



# IMG C

## LA DURABILITÉ DE LA PRÉCONTRAINTÉ EXTÉRIEURE

Journée Technique  
Vendredi 27 septembre 2018  
FNTP – 3 Rue de Berri, 75 008 PARIS





# Rupture d'une gaine de précontrainte extérieure Pont de Normandie Caractérisation des matériaux

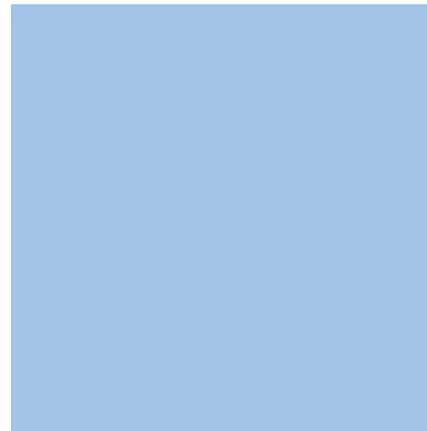
C. Fasquel - *CCI Havre* et B. Trinel - *Lerm*





## Sommaire

- La CCI Seine Estuaire, l'ouvrage
- Rupture du câble, retour d'expérience
- Les faciès de rupture des fils
- Caractérisation du coulis
- Caractérisation des gaines PEHD
- Cadre normatif, travail d'uniformisation (CEREMA, IFSTAR)



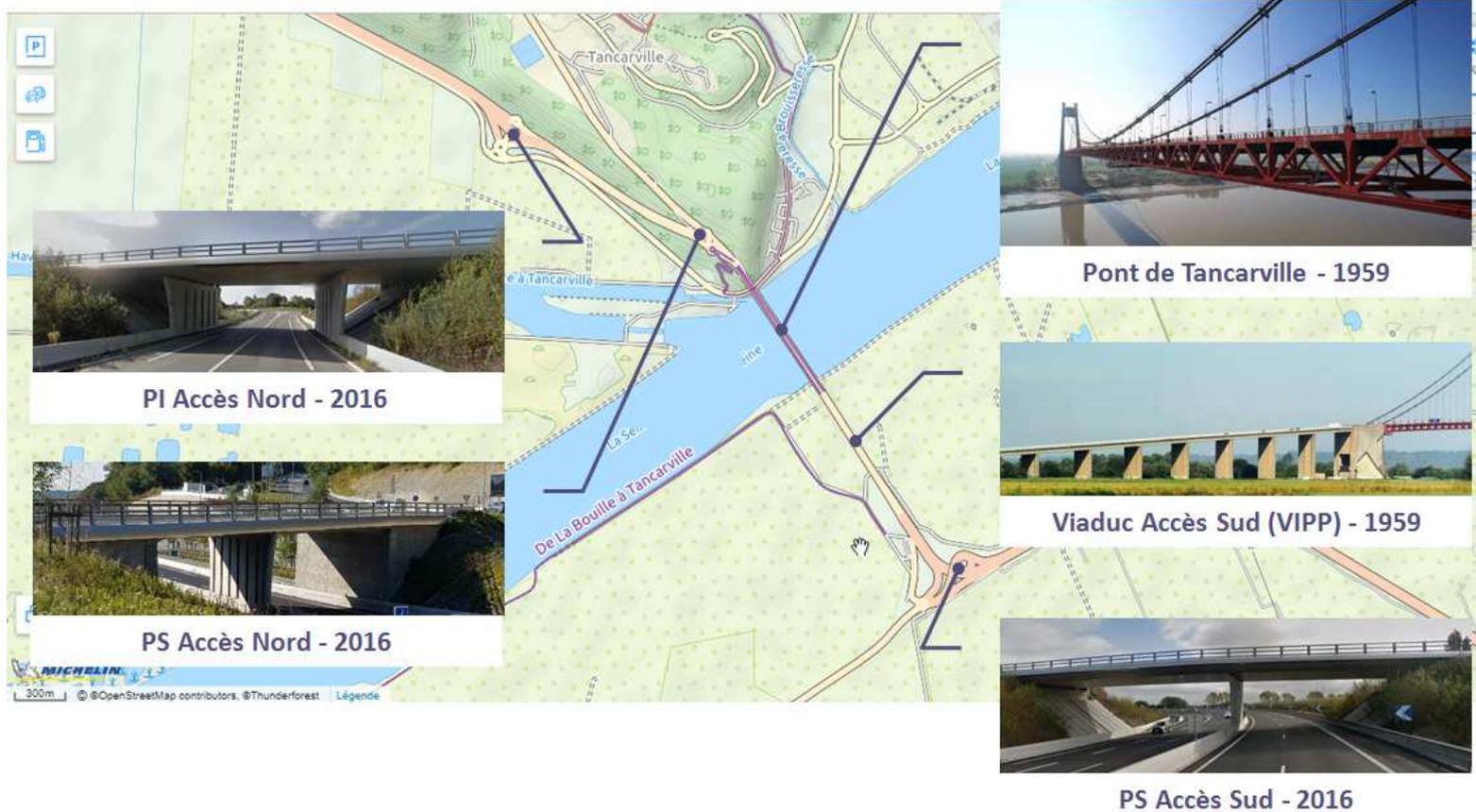
**Rupture d'une gaine de précontrainte extérieure  
Pont de Normandie  
Caractérisation des matériaux**

