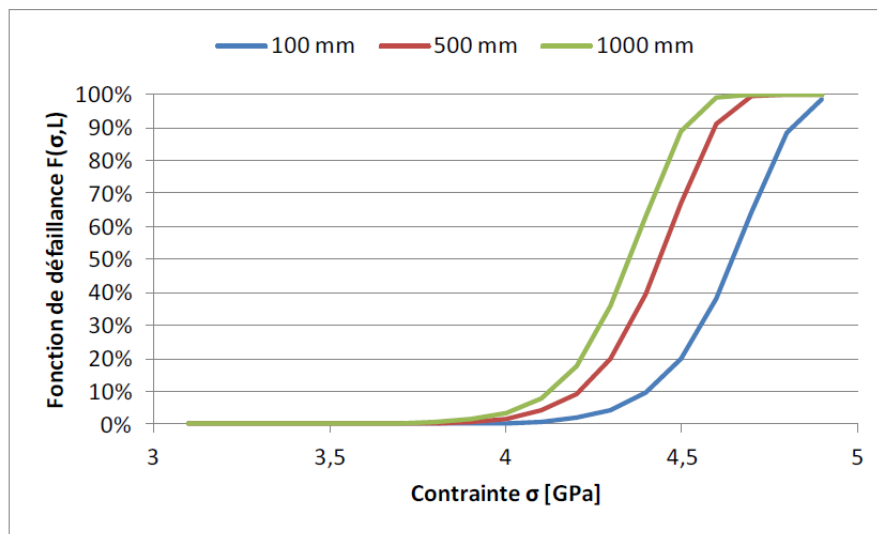


Figure 41: Probabilité de défaillance pour la fibre optique en fonction de la contrainte appliquée et la longueur de la fibre

Afin d'utiliser cette loi de probabilité, il faut dans un premier temps estimer la contrainte appliquée à la fibre par le béton. Cette contrainte peut être déterminée à partir de simulations ou de retours d'expérience. Dans un deuxième temps, il faut en déduire la probabilité de rupture de la fibre pour le domaine de détection étudié.

La contrainte dans l'ouvrage en béton évolue :

— Dans le temps ;

Il faut pouvoir estimer la contrainte appliquée à la fibre à tout moment lors de la durée d'exploitation de l'ouvrage. Il est possible de se reporter à un simulateur de calcul par éléments finis afin d'identifier les contraintes qui seront appliquées à la fibre. Ce simulateur doit prendre en compte l'effet du fluage (phénomène qui a lieu lorsqu'on applique un chargement constant dans le temps à une structure. Celle-ci se déforme continuellement au cours du temps).

Le fait d'augmenter la contrainte augmentera la probabilité de rupture de la fibre optique et donc la probabilité de panne du capteur.

— Dans l'espace ;

Selon le positionnement du capteur, les contraintes appliquées sur la fibre seront différentes. La probabilité de panne du capteur dépend également de sa position. Une fibre optique positionnée dans une zone de forte contrainte aura une forte probabilité de tomber en panne.

Le modèle de rupture ne permet pas de prendre en compte le taux de dysfonctionnement à la mise en service de la fibre. Le modèle permet uniquement de prendre en cause les ruptures intrinsèques de la fibre.

Nous devons ajouter à cette loi une probabilité de panne à la mise en service. Nous utilisons une probabilité de panne à la mise en service de 37% [EDF].

E. Cas particulier d'utilisation : surveillance de réacteurs

On s'intéresse aux réacteurs à eau pressurisée (REP) qui équipent les centres nucléaires de production d'électricité (CNPE) exploités par EDF et au réacteur pressurisé européen EPR (*European Pressurized Reactor*).

Les REP sont des réacteurs de 2^{ème} génération et les EPR de 3^{ème} génération (GEN 3) selon la classification internationale. La plupart des réacteurs de 2^{ème} génération sont actuellement en service et ceux de 3^{ème} génération sont en cours de construction. Les GEN 3 sont conçus à partir de 1990 et sont dérivés des précédents réacteurs afin de les remplacer à partir de 2013/2020. Ils intègrent généralement des systèmes de récupération du corium en cas de fonte du cœur ainsi que des redondances accrues pour les systèmes de sécurité interne et externe. Le corium est un magma métallique et minéral constitué d'éléments fondus du cœur d'un réacteur nucléaire, puis des minéraux qu'il peut absorber lors de son trajet [REACTEUR].

La surveillance de ces réacteurs passe par la cartographie de la température de la tuyauterie des circuits primaires lorsqu'ils sont en fonctionnement [EDF2]. Afin d'améliorer la sécurité des réacteurs, l'influence des rayonnements sur les capteurs lors d'accidents sévères est aussi testée [IRSN].

a. Surveillance lors d'opérations usuelles

Pour cette partie, ce sont les réacteurs à eau pressurisée (REP) exploités par EDF qui sont surveillés [EDF2].

