Zeitschrift: IABSE reports of the working commissions = Rapports des commissions de travail AIPC = IVBH Berichte der Arbeitskommissionen

Band: 7 (1970)

Artikel: Résultats de l'enquête

Autor: Baus, R. / Brenneisen, K.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-8683

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

TABLEAU 2

Types de corrosion	Milieu	Causes de l'attaque	Paramètres mécaniques	Produits de corrosion
rongeante générale inter-cristalline trans-cristalline sélective cata-strophique stratifiée filiforme	mouillé sec atmosphé-rique immergé sous-terrain eau de mer chimique sels fondus gaz d'échappe-ment biochimique bactériolo-gique haute tempé-rature métal liquide	pile de concentra-tion pile bimétallique pile active - passive électrolyse hydrogène absorption d'oxygène érosion fragilisation par hydrogène fragilisation par alcalis	contraintes frottements fatigue cavitation érosion	rouille ternissure incrustations

4. RESULTATS DE L'ENQUETE

4.1 Préambule

Nous n'avons pas cru devoir donner, dans le présent rapport, une description sytématique et détaillée de tous les cas de corrosion signalés dans les réponses aux questionnaires ; la lecture d'un tel document eut été fastidieuse et peu rentable, par suite du nombre considérable de paramètres différents à envisager pour chacun des cas particuliers.

Nous avons présenté les résultats par groupes, en distinguant les dégâts survenus à des ouvrages en béton armé de ceux survenus à des ouvrages en béton précontraint. Dans chacun de ces deux groupes nous avons également établi une distinction suivant le type, l'âge et les conditions d'exploitation des constructions et suivant le type de corrosion.

On a pu ainsi se borner à la description, pour chaque groupe, des cas les plus caractéristiques. Les explications des dégradations survenues aux constructions, et reprises dans ce rapport, sont celles données dans les réponses à l'enquête.

4.2 Ouvrage en béton armé

4.2.1 Analyse générale

Le tableau 1 donne le nombre total de cas de corrosion décrit dans les réponses au questionnaire de l'enquête. La majorité des cas (88 %) sont relatifs aux constructions en béton armé ce qui est normal, étant donné que la technique du béton précontraint est beaucoup plus récente et que les constructions en béton armé sont encore de très loin les plus nombreuses. On constate toutefois que les cas de corrosion en béton précontraint présentent plus de dangers que ceux relatifs au béton armé du fait que les signes avant-coureurs sont en général moins évidents. Dans tous les cas relatifs au béton armé, la corrosion des armatures va de pair avec les dégradations du béton qui permettent de se rendre compte de la gravité éventuelle de la situation.

Dans la grande majorité des cas, la corrosion n'a évolué que progressivement au cours du temps, cette évolution s'étendant sur des périodes assez longues (en moyenne 14 ans). Dans 19 % des cas seulement la corrosion dans les ouvrages en béton armé est due à des causes accidentelles. Dans les autres cas les dégradations par corrosion sont dues uniquement à des défauts d'exécution ou de conception des ouvrages, et auraient donc pu être évitées.

Parmi les cas signalés :

- 56 % sont relatifs à des dégradations constatées dans des ponts ;
- 25 % sont relatifs à des dégradations observées dans divers ouvrages, particulièrement exposés à l'action d'agents corrosifs :
- 19 % concernent des bâtiments industriels ou à usage d'habitation.

La répartition détaillée est donnée au tableau 3.

TABLEAU 3

	Nombre de cas de corrosion par type d'ouvrage			
	Ponts	Constructions diverses	Bâtiments industriels ou d'habitation	Total
1ère série de réponses	29	13	9	51
2ème série de réponses	33	14	12	59
Total	62	27	21	110

Il ne semble cependant pas qu'on puisse conclure que les ponts soient des ouvrages plus exposés et plus sensibles que d'autres à la corrosion des armatures ou du béton. L'importance du nombre de réponses qui les concernent est plutôt due au fait qu'on dispose de renseignements plus nombreux par suite d'un contrôle plus systématique, en particulier dans le cas des ponts de che-

mins de fer ; la plupart des réponses sont en effet relatives à des ponts-rails.

Bien que les informations mentionnées dans les réponses ne soient pas toujours très complètes, nous avons pu classer les différents cas en fonction du type de pont de manière à mettre en évidence les conditions susceptibles de favoriser la corrosion des armatures.

Le tableau 4 donne la répartition des cas de corrosion observés en fonction du type de pont.

TABLEAU 4

Types de ponts	Nombre de cas de corrosion		
	1ère série de réponses	2ème série de réponses	Total
Ponts à poutres multiples	21	10	31
Dalles en béton sur poutres métalliques	1	2	3
Ponts-dalles	3	4	7
Ponts en caisson	-	1	1
Ponts à poutres Vierendeel	1	-	1
Ponts en arc	3	3	6
Total	29	20	49

Les ponts à poutres multiples constituent 63 % de l'ensemble des cas, ce qui peut s'expliquer par les deux raisons suivantes :

- ce type de pont est le plus courant, il est donc normal que le nombre d'observations correspondant soit le plus élevé ;
- la corrosion apparaît le plus fréquemment aux points de croisement des poutres, là où la densité des armatures risque d'empêcher une bonne pénétration du béton.

Les ponts-dalles qui sont, en fait, presqu'aussi nombreux que les ponts à poutres de petites portées, présentent 4 fois moins de corrosion. On peut estimer que ce résultat est dû à la forme simple des ponts-dalles qui ne favorise pas la concentration des agents corrosifs et au fait que les armatures y sont mieux réparties que dans les poutres ce qui facilite la mise en place correcte du béton.

Le nombre de cas de corrosion relatifs aux autres types de ponts semble correspondre assez bien à la proportion des ouvrages existants.