# La CCI SEINE ESTUAIRE

- La Chambre de Commerce et d'Industrie Territoriale Seine Estuaire (CCIT Seine Estuaire) est concessionnaire jusqu'au 17 mai 2027 de l'exploitation :
  - du pont de Tancarville,
  - du pont de Normandie,
  - du viaduc du grand canal.
- Ces trois ouvrages stratégiques pour l'accès à la ville du Havre et la continuité du réseau routier traversant la Seine (7,2 millions de véhicules en 2014 sur le pont de Normandie) ont été mis en exploitation respectivement en 1959 et 1995.
- Les ouvrages exploités par la CCI Seine Estuaire sont uniques de part leur architecture et leur envergure :
  - pont suspendu de 1 420 m de longueur pour le pont de Tancarville,
  - pont à haubans de 2 141 m de longueur pour le pont de Normandie,
  - pont à béquilles de 1 410 m pour le viaduc du Grand Canal.
- Au-delà de ces trois ouvrages majeurs, une dizaine d'ouvrages d'art courant sont également inclus dans le périmètre des concessions des ponts de Tancarville et de Normandie.
- Les plus récents d'entre eux ont été mis en service en 2016-2017 dans le cadre de l'aménagement des accès au Pont de Tancarville.

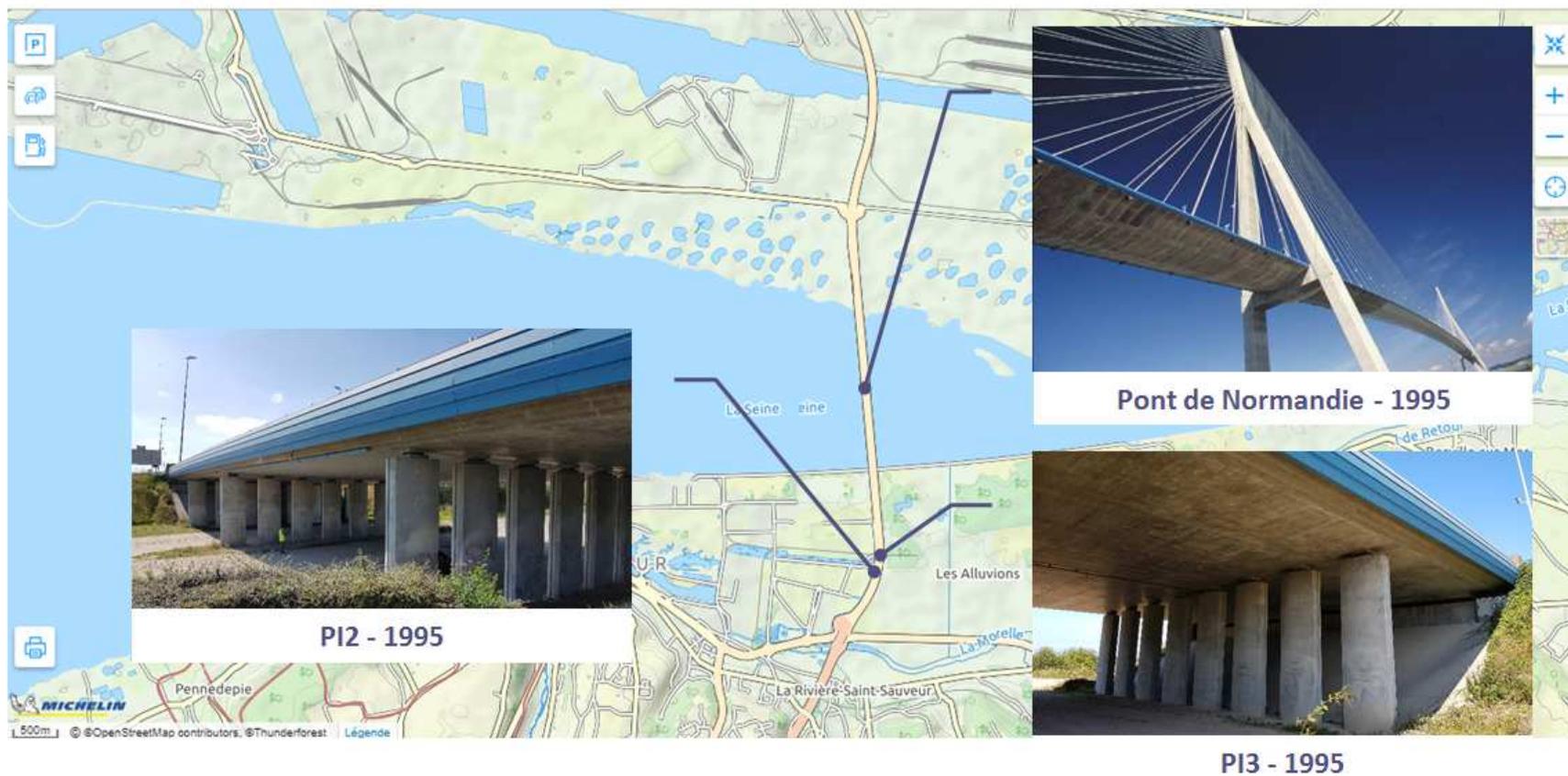
# La CCI SEINE ESTUAIRE

## ► Localisation des ouvrages d'art de la concession du pont de Tancarville



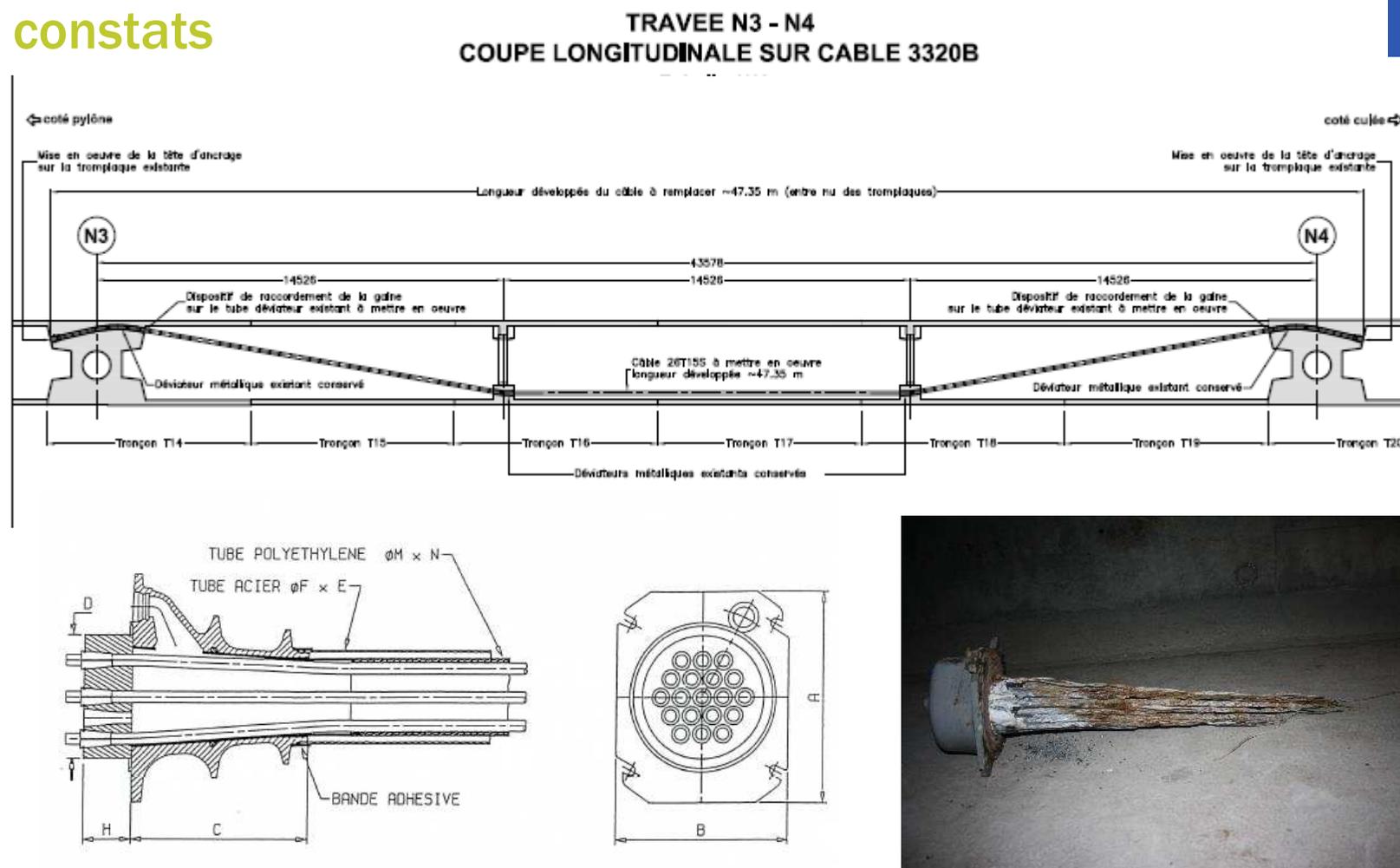