La figure ci-dessous représente le principe de fonctionnement d'une centrale REP qui peut se décomposer en trois cycles :

- Le cœur dans lequel se produit la réaction du combustible nucléaire ;
- Le circuit primaire qui transporte l'énergie produite dans le cœur sous forme de chaleur grâce à l'eau pressurisée. La température moyenne de l'eau dans le cœur en fonctionnement étant de 310°C, l'eau est maintenue sous pression pour éviter l'ébullition ;
- Le circuit secondaire qui transporte de la vapeur créée par conduction de chaleur depuis le circuit primaire afin d'entraîner des turbines qui produisent de l'électricité.

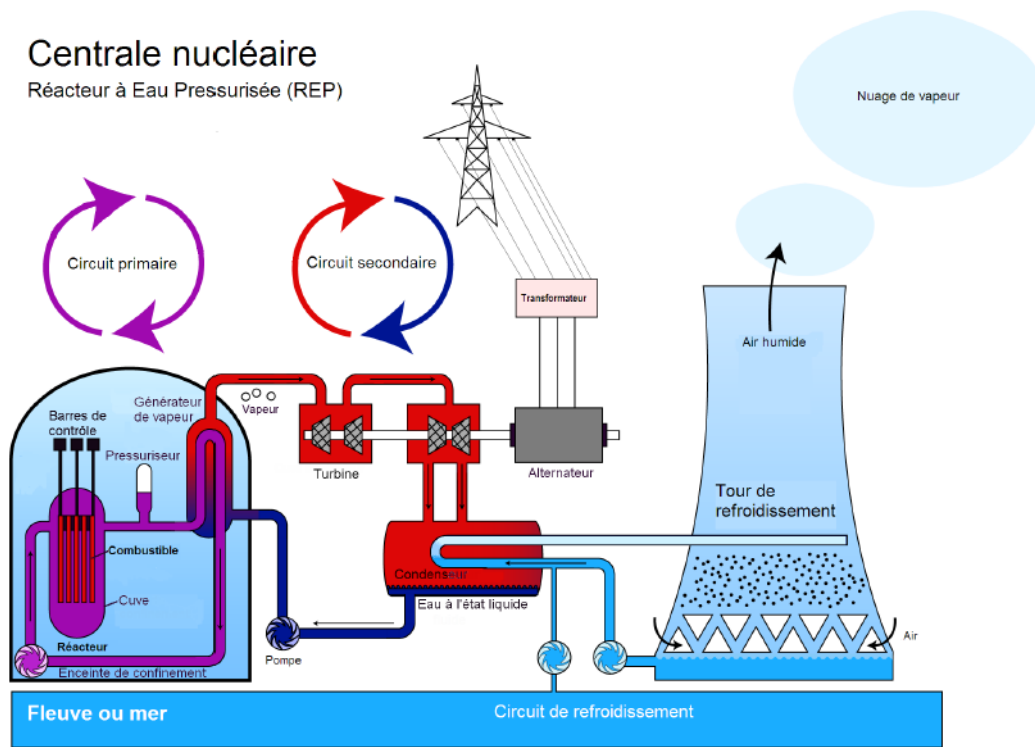


Figure 42 : Schéma de fonctionnement d'une centrale nucléaire avec REP [REACTEUR]

L'eau circulant sous pression peut atteindre 350°C et contient des nucléides naturels qui sont source de rayonnement gamma. Il existe une grande variété de capteurs (tous les types de thermomètre, la thermistance, le thermocouple, le pyromètre, etc.) pour la mesure de température, mais ces conditions d'exploitation restreignent le choix des capteurs envisageables et les solutions de mesures usuelles sont difficiles à mettre en œuvre. La nécessité d'un grand nombre de capteurs pour avoir suffisamment de relevés et de données à analyser est aussi une contrainte non négligeable pour ce genre d'ouvrage. Ainsi, pour une telle surveillance, il est préférable d'utiliser des fibres optiques qui sont capables de mesurer sur plusieurs kilomètres et qui possèdent une immunité électromagnétique.

L'utilisation de fibres optiques pour la mesure de température se fait en analysant le signal de rétrodiffusion de Raman. Ce signal est différent de celui présenté dans les parties précédentes pour la mesure des déformations (signal de Brillouin).

Toutes les fibres ne sont pas adaptées pour une utilisation à haute température. Seules celles ayant un revêtement métallique tel que l'or sont capables de résister à de telles températures pendant plusieurs mois. Les revêtements habituels fondent après quelques semaines d'exposition, comme par exemple ceux en polyimide ou en acrylate (revêtement d'une fibre télécoms standard SMF-28). Lorsque le revêtement fond, la fibre est toujours opérationnelle mais elle est plus fragile et plus vulnérable aux rayonnements.