Les résultats de la seconde partie de l'enquête montrent que la corrosion se manifeste plus souvent dans les ponts-rails que dans les ponts-routes ou les passerelles (cfr. tableau 5) probablement par suite de l'action corrosive des fumées et des vapeurs de locomotives ou bien à cause des effets de nature électrique, dans le cas des voies électrifiées. Les sollicitations et les effets dynamiques dans les ponts-rails sont également plus élevés que dans les

ponts-routes ce qui est de nature à favoriser la fatigue et la fissuration du béton.

TABLEAU 5

Type de ponts	Nombre de cas de corrosion
Pont-rail	15
Pont-route	7
Passerelle	4
Total	26

Le tableau 6, relatif à la 2ème série de réponses, montre que la corrosion se manifeste le plus souvent dans le cas des ponts franchissant des lignes de chemins de fer, ce qui est certainement dû à l'action corrosive des fumées de locomotives. On attribue également aux mêmes causes la corrosion relativement fréquente dans les ponts-cadres, la situation étant encore aggravée par suite de la mauvaise ventilation dans ces pont et de la concentration presqu'inévitable d'humidité ; dans l'une des réponses on cite également l'influence de la percolation de l'eau du terrain au travers du béton.

TABLEAU 6

Obstacles franchis	Nombre de cas
Passages supérieurs au-dessus d'une voie ferrée	17
Passages supérieurs au-dessus d'une route	4
Passages inférieurs - ponts cadres	3
Pont sur une rivière	1
Total	25

La répartition des cas de corrosion dans les différents types de bâtiments est donnée au tableau 7.

TABLEAU 7

Type de bâtiments	Nombre de cas de corrosion		
	1ère série de réponses	2ème série de réponses	Total
Bâtiment d'habitation	-	1	1
Bâtiment industriel	2	2	4
Bâtiment d'industrie chimique	2	5	7
Abattoir	1	2	3
Toiture préfabriquée	1	1	2
Souterrain immergé	2	1	3

Ce tableau met nettement en évidence l'influence du milieu corrosif sur la dégradation des bâtiments. Ces cas seront analysés plus en détail dans la suite.

Le tableau 8 donne la répartition des cas relatifs à diverses autres constructions. Ces cas ne peuvent être examinés qu'individuellement.

Remarquons toutefois que le nombre total de cas de corrosion dans des constructions spécialement exposées à l'action des produits agressifs est relativement faible.

TABLEAU 8

Type de constructions			
	1ère série de réponses	2ème série de réponses	Total
Réservoirs de produits chimiques	1	5	6
Silos à charbon	-	2	2
Silos à coke	-	2	2
Cheminées	-	3	3
Châteaux d'eau	1	1	2
Egoûts	-	1	1
Hauts-fourneaux	1	-	1
Portiques de ponts-roulants	1	-	1
Canalisations de chauffage	1	-	1
Autres	8	-	8
Total	13	14	27

Le tableau 9 donne la répartition des cas signalés en fonction de l'âge des constructions, envisagé de 10 en 10 ans.

Sur les 110 constructions en béton armé faisant l'objet de l'enquête, l'âge actuel ou l'âge de la démolition est connu pour 86 d'entre elles.

TABLEAU 9

Age des constructions	Nombre de cas de corrosion		
	1ère série de réponses	2ème série de réponses	Total
0 à 10 ans	5	1	6
10 à 20 ans	3	3	6
20 à 30 ans	8	5	13
30 à 40 ans	13	8	21
40 à 50 ans	6	10	16
50 à 60 ans	6	11	17
60 à 70 ans	3	3	6
70 à 80 ans	-	-	-
80 à 90 ans	-	-	-
90 à 100 ans	-	1	1
Nombre total	44	42	86
Age moyen	35 ans	43 ans	39 ans

On constate que 7 % seulement des constructions dégradées ont moins de 10 ans et 14 % moins de 20 ans. La majorité des constructions (78 % des cas) a un âge compris entre 20 et 60 ans. L'effet de la corrosion dans le cas du béton armé ne se manifeste donc en général que très lentement dans le temps.

L'âge des constructions correspondant aux premières manifestations de la corrosion des armatures est connu dans 42 cas.

Le tableau 10 donne la répartition de cet âge envisagé de 10 en 10 ans.

On constate que le début des détériorations s'est produit dans les 10 premières années pour 38 % des constructions et dans les 20 premières années pour 72 % des constructions.

On peut également évaluer la durée d'exploitation des constructions à l'état dégradé, c'est-à-dire la durée moyenne de l'évolution de la corrosion. Cette durée moyenne est égale à la différence entre l'âge moyen des constructions et l'âge d'apparition des dégradations, soit 25 ans. On constate ainsi que la durée moyenne d'évolution de la corrosion est relativement importante.

TABLEAU 10

Age de la construction correspondant au début observé de la corrosion	Nombre de cas de corrosion		
	1ère série de réponses	2ème série de réponses	Total
entre:			
0 et 10 ans	10	6	16
10 et 20 ans	7	7	14
20 et 30 ans	5	-	5
30 et 40 ans	1	3	4
40 et 50 ans	-	1	1
50 et 60 ans	-	2	2
Nombre total	23	19	42
Age moyen	8 ans	22 ans	14 ans

Le tableau 11 donne la répartition des constructions corrodées en fonction de la nature du milieu ambiant.