# La CCI SEINE ESTUAIRE

## ► Localisation des ouvrages d'art de la concession du pont de Normandie



# La rupture du câble

## Description de l'événement, localisation et premiers constats



# Etude des faciès de rupture des fils

## Observations visuelles macroscopiques



Choix de 3 typologies de fils en raison de leurs différents états de corrosion :

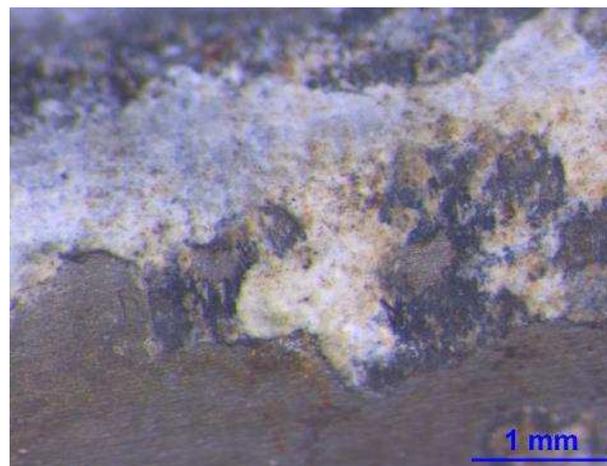
- Un fil non corrodé revêtu d'un dépôt blanc
- Un fil présentant quelques traces d'oxydation et recouvert d'un dépôt blanc
- Un fil fortement corrodé avec réduction de section

Examens macroscopiques (cm / mm) -> Examens à loupe binoculaire ou au microscope optique (mm)

-> Examens au microscope électronique à balayage ( $\mu\text{m}$ )