Les fibres avec revêtement en or sont sensibles au noircissement à température ambiante. Ainsi, l'atténuation du signal est assez importante pour de faibles valeurs de rayonnement à des températures ambiantes. Cependant ces fibres sont capables de résister à de très hautes températures. Lorsqu'elles sont utilisées à de fortes températures, elles subissent un effet de blanchiment. Le blanchiment permet de compenser le noircissement induit par les rayonnements, ce qui permet d'augmenter l'intensité du signal transféré dans la fibre.

L'atténuation radio-induite (RIA) est minimale entre 300°C et 700°C ; ce type de fibre est idéal pour des mesures à environ 350°C. Or elles résistent très mal aux radiations estimées pour le site lorsqu'elles sont à température ambiante. C'est pourquoi une gaine FIMT (Fiber In Metal Tube) est ajoutée. La gaine FIMT est indispensable, car elle assure une excellente protection mécanique et elle agit aussi comme un blindage contre les rayonnements à température ambiante.



Figure 43 : Fibre à revêtement or partiellement dénudée (gauche), avec revêtement (milieu) et insérée dans la protection FIMT et connectisée (droite) [EDF2]

La radiation n'est pas homogène le long de la fibre optique et de fortes variations locales d'atténuation le long des fibres sont dues à la variation de contrainte induite par le revêtement métallique soumis à des grandes dynamiques de température.

L'atténuation radio-induite étant la conséquence la plus importante du noircissement et étant celle qui a le plus d'impact sur la mesure, ces fortes variations sont corrigées par calibrage. De plus, les différents débits de dose n'ont pas d'influence significative sur la variation du RIA. L'impact de la dose cumulée reste inconnu à hautes températures car le phénomène de blanchiment est trop important pour pouvoir détecter d'éventuelles variations d'atténuation.

La combinaison revêtement en or et gaine FIMT constitue un bon capteur pour les mesures de température dans le circuit primaire. D'autant plus si on ajoute du dopage au fluor. Lors d'exposition à des variations de température et de rayonnement durant un an, les fibres n'ont pas subi de noircissement trop important, empêchant la prise de mesure de température.

b. Surveillance lors d'accidents graves

Pour cette partie, ce sont les réacteurs pressurisés européens (EPR) qui sont testés. L'impact du flux de rayons gamma sur les capteurs est pris en compte ainsi que le calcul des doses engendrées lors de tels accidents pour une étude de faisabilité d'instrumentation par capteurs [IRSN].



Figure 44 : Modèle d'un EPR [REACTEUR]

La radiation est mesurée dans la fosse du réacteur à différentes profondeurs. La fosse d'un EPR est constituée d'une couche de béton sacrificiel (en vert sur la Figure 45 et la Figure 46) et d'une couche de matière réfractaire (en violet sur la Figure 45 et la Figure 46) afin de récupérer le corium issu de la fusion accidentelle du réacteur nucléaire pour qu'il ne s'enfonce pas dans le sol. Comme le montre la figure ci-dessous, la fosse du réacteur est divisée en trois anneaux.

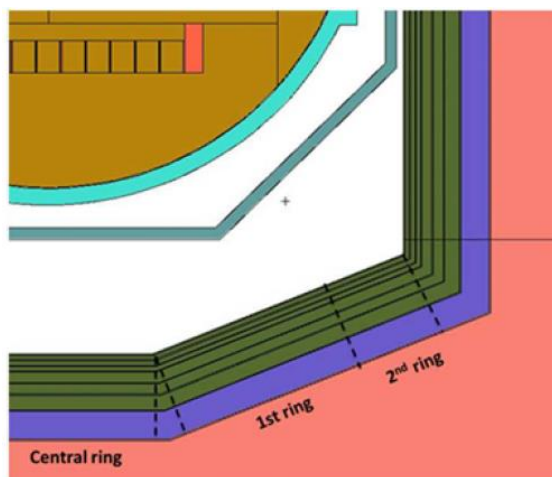


Figure 45 : Segmentation de la fosse du réacteur par anneaux : anneau central, 1^{er} anneau et 2nd anneau [IRSN]

La figure ci-dessous représente la quantité de radiation détectée dans la silice des capteurs à fibre optique selon leur position dans la fosse après une exposition de 24h au corium suite à un accident grave et après 60 ans de fonctionnement ordinaire. Quel que soit l'anneau où se situe le capteur, la quantité de radiation est la même en cas d'accident sévère. Les quantités sont moins élevées en profondeur (c.-à-d. dans le béton, en rose/rouge sur la Figure 45 et la Figure 46) que proche du centre de la fosse (c.-à-d. dans le béton sacrificié) car c'est à ce niveau que la majorité du corium est absorbé lorsqu'il y a un accident.