TABLEAU 11

Milieu ambiant	Nombre de constructions corrodées		
	1ère série de réponses	2ème série de réponses	Total
Atmosphère normale	13	7	20
Atmosphère humide	21	3	24
Atmosphère marine	-	4	4
Contact avec l'eau ou voisinage de l'eau	7	2	9
Atmosphère industrielle	5	30	35
Atmosphère agressive	5	13	18
Total	51	59	110

TABLEAU 12

Etat du béton	causes	Nombre de cas de corrosion 1e série de réponses	2e série de réponses	Total
1. Inconnu par manque d'information	non définies -	6	3	9
2. Défectuosité du béton				
a) cavités, manque d'étanchéité, porosité, insuffisance de ciment excès d'eau, granulométrie mal choisie densité d'armature trop forte	humidité, carbonatation du béton, agents corrosifs extérieurs tels que: eau de mer, fumées, gaz sulfurés, chlorures, percolation de l'eau contenant des agents corrosifs, pénétration des sels; éclatement de l'enrobage et progression de la corrosion.	16	14	30
b) enrobage insuffisant des armatures (<2 cm) + éclatement de l'enrobage	acide sulfureux, air salin, fumées de locomotives, eau de mer, atmosphère industrielle, acide carbonique, égoûts, pénétration des sels	18	17	35
c) recouvrement insuffisant des étriers	idem - humidité - pénétration vers les armatures principales.	-	3	3
d) porosité due à la ségrégation du béton lors du bétonnage	idem	3	1	4
e) défauts de mise en oeuvre - armature non enrobée	atmosphère non agressive	-	1	1
3. Fissuration due aux déformations excessives de la construction, dans les joints ou dans les joints de reprise de bétonnage, par tassement des appuis, par le retrait empêché du béton, par suite des bombardements, des gradients thermiques, des intempéries.	atmosphère non agressive ou agressive suivant le cas (gaz, acide carbonique etc. ...)	6	6	12
4. Mauvaise conception de la construction: - béton de bonne qualité mais non protégé, dégradation du béton suivie de la corrosion des armatures; - armatures sortant du béton; - utilisation de béton léger; - passage d'aciers au travers de joints mal protégés	condensation d'humidité et agents chimiques tels que Cl_2, SO_2, $(NH_4)_2SO_4$, solutions salines, acide acétique, déchets organiques.	2	14	16
			Total	110

On constate que le plus grand nombre de constructions corrodées se situe en atmosphère industrielle (32 % des cas). Dans 22 % des cas l'atmosphère est simplement humide. Il convient de remarquer qu'un nombre relativement important de constructions touchées par la corrosion se trouve en atmosphère normale (17 % des cas) ce qui met en évidence le danger d'une mauvaise protection des armatures, même dans des conditions peu agressives.

Le tableau 12 donne une description plus détaillée des causes de corrosion des armatures dans les constructions. Les ouvrages y sont classés suivant la nature des défauts ou des dégradations du béton en liaison avec l'action des produits agressifs qui provoquent directement la corrosion des armatures. Dans le plus grand nombre de cas, les dégradations sont dues à des défectuosités du béton favorisant la pénétration de divers produits corrosifs jusqu'aux armatures, suivie de l'éclatement du béton et de la progression de la corrosion.

Les défectuosités du béton sont en cause dans 66 % des cas de corrosion, soit en raison d'un enrobage insuffisant (32 %), soit en raison de la porosité du béton (34 %).

Une autre cause importante de dégradation est la mauvaise conception des constructions dont le béton a une bonne résistance mécanique mais dont les caractéristiques sont mal adaptées aux conditions réelles d'exploitation. Il s'agit généralement d'un béton insuffisamment protégé dans un milieu fortement agressif qui provoque sa décomposition progressive, suivie de la corrosion des armatures.

Ces cas constituent 14,5 % de l'ensemble.

On attribue, dans 11 % des cas, les causes de dégradation à une fissuration excessive mais imprévisible du béton. Enfin, dans 8 % des cas les causes de détérioration ne sont pas connues.

Ainsi, dans 81 % des cas traités, la corrosion des armatures est une conséquence directe soit d'une négligence dans l'exécution, soit d'un manque de prévision dans la conception favorisant l'action destructive du milieu ambiant.

4.2.2 Analyse détaillée

- Défectuosités du béton

Pour illustrer les cas de corrosion dus au manque d'étanchéité du béton, mentionnons tout d'abord le cas d'une passerelle de 30 pieds de portée, constituée d'une dalle de 4 pouces d'épaisseur et de deux poutres de section 9" x 18". Cette passerelle est construite en bordure de mer. Le béton mis en oeuvre présentait un affaissement au slump-test de 4" (≃ 10 cm) et sa résistance à 28 jours était de 2.250 lb/squin. Vingt ans après la construction on a constaté des fissures longitudinales et des taches de rouille au niveau des armatures, sur la surface des poutres exposées à la mer. Le béton ne présentait aucun éclatement ni écaillage. Après enlèvement du béton, on a constaté que la section des armatures était réduite de 10 % par la corrosion rongeante. Cette corrosion en atmosphère marine a été provoquée par un manque de compacité du béton.

Le manque de compacité du béton est également la cause de dégradations importantes, après 38 ans d'exploitation, dans un bâtiment situé également en atmosphère saline. Les armatures des colonnes, des murs et des dalles ont été fortement attaquées par la corrosion, le béton étant exposé à l'action répétée d'une eau chargée de chlorures.

Les mêmes causes peuvent être attribuées aux dégradations constatées dans un pont âgé de 20 ans, situé également en bordure de mer. Le béton

était de mauvaise qualité par suite d'une trop grande porosité. La corrosion presque totale des armatures est attribuée à la pénétration de l'humidité dans le béton. Cette corrosion en présence de chlorures s'est vue encore accélérée par l'éclatement de l'enrobage.

La mauvaise qualité du béton est invoquée à propos des 30 constructions. Elle se traduit par un manque de compacité attribuée à un ou plusieurs des facteurs suivants: mauvaise granulométrie, trop grande pauvreté en ciment, excès d'eau de gâchage, moyen de serrage insuffisant, défectueux ou peu approprié, densité trop grande des armatures.

Les bétons de faible qualité donnent lieu fréquemment à l'apparition de fissures longitudinales qui ont nettement pour effet de réduire d'abord, puis de supprimer rapidement le caractère protecteur de l'enrobage.

Le processus de destruction est gravement accéléré si la construction ou certains de ses éléments sont soumis à d'importantes et fréquentes variations de température et d'humidité.

Dans quatre cas décrits, la porosité du béton est attribuée à une ségrégation des matériaux, lors de la mise en place du mélange.