# Les faciès de rupture des fils

## Observations à la loupe binoculaire

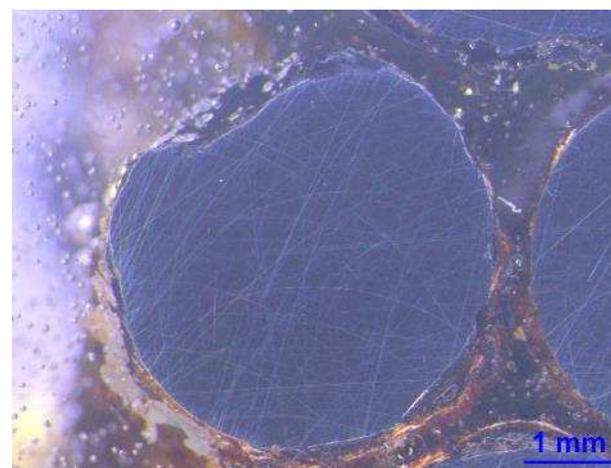
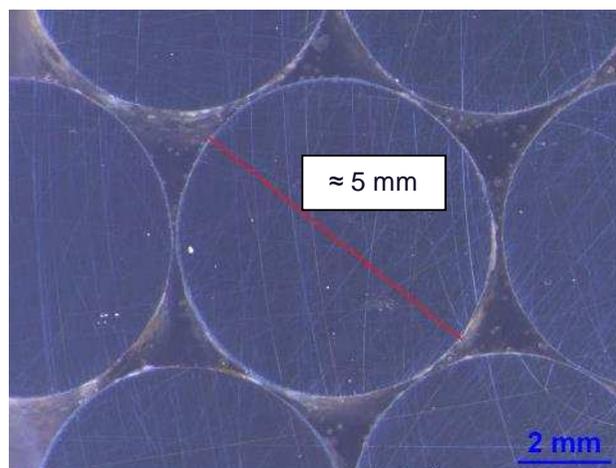


# Les faciès de rupture des fils

## Observations à la loupe binoculaire

### Examens en coupe sur section polie des échantillons :

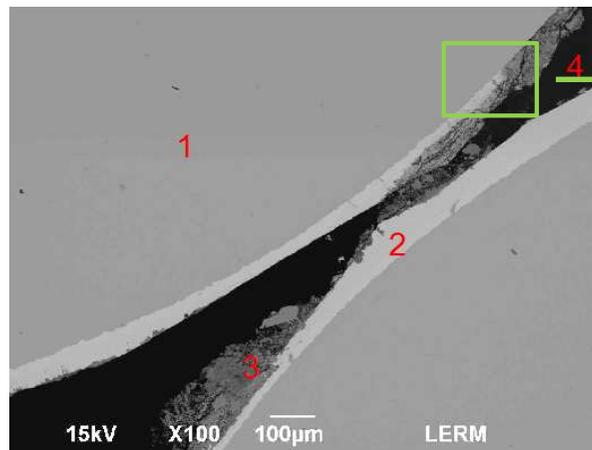
- le diamètre des fils de l'échantillon apparemment sain est d'environ 5 mm. Quelques points de corrosion de l'acier ont été observés. Le dépôt blanc recouvrant ces fils est très fin
- le diamètre des fils des échantillons altérés est également d'environ 5 mm. Les pertes de section de ces fils sont assez conséquentes au niveau des zones étudiées et peuvent être supérieures à 50 % localement, en raison de la corrosion de l'acier



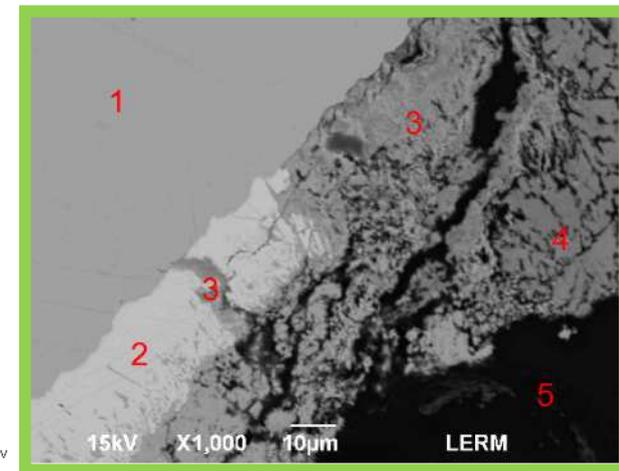
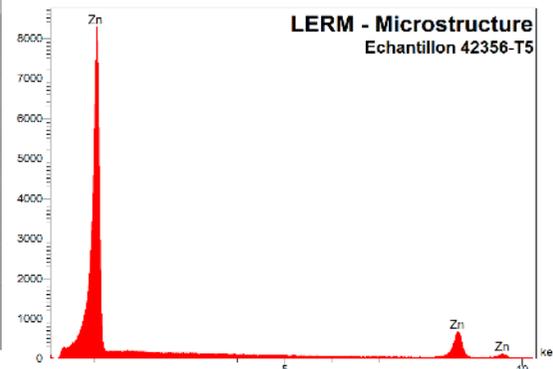
# Les faciès de rupture des fils