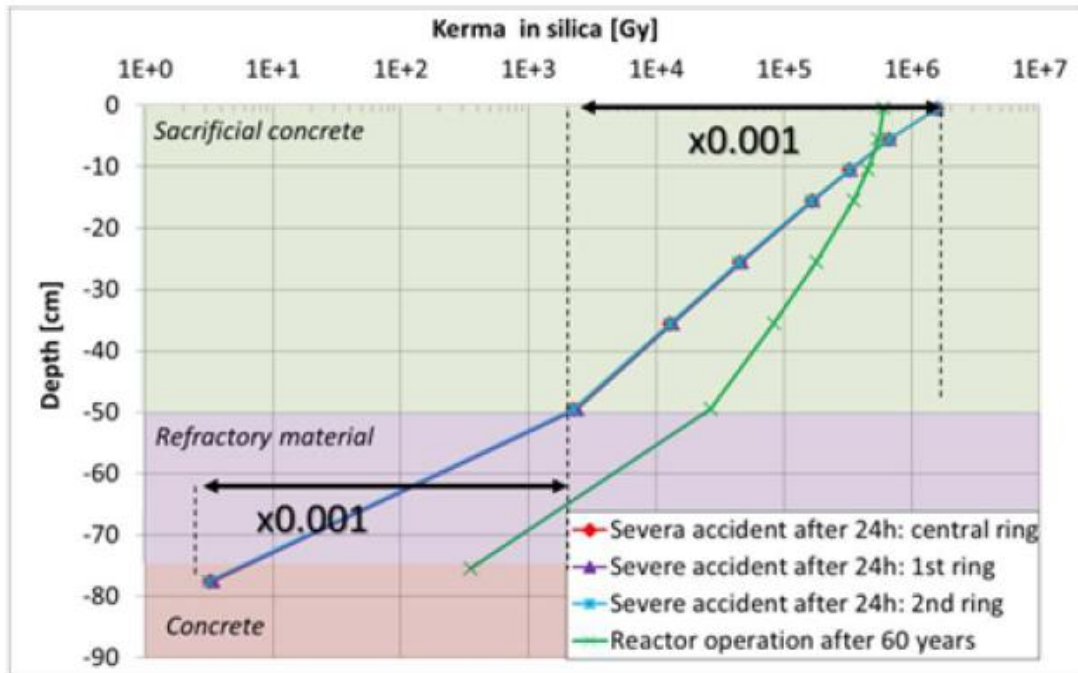
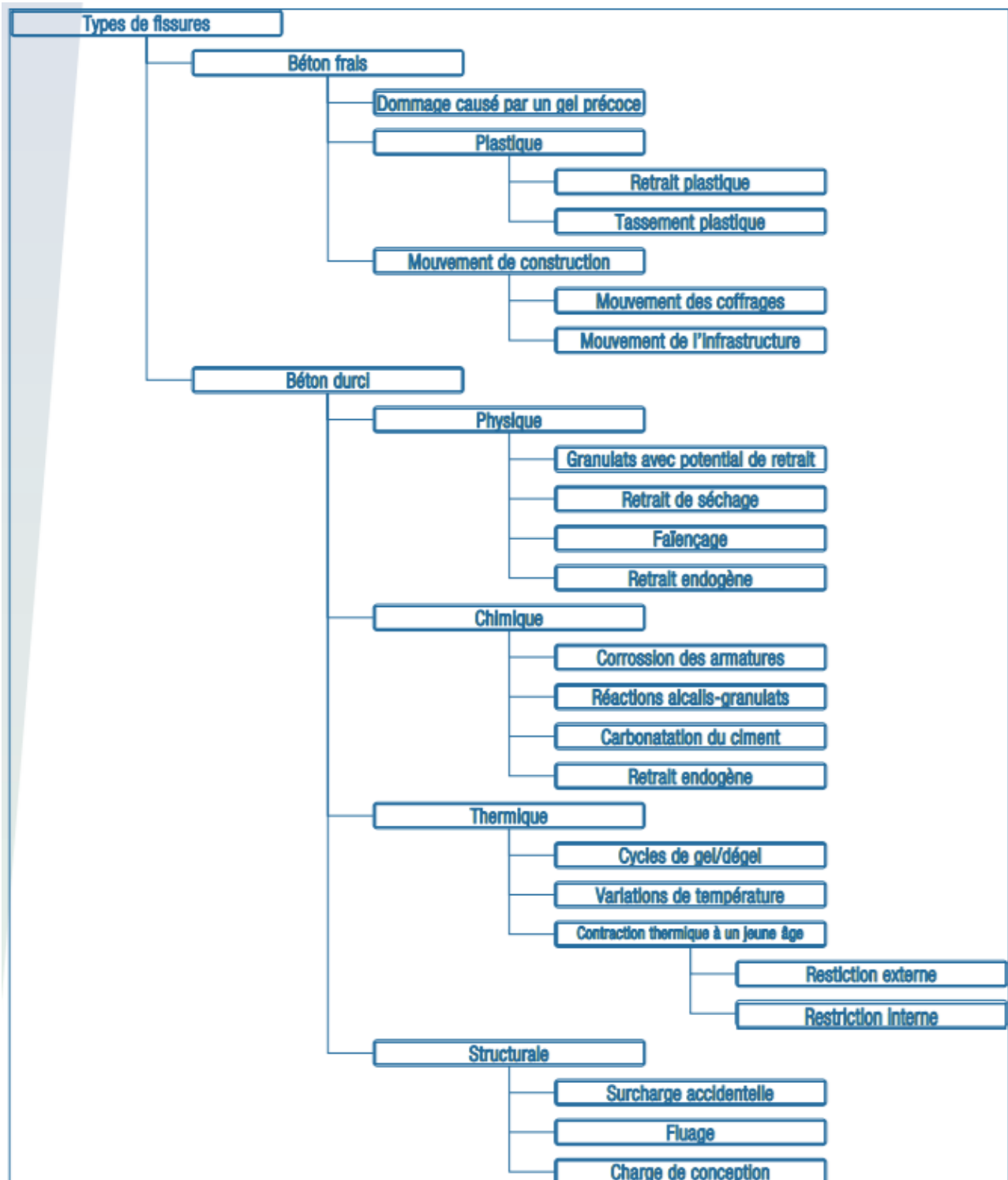