Pour un de ces cas, la ségrégation résulte d'une mise en place par gravité avec chute d'une trop grande hauteur et simple vibration du coffrage. Pour un autre cas, des traces blanches de chaux libre ont été constatées à la face inférieure de certains éléments de l'ouvrage; la ségrégation peut être attribuée à la vibration excessive du béton.

Dans un autre cas enfin, on a observé la présence d'une couche de mortier fin entourant les armatures et comprise entre le béton de fond du moule et le béton de remplissage au-dessus des armatures; des fissures longitudinales sont apparues à la jonction des différents matériaux.

On signale également des dégâts dus à la perméabilité des joints et des reprises de bétonnage mal scellées, attribuable à un manque évident de soin et de précaution dans le changement par phases des échafaudages; la plupart des reprises sont marquées par des fissures souvent importantes.

La porosité du béton et le manque d'enrobage des armatures sont spécialement dangereux, au point de vue de la corrosion, dans les constructions exposées à l'action des produits chimiques.

Citons comme exemple le cas de la toiture d'un hall d'usine dont l'atmosphère contenait une faible concentration de chlore. Les éléments du toit, en béton de bonne résistance mais poreux, ont présenté une corrosion généralisée après 4 ans d'exploitation, par suite de la condensation d'humidité et de l'accumulation de Cl_2 dans le béton.

Dans un autre bâtiment industriel, l'humidité élevée (HR = 90 %) contenant de l'acide chlorhydrique (pH = 1) a provoqué la dissolution de la chaux libre, dans un béton poreux, et la corrosion des armatures. Les éclatements du béton d'enrobage dus à cette corrosion ont favorisé la progression rapide de la corrosion des aciers non protégés.

De même, dans une cuve de galvanisation, le béton poreux a été décomposé par les acides, ce qui a entraîné une corrosion rapide des armatures.

Dans un dépôt de $(NH_4)_3\ SO_4$ où l'atmosphère était humide, on a observé une pénétration des sels dans le béton et une corrosion importante des armatures.

La corrosion des armatures a été signalée également dans plusieurs silos à coke, où le béton a été attaqué et décomposé par le SO_2 . Dans des silos à charbon, la corrosion des armatures sous l'action de l'acide carbonique a été observée après la dégradation du béton d'enrobage, fissuré par suite de l'établissement d'un gradient thermique dû à une auto-inflammation du charbon.

De nombreux cas de corrosion se sont manifestés dans des ponts où un enrobage trop faible a permis la corrosion des étriers et, après fissuration du béton, la corrosion des armatures principales.

- Fissuration

Dans une série de cas relatifs, surtout aux ponts de chemins de fer ou ponts-routes franchissant des voies ferrées, on a pu constater une corrosion des armatures se produisant au droit des fissures.

Il est important de souligner que la corrosion des armatures dépend de l'ouverture des fissures. Si on admet généralement que les microfissures à peine visibles sont sans danger, on doit cependant noter que, dans un des cas, des infiltrations de gaz sulfureux se sont produites dans des microfissures dues au retrait empêché et à des variations importantes de température.

La corrosion rongeante n'apparaît que dans les cas où les fissures ont des ouvertures de quelques dixième de mm.

Les fissures largement ouvertes et dès lors bien aérées ne présentent pas de grand danger au point de vue de la corrosion des armatures. On peut citer à cet effet cinq réponses au questionnaire, qui n'ont pas été reprises dans le nombre total de cas étudiés, car dans ces réponses, les 5 ponts en béton armé décrits n'ont pas donné lieu à corrosion des armatures, malgré une importante fissuration du béton et la présence d'un milieu ambiant peu favorable.

La fissuration, jugée excessive, est attribuée à la mauvaise qualité des matériaux employés pour trois de ces cas, au passage de convois trop lourds dans le quatrième cas et aux effets des bombardements dans le cinquième cas.

Pour chacun des cinq ouvrages, l'atmosphère environnante était peu favorable: air marin au voisinage d'un estuaire, vallée humide et fortes variations de température, zone tempérée mais construction enjambant une rivière, région à climat très pluvieux.

Il peut paraître surprenant que, pour ces cinq ouvrages présentant des fissures parfois importantes, de 0,5 mm d'ouverture et de 3 à 5 cm de profondeur, et se trouvant dans une atmosphère peu favorable, aucun dégât n'a été constaté aux armatures qui, découvertes après sondage au burin dans un des cas au moins, avaient conservé leur pellicule de calamine.

Un de ces ouvrages fissurés est situé au-dessus d'un estuaire et comporte des poutres alvéolaires à travées continues; les fissures transversales intéressent le hourdis supérieur et la face intérieure des âmes des poutres.

Dans un autre cas relatif à un pont-rail du type poutre en caisson, le ferraillage était tel que le serrage convenable du béton était pratiquement impossible.

Dès la mise en service, de nombreuses fissures sont apparues; de filiformes qu'elles étaient au départ, certaines de ces fissures atteignaient 1,2 mm d'ouverture après quinze ans. Malgré l'environnement du pont chevauchant une vallée humide dans laquelle la température atteint -25° C en hiver, on n'a constaté aucun éclatement du béton et rien ne permet de supposer que les armatures soient oxydées.

- Mauvaise conception

Citons deux cas où la corrosion des armatures a été provoquée par des erreurs de construction.

Dans un hôpital, le chauffage a été réalisé au moyen d'éléments thermiques placés dans les plafonds. L'isolation a été réalisée à l'aide d'un produit contenant un liant à base de chlorure de magnésium, qui est très corrosif. La concentration de chlorure de magnésium, favorisée par le chauffage, ainsi que la

condensation périodique ont provoqué très rapidement la corrosion des armatures.

Dans un réservoir contenant une solution de $CaCl_2$ concentré avec un inhibiteur-bichromate 2 %, la surface intérieure du béton a été totalement dégradée par manque d'une couche de protection efficace; les armatures dénudées du réservoir n'ont cependant pas été corrodées. Par contre, les armatures des poutres supportant ce réservoir se sont corrodées malgré un enrobage de béton de 5 cm, par suite de la pénétration des vapeurs de produits chimiques dans les fissures apparues autour des barres sortant du béton.