## Examens au microscope électronique à balayage

Echantillon apparemment sain



1 : acier, 2 : couche galvanique,  
3 : produits de corrosion



Détail de la corrosion en surface d'un fil en coupe polie  
1 : acier, 2 : couche galvanique,  
3 : corrosion partielle de la couche de zinc,  
4 : produits de corrosion cristallisés,  
5 : résine d'enrobage



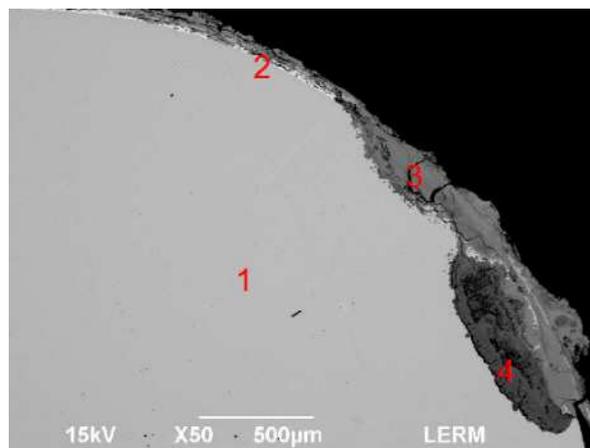
MEB

- Acier à base de fer (Fe), de chrome (Cr) et de carbone (C)
- Couche galvanique (Zn) d'environ 80  $\mu\text{m}$
- Corrosion localement non négligeables de la couche galvanique (par endroits craquelée, morcelée et même absente localement). Oxydes et/ou hydroxydes et/ou carbonates de zinc
- Pas de signe de corrosion sur l'acier

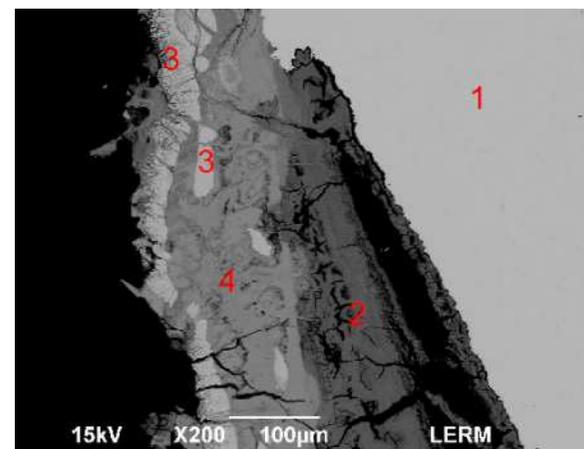
# Les faciès de rupture des fils

## Examens au microscope électronique à balayage

Echantillon altéré



1 : acier, 2 : couche galvanique résiduelle,  
3 : corrosion de la couche galvanique,  
4 : corrosion de l'acier (caverneuse)



1 : acier, 2 : produits de corrosion avec des traces de potassium,  
3 : produits de corrosion de la couche galvanique,  
4 : produits de corrosion de l'acier

- La couche galvanique présente des signes de corrosion systématiques et plus développés. La couche galvanique non corrodée est souvent résiduelle voire absente
- Les produits de corrosion : des oxydes et/ou hydroxydes et/ou carbonates de zinc, et des oxydes et/ou hydroxydes de fer
- Dans les zones les plus corrodées : présence en faible proportion des éléments potassium et soufre, diffus dans les oxydes et/ou hydroxydes de fer
- La limite entre la zone saine de l'acier et la zone corrodée apparaît nette