Figure 46 : Quantité de radiation dans la silice après 24h d'exposition au corium (temps d'exposition considéré pour la situation d'accident sévère) et après 60 ans de fonctionnement normal selon l'anneau et la profondeur [IRSN]

La courbe représentant l'activité normale du réacteur est toujours supérieure à celles des anneaux qui ont subi un accident sauf sur les 5 premiers centimètres. Cette inversion de la tendance est due au fait qu'à cette distance la chaleur dégagée par le corium influe sur les capteurs qui sont normalement résistants aux hautes températures. En effet, lorsque les capteurs résistent à de hautes températures, le phénomène de blanchiment se met en place, ce qui explique une baisse de la quantité de radiations dans la silice des capteurs dans le cas d'une activité ordinaire, contrairement au cas d'accident sévère. Ainsi, les capteurs à fibres optiques sont plus endommagés par les radiations pendant les opérations usuelles des réacteurs que lors d'accidents graves [IRSN].

Annexe 1 – Les origines de fissurations

Le tableau suivant décrit les différentes causes de fissurations [Technobéton]. Les fissures apparaissent soit avant soit après le durcissement du béton.



Annexe 2 – Notion de durée de survie

Le terme de durée de survie désigne le temps écoulé jusqu'à la survenue d'une panne d'un capteur. L'analyse des durées de survie est l'étude du délai de la survenue de cette panne des capteurs.

A. Définitions

Nous représentons la durée de survie X par une variable aléatoire positive ou nulle, et absolument continue. Sa loi de probabilité peut être définie par l'une des cinq fonctions équivalentes suivantes (chacune des fonctions ci-dessous peut être obtenue à partir de l'une des autres fonctions) :

— La fonction de survie S ;

La fonction de survie (ou fonction de fiabilité) est, pour t fixé, la probabilité de survie jusqu'à l'instant t , c'est-à-dire :

$$S(t) = P(X > t), \quad t \geq 0 \quad (13)$$

Par exemple, la probabilité qu'a un capteur d'être opérationnel dans 10 ans.

— La fonction de défaillance F ;

La fonction de défaillance (fonction de répartition) représente, pour t fixé, la probabilité de tomber en panne avant l'instant t , c'est-à-dire :

$$F(t) = P(X \leq t) = 1 - S(t) \quad (14)$$

Par exemple, la probabilité qu'a un capteur de tomber en panne au cours des 10 premières années.

— La densité de probabilité f ;

Pour t fixé, la densité de probabilité représente la probabilité de tomber en panne dans un intervalle de temps après un instant t , c'est-à-dire :

$$f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{P(t \leq X < t+h)}{h} = F'(t) = -S'(t) \quad (15)$$

Par exemple, la probabilité de tomber en panne entre le 50^e jour et le 60^e jour.

— Le risque instantané λ ;

Pour t fixé, le risque instantané (ou taux de défaillance instantané) caractérise la probabilité de tomber en panne dans un petit intervalle de temps après t , sachant que le capteur a survécu jusqu'au temps t .

$$\lambda(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{P(t \leq X < t+h | X \geq t)}{h} = \frac{1}{S(t)} \left[-\frac{dS(t)}{dt} \right] = \frac{f(t)}{S(t)} \quad (16)$$

Par exemple, la probabilité de tomber en panne dans les 5 prochaines années, sachant que le capteur est opérationnel depuis 5 ans.

Des définitions plus précises sont disponibles dans [MPPR2] et [NMP].