Ces deux derniers cas doivent évidemment être considérés comme des cas spéciaux où la corrosion des armatures est une conséquence normale et inévitable de l'action de produits chimiques sur des aciers insuffisamment protégés.

Quelques cas de corrosion sont dus à des additions de chlorure de calcium dans le béton, en proportion supérieure à 2 % du poids du ciment.
Plusieurs analyses faites sur le béton provenant du voisinage des armatures corrodées, ont révélé des concentrations de loin supérieures à celles théoriquement prévues et réalisées en pourcentage du poids du ciment réellement mis en oeuvre.

- Constructions spéciales

Parmi les différents cas cités dans l'enquête, quatre constructions ne constituent pas à proprement parler des ouvrages en béton armé; il s'agit de deux plafonds en terre cuite armée et de conduites de radiateur scellées à l'aide de mortier ou de béton. Il nous a cependant paru utile de les décrire assez longuement car ils permettent d'attirer l'attention sur certains problèmes particuliers dont la reproduction peut être assez fréquente.

Un de ces cas typiques de corrosion est celui dû à des condensations dans le hall de bouteillerie d'une grande brasserie. L'atmosphère est très chaude et saturée d'humidité, les murs et les plafonds se couvrent de moisissure formant une mousse qui retient l'humidité.

L'ossature portante de la toiture est constituée d'une série de poutres en béton précontraint de 20 mètres de portée entredistantes de 7 mètres. Sur ces poutres reposent des pout ains en terre cuite réalisés par la juxtaposition d'éléments évidés et à la partie inférieure desquels sont enfilées des armatures en acier doux. Un scellement au mortier est ensuite réalisé. L'épaisseur de la couche de mortier d'enrobage est de 4 millimètres. Les poutrains de 7 mètres de portée sont entredistants de 76 centimètres et portent à leur partie supérieure un lit de dalles creuses en terre cuite servant de support à la couverture d'étanchéité; à leur partie inférieure, ces poutrains sont munis de talons sur lesquels repose un second lit de dalles creuses en terre cuite formant faux-plafond.

Après sept années d'exploitation, on a constaté la chute d'éclats de terre cuite de plus en plus nombreux. Un examen approfondi a révélé une fissuration et une dislocation généralisées de la face inférieure des poutrains préfabriqués en terre cuite par suite du gonflement dû à l'oxydation des armatures inférieures.

Les conditions hygrométriques du local en cours d'exploitation donnaient lieu à une condensation importante dans les éléments en terre cuite au niveau des dalles de plafond et des armatures inférieures des poutrains; il est à signaler que le local était l'objet d'une très faible ventilation naturelle.

La grande perméabilité des éléments en terre cuite permettait l'absorption rapide des condensats de la surface et l'échange continuel d'humidité avec l'atmosphère ambiante. Aucun agent agressif particulier n'a été décelé

dans les vapeurs du local ni dans les condensats au voisinage des armatures corrodées.

La corrosion est donc due à la seule pénétration d'eau pure à travers la terre cuite poreuse, le mince enrobage en mortier de ciment d'épaisseur d'ailleurs variable et parfois nulle n'ayant fourni qu'une protection négligeable et insuffisante.

On peut immédiatement conclure que l'emploi d'éléments en terre cuite armée est à éviter dans tous les endroits où il y a danger de condensation.

Dans la réparation, seules les poutres en béton précontraint ont été conservées, elles n'avaient subi aucun dommage. Un hourdis en béton précontraint a été adopté pour franchir la portée de 7 mètres entre poutres principales; un faux plafond en plaques de terre cuite non armée y a été suspendu par des dispositifs de fixation inoxydables et une ventilation forcée énergique du local a été réalisée afin de maintenir le degré hygrométrique à une valeur suffisamment basse que pour éviter des condensations au niveau du faux plafond.

Les deux cas de corrosion de conduites et serpentins de chauffage mettent en évidence le soin qu'il convient d'apporter dans la confection du mortier ou du béton d'enrobage.

Les premières de ces conduites, d'un diamètre extérieur de 22 millimètres, d'une épaisseur de 2,5 millimètres, en acier à 0,12 % de carbone laminé à chaud et sans soudure, ont été placées à la partie supérieure d'une dalle en béton et enrobées dans du mortier de 5 centimètres d'épaisseur totale (10 à 20 mm au-dessus des tubes) ; du chlorure de calcium (1 % en poids du ciment) a été ajouté au béton et au mortier (teneur en ciment de ce dernier, environ 350 kg par mètre cube, rapport ciment-sable (0-8) = 1/5, rapport E/C = 0,6).

Des fentes importantes se sont manifestées 6 à 8 mois après la mise en place du mortier d'enrobage, c'est-à-dire 3 à 4 mois après le fonctionnement de l'installation de chauffage, température variant entre 20°C et 70°C.

Les conduites étaient corrodées et trouées particulièrement suivant les génératrices inférieures. Une inspection a montré les insuffisances de l'enrobage ; forte porosité et vides importants sous les tuyaux ; l'analyse chimique du mortier prélevé au voisinage des endroits corrodés a révélé une concentration en chlorure de calcium pur variant entre 0,1 et 2,6 %.

La corrosion est ainsi attribuée à une densité trop faible du mortier, à une mauvaise exécution de l'enrobage ; elle a été accélérée par l'addition, mal répartie d'ailleurs, de chlorure de calcium.

Le second cas est relatif à des conduites soudées en acier de 22 millimètres de diamètre extérieur et de 1,5 millimètre d'épaisseur. Ecartées d'axe en axe de 30 centimètres, elles étaient enrobées dans une dalle en béton de 10 centimètres d'épaisseur, coulée directement sur la dalle résistante d'un plancher. Celui-ci est coulé directement sur le sol par l'interposition d'une couche de gravier drainante recouverte de feuilles en matière plastique.