# Caractérisation du coulis

## Identification de la nature du liant



Fragments de coulis  
issus de la zone de rupture



Loupe binoculaire et microscope optique



Observation d'une section polie au microscope  
optique en lumière réfléchi -> Identification du liant



Sections polies

**NF EN 197-1 « Ciment » -> le liant de ce coulis semble correspond à un ciment Portland de type CEM I**

# Caractérisation du coulis

## Estimation de la composition initiale du ciment et de la formulation du coulis

Détermination de la formulation initiale du coulis par l'intermédiaire du **calcul Minéraux LCPC**, comprenant les essais suivants :

- identification du liant par microscopie optique
- analyse chimique de la fraction soluble
- analyse thermogravimétrique

ICP	% massique
Insoluble	0,57
SiO <sub>2</sub>	22,05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,97
CaO	65,16
MgO	0,79
TiO <sub>2</sub>	0,18
Na <sub>2</sub> O	0,03
K <sub>2</sub> O	0,08
SO <sub>3</sub>	2,92
Cl <sup>-</sup>	0,05
Total	100,00

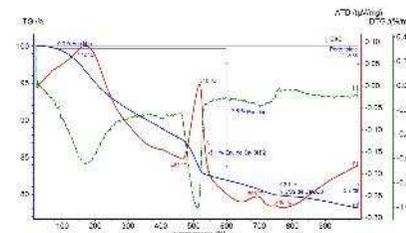
Composition initiale estimée du ciment du coulis  
exprimée en % massique

ATG	(% massique)
Teneur en granulats calciques	4,8
Teneur en ciment (% massique)	75,8
Teneur en eau (% massique)	17,8

Estimation de la formulation de l'échantillon de coulis

**NF EN 447** « Coulis pour câble de précontrainte –  
Prescription pour les coulis courants » de  
décembre 2007 :

Cl<sup>-</sup> < 0,10 % et SO<sub>3</sub> < 4,5 %



ICP



ATG



Chromatographie

# Caractérisation du coulis

## Détermination de la teneur en chlorures et du pH



Fragments de coulis  
issus de la zone de rupture



Deux profondeurs de l'échantillon  
(0-15 mm et 15-30 mm, ce dernier prélevant atteignant les  
torons), au niveau d'une soudure de la gaine

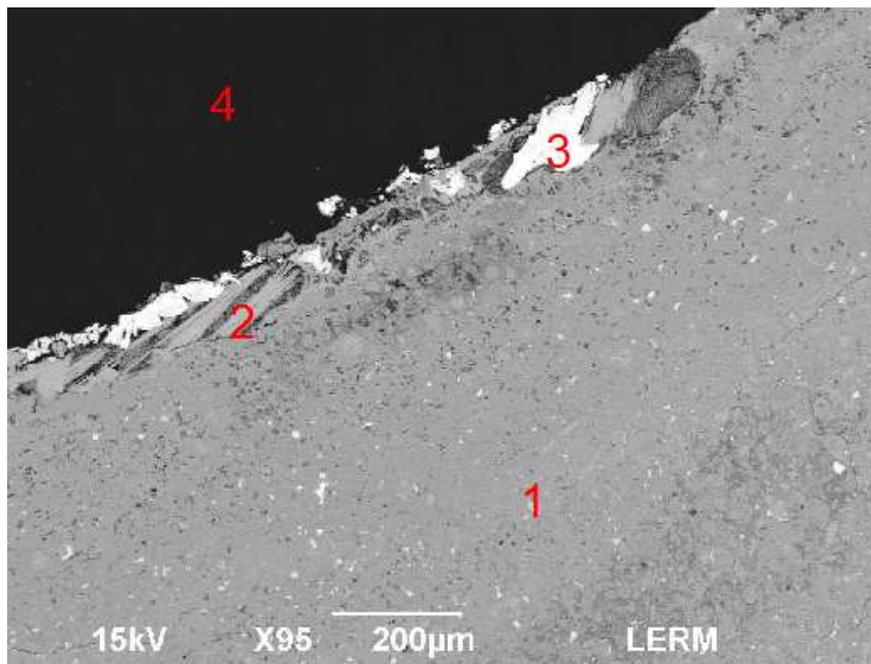
Localisation	Frange (mm)	Teneur en chlorures (% massique)				pH	OH <sup>-</sup> (%)	Cl <sup>-</sup> libres / OH <sup>-</sup>
		par rapport au coulis		par rapport au ciment				
		Chlorures totaux	Chlorures libres	Chlorures totaux	Chlorures libres			
42356-1C	Fragment 1	0,03	< 0,01	0,04	< 0,01	13,30	1,70	< 0,01
	Fragment 2	0,03	< 0,01	0,04	< 0,01	13,20	1,35	< 0,01
Au niveau d'une soudure de la gaine	0-15	0,02	0,01	0,03	0,01	13,33	1,82	0,01
	15-30	0,02	< 0,01	0,03	< 0,01	13,34	1,86	< 0,01