B. Loix utilisées dans le génie civil

Pour l'étude des capteurs, nous utilisons un modèle paramétrique afin d'estimer la fonction de survie des capteurs. Nous supposons que la distribution des durées de survie appartient à une famille de lois paramétriques donnée. Ainsi, le modèle paramétrique peut être formulé en précisant la forme de l'une ou l'autre des fonctions équivalentes qui définissent la loi de la durée de survie : λ , f , S ou F .

On retrouve dans la littérature généralement trois modèles pour décrire la fiabilité des capteurs en génie civil : la loi exponentielle, la loi de Weibull et la loi de Weibull généralisée.

— Loi exponentielle

La loi exponentielle est la loi la plus simple à utiliser, car elle ne dépend que d'un seul paramètre θ . Avec cette loi, le risque instantané λ est considéré comme constant dans le temps. Cette loi est aussi dite "sans mémoire", car la probabilité de tomber en panne dans un certain laps de temps est la même, quelle que soit la durée de vie du capteur.

$$\begin{cases} \lambda(t|\theta) = \theta \\ S(t|\theta) = e^{-\theta t} \end{cases} \quad (17)$$

— Loi de Weibull

Avec cette loi, le risque instantané λ est considéré comme monotone dans le temps.

$$\begin{cases} \lambda(t|\theta, \nu) = \nu \left(\frac{1}{\theta}\right)^\nu t^{\nu-1} \\ S(t|\theta, \nu) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\nu\right) \end{cases} \text{ Avec } \theta, \nu > 0 \quad (18)$$

Pour $\nu=1$, on retrouve la loi exponentielle ci-dessus. Pour $0 < \nu < 1$, le risque instantané λ est monotone décroissant. Pour $1 < \nu$ le risque instantané est monotone croissant.

— Loi de Weibull généralisée

La loi de Weibull généralisée considère que le risque instantané λ suit une courbe en forme de U (courbe dite "en baignoire", figure ci-dessous), qui peut être subdivisée en trois parties :

- La première partie correspond à la zone de "mortalité infantile". La rupture mécanique, les mauvaises manipulations et les défauts de fabrication sont à l'origine des pannes. Le risque instantané décroît rapidement dans cette partie ;
- La deuxième partie correspond à une zone de "durée de vie utile". Le risque instantané est constant dans le temps. La rupture peut avoir lieu à cause d'un accident externe, comme le gel du câble ou sa manipulation en cours d'utilisation [CORNING] ;
- La troisième partie représente le vieillissement et/ou la fatigue du matériau. Le risque instantané augmente rapidement dans cette partie.

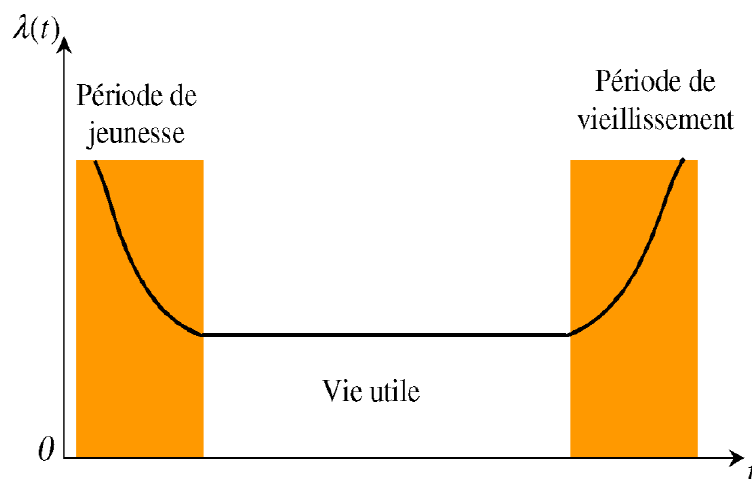


Figure 47 : Forme du risque instantané pour une loi de Weibull généralisée [FMD]

La loi de Weibull généralisée est généralement utilisée pour décrire le comportement des capteurs en génie civil. Le risque instantané et la fonction de survie sont les suivantes :

$$\begin{cases} \lambda(t|\theta, \nu, \gamma) = \left(1 + \left(\frac{t}{\theta}\right)^\nu\right)^{\frac{1}{\gamma}-1} \frac{\nu}{\gamma\theta^\nu} t^{\nu-1} \\ S(t|\theta, \nu, \gamma) = \exp\left[1 - \left(1 + \left(\frac{t}{\theta}\right)^\nu\right)^{\frac{1}{\gamma}}\right] \end{cases}, t \geq 0 \text{ et } \theta, \nu, \gamma > 0 \quad (19)$$

Pour $\gamma = 1$, on retrouve la loi de Weibull citée ci-dessus. Pour $\gamma = 1$ et $\nu = 1$, on retrouve la loi exponentielle.