Le béton d'enrobage, dont l'épaisseur réelle variait entre 8 et 12 centimètres, a été placé en deux couches : une couche inférieure maigre et poreuse (1/11, 150 kg de ciment par m3 de béton) une couche supérieure quelque peu plus riche et plus compacte ; la mise en place était faite par damage à la main; une addition de plastifiants et d'accélérateur de prise à base de chlorure de calcium, dont la teneur réelle était de 1 à 1,5 % en poids du ciment, a été faite.

Cinq ans après la mise en service, à une température variant entre 20° et 70°C, des corrosions importantes ont été constatées dans les canalisations.

Le dommage est attribué au fait que le béton d'enrobage, maigre et poreux,

n'a pu protéger les tuyaux contre l'humidité, car la possibilité d'un fonctionnement défectueux du drain en gravier ou de dégâts dans les feuilles en plastique n'est pas écartée.

La présence de chlorure de calcium et le fait que les canalisations étaient soudées, ont pu accélérer la corrosion mais ne sont pas considérés comme causes principales.

- Localisation des dommages aux armatures

Les dégradations dues à la corrosion se manifestent soit sur l'ensemble de l'ouvrage, soit dans les parties les plus exposées, soit aux endroits où la qualité et le serrage du béton sont susceptibles d'être les moins bons.

40 % de cas étudiés présentent des désordres répartis sur l'ensemble de l'ouvrage ou tout au moins sur une partie importante de celui-ci exposée à des actions agressives.

Les désordres affectant toutes les parties de l'ouvrage se manifestent sous des formes très variées :
- égouttures carbonatées,
- plages de carbonate,
- fissures colmatées,
- acier corrodé apparant,
- fissures dont l'ouverture vaut en moyenne 0,3 millimètre,
- acier corrodé apparant avec béton éclaté.

Dans les autres cas, les dégradations ont plutôt tendance à se localiser sur certaines pièces seulement. C'est ainsi que pour 34 % des constructions, les corrosions se sont manifestées à la partie inférieure des éléments : base des nervures, semelles et talons des poutres.

Par exemple, dans un pont route du type hourdis nervuré, la face inférieure des poutres montre de nombreuses plages où le béton est éclaté ; les armatures apparentes, présentent une corrosion très nette ; on remarque également une carbonatation très avancée de la partie inférieure des consoles sous trottoir.

Les désordres peuvent suivre à la fois la position des étriers et celle des armatures principales.

Les endroits les plus susceptibles d'être l'objet des dégradations sont le plus souvent ceux pour lesquels le béton présente le plus de risques d'être le moins bien serré et le plus ségrégé, c'est-à-dire, outre la partie inférieure des dalles et des poutres, les angles et les arêtes des différents éléments, les parties voisines des joints et du raccordement de plusieurs pièces, ainsi que les zones à trop forte densité d'armatures.

20 % d'ouvrages présentent des désordres nettement caractérisés aux angles de raccordement et aux arêtes des pièces.

On peut citer quelques exemples particulièrement caractéristiques des désordres apparus le long des arêtes de poutres et de colonnes :

Dans un immeuble de 70 ans d'âge, la face inférieure d'une poutre de plancher a été endommagée. Les armatures avaient une section carrée de 40 millimètres de côté ; elles étaient placées bout à bout sans recouvrement, la liaison étant assurée par un fil de fer de 3 mm de diamètre, enroulé hélicoïdalement sur une longueur de 20 centimètres le long de chacune des barres.

Une corrosion importante tant des armatures principales que du fil de liaison a été constatée.

Un passage supérieur, vieux de 52 ans, du type hourdis nervuré à deux travées de 13 mètres, présente, sur la face inférieure des poutres, des fissures longitudinales de 0,5 mm de largeur ; on observe plusieurs fissures présentant

de nombreuses concrétions de carbonate de chaux. Les angles éclatés des poutres laissent apparaître les armatures qui sont oxydées et qui présentent en certains endroits des réductions de diamètre de 37 à 34 millimètres. Aucune fissure transversale n'est à l'origine des désordres. Le béton coulé liquide a été mis en oeuvre par piquage et l'enrobage des armatures était de 1,5 cm. Un autre passage supérieur de 43 ans d'âge présente des colonnes dont la porosité du béton a facilité la corrosion des armatures et l'éclatement de quelques arêtes ; dans plusieurs sections, le diamètre des barres est réduit de 32 à 27 millimètres.

Dans les régions voisines des armatures principales ou du croisement des éléments d'un ouvrage, il se produit fréquemment une ségrégation du béton qui favorise les infiltrations. A titre d'exemple, citons un cas de ségrégation dans une poutre qui a présenté des désordres importants. Ceux-ci sont dus en majeure partie à l'enrobement des aciers par un mortier fin pris en sandwich entre un béton de fond de moule et un béton de remplissage de mauvaise qualité d'ailleurs ; des fissures longitudinales de 0,3 mm d'ouverture moyenne sont apparues au contact du mortier et du béton.

Les régions voisines des joints de dilatation sont également très exposées aux dégradations : quelques cas de corrosion ont été constatés dans ces zones.

Dans le cas d'un pont route à travées multiples, des fissures importantes de 2 à 3 mm d'ouverture et inclinées à 45° sont apparues au voisinage d'un joint, sur palée ; on n'a pas relevé de fissures longitudinales. Les fissures, avec égouttures importantes laissant supposer une oxydation des armatures, sont attribuées au fait que le bétonnage à l'extrémité de la travée ne comportait qu'un assez faible volume de béton y compris le chevêtre incorporé et il est à présumer que l'arrêt entre les phases de bétonnage a été, en cet endroit, assez long. L'inclinaison des fissures à 45° n'est donc pas expliquée par l'intervention des contraintes dues à l'effort tranchant et cela d'autant moins que les étriers présentaient des écartements assez faibles ; seule la distribution des phases de bétonnage est invoquée pour justifier l'inclinaison des fissures.