**NF EN 447** « Coulis pour câble de précontrainte – Prescription pour les coulis courants » de décembre 2007 : Cl<sup>-</sup> < 0,10 %

**Critère d'amorçage de la corrosion** des armatures souvent retenu est celui proposé par **Haussman**:  $\frac{Cl_{libres}^-}{OH^-} \geq 0,6$

# Caractérisation du coulis

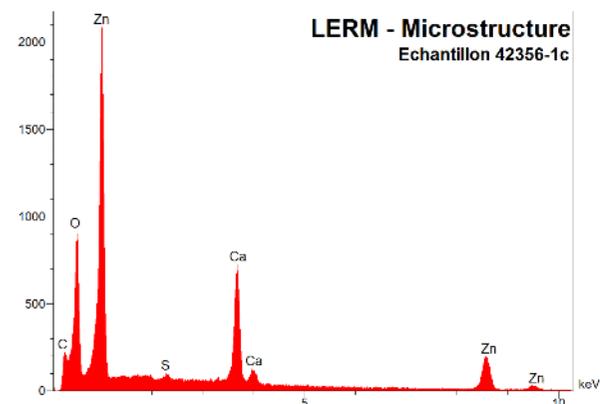
## Examens au microscope électronique à balayage



**Aspect en coupe des dépôts en surface d'un fragment de coulis**

1 : matrice hydratée du coulis, 2 : grain calcique (portlandite ),  
3 : produit riche en zinc, 4 : résine de préparation

- Absence de produit pathogène
- Dépôts blanchâtres -> cristaux de portlandite associés à des oxydes ou hydroxyde de zinc



Analyse élémentaire par spectrométrie X à dispersion d'énergie au point 3 de la figure précédente

# Caractérisation des gaines PEHD

## Le cadre normatif

Conduit PEHD				
Paramètre	Document de référence	Conditions d'essai	Méthode d'essai / norme	Critères d'acceptation
Traction Contrainte au seuil d'écoulement	NF 114	Eprouvette de type 2 (ISO 6259-3) ou de type 5 (NF EN ISO 527-3) Vitesse d'essai : 100 mm/min	NF EN ISO 6259-1 NF EN ISO 6259-3	> 15 MPa (PE80) > 19 MPa (PE100)
Traction Allongement à la rupture	NF 114			> 500 % (gr. 2 NF 114) > 350 % (gr. 4 NF 114)
Traction Allongement à la rupture	NF EN 12201-2	Si l'épaisseur du PEHD est comprise entre 5 et 12 mm (9 dans notre cas) : Eprouvette de type 1 (ISO 6259-3) ou 1B (NF EN ISO 527-2) Vitesse d'essai : 50 mm/min	NF EN ISO 6259-1 NF EN ISO 6259-3	> 350 %
Teneur en noir de carbone	NF 114		ISO 6964	2,0 à 2,5 %
Stabilité à l'oxydation	NF 114	210°C sur 3 éprouvettes En cas de non-conformité à cette température, essai à 200°C sur 5 éprouvettes	NF EN ISO 11357-6	> 20 minutes

- Les paramètres de l'essai peuvent avoir une incidence sur le résultat de l'analyse (ex: TIO -> temps d'induction à l'oxydation, teneur en noir de carbone,...)
- Travail d'uniformisation des modes opératoires en cours par l'IFSTTAR et le CEREMA

**Nous vous remercions de votre attention**