Références

[NMP] Bernard Beauzamy : Nouvelles Méthodes Probabilistes pour l'évaluation des risques. SCM SA, ISBN 978-2-9521458-4-8. ISSN 1767-1175, broché, 272 pages. Avril 2010.

[MPPR2] Bernard Beauzamy : Méthodes Probabilistes pour l'étude des phénomènes réels. SCM SA, ISBN 2-9521458-0-6. ISSN 1767-1175, broché, 369 pages. Mars 2004. Seconde Edition, juin 2016.

[CORNING] Dr. G. Scott Glaesemann (2017) *Optical Fiber Mechanical Reliability: Review of Research at Corning's Optical Fiber Strength Laboratory*. 62 p.

[FMD] Pr. A. Bellaouard, M.A. S. Beleulmi (2013) *Fiabilité maintenance disponibilité*. 106 p.

[MEI] Bingqing MEI (2016) *Optimisation des couplages magnéto-mécaniques d'extensomètres à corde vibrante pour le suivi du vieillissement de constructions stratégiques*. Thèse de doctorat : Science Mécaniques, Acoustique, Electronique et Robotique de Paris : Université Pierre et Marie Curie. 156 p.

[ROSIN] N. Rosin-corre, C. Noret (2012) *L'auscultation par capteurs à corde vibrante, 80 ans de retour d'expérience*. 15 p.

[IMG] IMG (2015) *Surveiller, diagnostiquer & renforcer les structures précontraintes*. 18 p.

[ALONSO] E. E. Alonso, A. LEDESMA (2003) *Advances in Understanding Engineered Clay Barriers*. ISBN 0415365449.

[BORDES] J. L. Bordes, P. J. Debreuille. *Some Facts About Long-Term Reliability of Vibrating Wire Instruments*. 8 p.

[HAL] Benoît Delobelle, Frédéric Thiébaud, David Chapelle, Dominique Perreux, Vincent Placet, et al.. Insertion d'une fibre optique dans une structure composite = Embedment of optical fibre into a composite structure. Phillippe OLIVIER et Jacques LAMON. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. AMAC, 10 p., 2009.

[EDF] Démarche d'EDF au regard de l'utilisation des fibres optiques pour la surveillance des ouvrages hydrauliques. Validation de cette technologie lors des essais néerlandais ijkdijs d'érosion interne.

[SUMITOMO] P. Van Vickle. *Optical Fiber Cable Design & Reliability*. Sumino Electric Lightwave. 28 p.

[FAURE] Basile Faure. *Fabrication et caractérisation de fibres optiques en silice dopées au thulium : Influence de l'environnement des terres rares sur l'amplification dans la bande S*. Physique Atomique [physics.atom-ph]. Université Nice Sophia Antipolis, 2005. Français.

[TORTECH] Blandine Tortech. *Effets des radiations sur des fibres optiques dopées erbium : influence de la composition*. Physique [physics]. Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2008. Français.

[BAGGIO] J. Baggio. *Vulnérabilité des liaisons optiques aux radiations*. CEA/DIF, 27 Mars 2007.

[DUCHEZ] Jean Bernard Duchez. *Etude du noircissement dans les fibres optiques dopées Ytterbium : interaction entre photo -et radio-noircissement*. Optique [physics.optics]. Université Nice Sophia Antipolis, 2015. Français.

[PHERON] Xavier Phéron. *Durabilité des capteurs à fibres optiques sous environnement radiatif*. Optique [physics.optics]. Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2013. Français.

[ISATEL] Gérald Richard. *Détection et analyse des événements optiques dans les réseaux FTTX et leurs influences sur la qualité du Service End_to_End*. ISATEL telecom & test solutions. 2014

[MADY] F. Mady, M. Benabdesselam. *Radio-noircissement des fibres optiques : le rôle des ions Yb²⁺ révélé par photoluminescence sur l'accélérateur SIRIUS*. CNRS UMR 7336, Nice et CEA. Juillet 0216.

[MADY2] Franck Mady, Mourad Benabdesselam, Yasmine Mebrouk, Wilfried Blanc, Bernard Dussardier. *Caractérisation du photo-noircissement des fibres optiques dopées ytterbium par thermoluminescence*. 29^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Oct 2010, Besançon, France.

[LIU] *Effects of Radiation on Optical Fibers*. Fuhua Liu, Yuying An, Ping Wang, Bibo Shao and Shaowu Chen, China.

[KREBBER] *Radiation-Induced Attenuation of Perfluorinated Polymer Optical Fibers for Radiation Monitoring*. Pavol Stajanca and Katerina Krebber. 25 August 2017.

[TOCCAFONDO] *Distributed Optical Fiber Radiation and Temperature Sensing at High Energy Accelerators and Experiments*. Iacopo Toccafondo, EN-EA

[DISCOMS] Programme visant à tirer parti du potentiel des technologies de mesure par fibres optiques, pour renforcer la surveillance de la troisième barrière de confinement en cas d'accident grave.