Les dégradations peuvent aussi se produire le long des faces verticales des poutres lorsque celles-ci sont assez fortement armées transversalement. Il apparaît alors sur ces faces, des réseaux de fissures qui sont sans rapport avec les sollicitations des poutres. Dans le cas d'un ouvrage cité, la fissuration est attribuée à une très faible résistance en traction du béton ainsi qu'à un décoffrage prématuré, 12 à 15 jours après le dernier bétonnage. Dans le même ouvrage, les fissures transversales des talons et des âmes des poutres sont parfois accompagnées de fissures longitudinales des talons, sans qu'aucune relation ne soit établie entre les deux modes de fissuration.

L'orientation des éléments d'un ouvrage par rapport à certaines influences atmosphériques comme les vents dominants, les embruns, les projections salées ou par rapport à des influences de caractère industriel, tel que : gaz, fumées, poussières, etc..., joue un rôle très important dans la localisation des dégradations.

L'exemple d'un pont route est à cet égard extrêmement caractéristique ; ce pont, constitué par une dalle reposant sur quatre poutres, est soumis sur ses faces longitudinales à des vents du nord-ouest, du côté d'un étang et aux vents du sud-est venant de la mer. Les faces verticales des poutres exposées à ces vents, présentent des dégradations nettement marquées, alors que les autres faces verticales sont exemptes de toute trace de corrosion. Les dégradations se sont manifestées sous forme de fissures transversales nombreuses et de corrosion des armatures avec éclatement du béton dans les angles des

poutres les plus exposés.

- Nature des dégradations.

Les dégradations apparaissent le plus souvent et à la fois sur les armatures et sur le béton environnant. Ainsi qu'il est bien connu, l'oxydation de l'acier s'accompagne d'un gonflement, lequel conduit dans certains cas à l'écaillage et dans d'autres cas à l'éclatement du béton qui est d'ailleurs souvent fissuré et carbonaté au voisinage des barres oxydées.

En ce qui concerne l'acier, 20 % des constructions reprises dans l'enquête ne présentent qu'une oxydation à peine visible ou modérée des armatures.

Dans les autres cas, on note des réductions plus ou moins importantes de la section des barres sous l'action de la corrosion. Dans certains cas, les armatures et les étriers se sont rompus ; dans d'autres cas, on note des réductions de section de l'ordre de 25 % et des réductions de diamètre de 32 à 26 mm, de 32 à 27 mm, de 28 à 24 mm, de 25 à 20 mm, de 37 à 34 mm, de 10 à 8 mm, et de 40 à 30 mm ; de telles réductions sont susceptibles de compromettre gravement la sécurité des constructions.

En ce qui concerne le béton, 28 % des constructions examinées présentent des dégradations qui commencent par l'apparition de fissures, sans qu'un rapport soit nécessairement établi entre la position des fissures et les sollicitations. Dans ce premier stade, l'ouverture des fissures varie entre quelques dixièmes de millimètres et quelques millimètres ; certaines fissures sont carbonatées. Le béton présente parfois aussi des épauffrures, des égouttures et des traces blanches de chaux libre.

Dans un second stade, les fissures s'accompagnent d'éclatements, d'effritements, d'écaillage, de dislocations et de décollements du béton : de tels dommages ont été observés dans 48 % des cas traités.

Enfin dans un troisième stade et pour 24 % des constructions, la désagrégation du béton est totale avec mise à nu des aciers.

- Précautions en vue d'éviter les dommages.

L'étude systématique des réponses à l'enquête permet de citer un certain nombre de précautions qui, selon les auteurs, auraient permis, sinon d'éviter complètement, du moins de réduire le nombre et l'importance des dégradations survenues aux ouvrages décrits.

Parmi ces précautions, celles qui sont le plus souvent signalées sont les suivantes:

- une étude très soignée de la granulométrie des bétons, la préférence semblant plutôt être donnée aux granulométries continues ;
- l'utilisation de bétons suffisamment riches en ciment ; l'emploi de mortiers riches et plastiques pour l'enrobage des canalisations, particulièrement de celles qui assurent le chauffage et qui sont incorporées dans les planchers ;
- des épaisseurs d'enrobage adaptées à l'agressivité du milieu ambiant ; certains constructeurs préconisent des épaisseurs d'enrobage de 5 cm et même de 2,5" ou de 7 cm pour les ouvrages soumis à une atmosphère saline ;
- la protection par un enrobage suffisant des armatures secondaires, étriers de construction, armatures de retrait, etc... car leur corrosion peut conduire les dégradations jusqu'aux armatures principales ;
- une fixation soigneuse et inamovible des armatures dans les coffrages en vue d'éviter la réduction de l'épaisseur de l'enrobage prévue aux plans ; il faut de plus, faire en sorte que les ligatures qui relient les armatures entre-elles, de même que les extrémités de ces ligatures restent suffisamment à l'intérieur du béton ;

- le soin apporté à la mise en place et au serrage du béton ;
- le soin apporté dans la confection et l'imperméabilisation des joints à réaliser dans les ouvrages,
- l'enduisage des surfaces particulièrement exposées à une atmosphère agressive par des produits appropriés de qualité, en vue de réduire la porosité ;
- l'utilisation prudente et en quantité limitée du chlorure de calcium : ajouté parfois en très faible quantité, on le retrouve localement très concentré en certains endroits de la construction, qui peuvent être le point de départ de graves dégradations ;
- l'installation d'écrans protecteurs destinés à éviter que certains gaz et fumées ne viennent directement en contact avec les éléments particulièrement exposés des ouvrages ;
- dans certains bâtiments industriels, une ventilation ou une circulation d'air énergique, afin de maintenir le degré hygrométrique à une valeur suffisamment basse.

En atmosphère marine et surtout si la construction est en contact direct avec l'eau de mer, on a constaté à plusieurs reprises que les parties recouvertes d'une couche suffisante de sable étaient sensiblement les moins attaquées; d'où la recommandation parfois rencontrée, d'assurer un tel recouvrement, notamment pour les infrastructures de bâtiments.