[IRSN] *Neutron-gamma flux and dose calculations for feasibility study of DISCOMS instrumentation in case of severe accident in a GEN 3 reactor*. Mariya Brovchenko, Isabelle Duhamel, Benjamin Dechenaux. Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN), Fontenay-aux-Roses, France.

[IRSN1] P. Ferdinand et al., *DISCOMS: DIstributed Sensing for COrium Monitoring and Safety*, CANSMART 2015: International Conference on Smart Materials and Structures (2015).

[IRSN2] T. Goorley et al., *Initial MCNP6 Release Overview – MCNP6 version 1.0*, LA-UR-13-22934, (2013).

[IRSN3] A. Dubi et al., *General Statistical Model for Geometrical Splitting in Monte Carlo – parts I and II*, Transp. Theory Stat. Phys.*14*(2), 167-193 and 195-221(1985).

[IRSN4] K.W. Burn, *Optimizing Monte Carlo to multiple responses: the Direct Statistical Approach, 10 years on*, Nuclear Technology/*175*, 138–145 (2011).

[IRSN5] M. Fischer, *The severe accident mitigation concept and the design measures for core melt retention of the European Pressurized Reactor (EPR)*, Nuclear Engineering and Design *230* 169–180 (2004).

[EDF2] Pierre LECOMTE, *Mesure haute température en environnement irradié par fibre optique utilisant l'effet Raman*, 2017 et EDF R&D (Sylvain BLAIRON, Jose VEAU et Arnaud BARTHET).

[REACTEUR] Wikipedia, l'encyclopédie libre.

https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9acteur_%C3%A0_eau_pressuris%C3%A9e, 2018.

https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9acteur_pressuris%C3%A9_europ%C3%A9en

https://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9n%C3%A9rations_de_r%C3%A9acteurs_nucl%C3%A9aires

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Corium>

[SPECTRE] *La fibre optique*, David CARRIN, 2013 (<http://slideplayer.fr/slide/466796/>) et http://home.scarlet.be/vinderick.pascal/les_cables/fibre_optique/wdm.htm

[LISSANDRE] Lissandre Laure, *Analyse de la fissuration des bétons et des techniques de mise en œuvre en vue d'optimiser la réalisation des ouvrages*, Mémoire 5^e année INSA de Strasbourg, 2006

[Laboratoire de la Matière] Béton[s] n°6. Pathologie, le retrait des bétons. Septembre/octobre 2006. [en ligne] disponible sur : www.betons-lemagazine.fr.

[Benboudjema] Farid Benboudjema. MODELISATION DES DEFORMATIONS DIFFEREES DU BETON SOUS SOLlicitATIONS BIAxiaLES. APPLICATION AUX ENCEINTES DE CONFINEMENT DE BATIMENTS REACTEURS DES CENTRALES NUCLEAIRES. Matériaux. Université de Marne la Vallée, 2002. Français. <tel-00006945>

[Technobéton] La fissuration non-structurale du béton

Disponible sur :

[http://www.betonabq.org/images/fichiers_documents/tbnumero4_2014_v0\(1\).pdf](http://www.betonabq.org/images/fichiers_documents/tbnumero4_2014_v0(1).pdf)

[MOLEZ] Laurent Molez. *Comportement des réparations structurales en béton : couplage des effets hydriques et mécaniques*. Sciences de l'ingénieur [physics]. Ecole normale supérieure de Cachan - ENS Cachan; Université Laval, 2003. Français. <tel-00009124>

[GRANGER] Laurent Granger. *Comportement différé du béton dans les enceintes de centrales nucléaires : analyse et modélisation*. Mechanics. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1995. French. <tel-00520675>

[NGUYEN] Van Thai NGUYEN. *Comportement des bétons ordinaire et à hautes performances soumis à haute température : application à des éprouvettes de grandes dimensions*. Thèse de doctorat, juillet 2013.

[HAGER] G. I. Hager. *Comportement à haute température des bétons à hautes performances - évolution des principales propriétés mécaniques*. Thèse de doctorat, Structures et Matériaux, École Nationale des Ponts et Chaussées et l'École Polytechnique de Cracovie, 2004.

[KHOURY] G. A. Khoury. *Compressive strength of concrete at high temperatures : a reassessment*, Magazine of Concrete Research, vol. 44, n°161, p. 291-309, 1992.

[DIEDERICHS] U. Diederichs, U. M. Jumppanen et V. Penttala. *Behaviour of high strength concrete at high temperatures*. Report n°92, Helsinki, University of Technology, Department of structural engineering, 1989.

[GRANULATS] Rijaniaina, Niry Razafinjato. *Comportement à haute température des granulats et leur influence sur celui du béton*. Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil (L2MGC) EA 4114, Université de Cergy-Pontoise. 2015