4.2.3. Informations bibliographiques.

En ce qui concerne les résultats des études bibliographiques, il convient de souligner l'importance du rapport du colloque RILEM-C.R.C. sur les problèmes de la corrosion, qui s'est tenu à WEXHAM SPRINGS en septembre 1965. Tous les problèmes théoriques et pratiques relatifs à la corrosion y sont discutés en détail. Des études plus récentes se rapportent à des résultats d'essais de longue durée effectués en Belgique par le Centre de Recherches Scientifiques et Techniques de l'Industrie Cimentière, qui étudie la progression de la corrosion dans des poutres armées, exposées à l'air.

Il faut également citer les études du Dr. SORETZ en Autriche ainsi que les rapports suédois mentionnés dans la liste bibliographique. Ces rapports étudient l'influence de divers paramètres ayant trait à l'évolution de la corrosion des armatures en béton armé, tels que la nature des ciments, les agrégats et les adjuvants, l'importance de la fissuration, le type de sollicitation et les conditions ambiantes. Une autre partie des recherches est consacrée aux mesures de protection des armatures et du béton contre la corrosion.

La présentation des résultats de ces études n'entre pas dans le cadre du présent rapport. Nous croyons cependant utile de citer quelques conclusions relatives au mécanisme de la corrosion en béton armé.

La corrosion est toujours due à la différence de potentiel existant entre les zones endommagées (anodiques) et les zones saines (cathodiques). Les zones corrodées des armatures coïncident avec les zones fissurées ou avec des zones de béton poreux. La différence de potentiel est provoquée par la pénétration des produits agressifs dans les parties moins étanches du béton. L'expansion des produits de corrosion des armatures provoque l'éclatement du béton et par suite une action accélérée des éléments corrosifs sur l'acier non protégé. Le même effet peut être dû à la carbonatation du béton qui entraîne une différence de potentiel entre l'acier et son environnement, favorisant ainsi une transformation électro-chimique de l'acier.

En ce qui concerne la fissuration, on constate qu'une microfissuration est en général sans danger au point de vue de la corrosion. Les fissures d'une

certaine importance mettent localement à nu les armatures et constituent des points dangereux de concentration d'humidité, où une différence de potentiel s'établit entre les zones découvertes et les zones voisines enrobées. Dans des conditions normales, des fissures très importantes correspondant à des zones où l'acier est entièrement dénudé sont moins dangereuses.

4.2.4. Conclusions

Les principales conclusions qui ressortent des réponses aux questionnaires de l'enquête peuvent se résumer comme suit:

- dans la plupart des cas pour lesquels on dispose d'informations suffisantes, la corrosion des armatures est due à une ou plusieurs des causes suivantes:
  - une insuffisance de l'enrobage des armatures ;
  - une composition de béton mal adaptée aux circonstances et conduisant à des défauts de perméabilité, de résistance à la fissuration, etc...
  - des défauts de mise en oeuvre ;
  - un manque de protection du béton contre les agents chimiques, ou contre les dégradations mécaniques ou thermiques.
- dans de nombreux cas spéciaux, comme ceux des égoûts ou des usines de produits chimiques, la corrosion des armatures est précédée d'une dégradation partielle ou totale du béton, supprimant toute protection des armatures ; de tels ouvrages nécessitent une étude spéciale des moyens de protection ;
- dans un certain nombre de cas pour lesquels les informations disponibles sont insuffisantes, on peut admettre sans grand risque d'erreur, que la corrosion est due à l'une ou l'autre des causes citées plus haut.

L'enquête a mis surtout en évidence la nécessité d'assurer un bon enrobage aussi bien des étriers que des armatures principales. L'étanchéité du béton est un facteur plus important que sa résistance ; sa composition doit donc être bien étudiée et sa mise en oeuvre sérieusement contrôlée.

Parmi les constructions les plus susceptibles à la corrosion, on retiendra les ouvrages exposés aux fumées de locomotives ou aux fumées industrielles, et ceux exposés à l'atmosphère marine ; ces ouvrages nécessitent des enrobages plus importants et des bétons très compacts.

Ces conclusions ne font que confirmer les résultats auxquels sont parvenues d'autres commissions nationales ou internationales s'occupant de la durabilité des constructions. Elles confirment également le fait que, dans la plupart des cas, les dégradations par corrosion peuvent être évitées par une étude convenable des ouvrages, par une mise en oeuvre soignée des matériaux et par la mise en place de protections efficaces.

4.3. Ouvrages en béton précontraint

4.3.1. Analyse générale

Comme le montre le tableau 1, les cas de corrosion dans les constructions précontraintes sont beaucoup moins nombreux que dans les constructions en béton armé ; les armatures de précontrainte sont, en principe, mieux protégées contre la corrosion à cause des meilleures qualités de béton et de l'absence ou de la limitation stricte de la fissuration.

On rencontre principalement dans les constructions précontraintes deux types de corrosion, à savoir :

- la corrosion sous tension qui conduit à des ruptures fragiles des fils, soit par fragilisation due à l'hydrogène naissant, soit par corrosion intercristalline ;
- la corrosion rongeante conduisant à des diminutions de sections d'armatures pouvant causer des ruptures de fils sous tension.

Les conséquences de la corrosion dans les constructions précontraintes sont plus graves que dans les ouvrages en béton armé. Il suffit de rappeler à ce propos que les diamètres usuels des armatures de précontrainte sont en général, plus faibles que les diamètres des armatures de béton armé, de sorte que les mêmes pertes de volume d'acier correspondent à des diminutions de section relativement plus importantes pour les fils de précontrainte. D'autre part, la rupture d'une partie des fils de précontrainte provoque une surcharge proportionnelle des autres fils ainsi qu'une modification importante des efforts internes dans la construction. L'étude du comportement des constructions précontraintes au point de vue de la corrosion est donc extrêmement importante.

Malheureusement, les réponses à l'enquête ne fournissent que des informations très limitées ; en effet, 15 cas seulement ont été signalés pour les deux séries de réponses au questionnaire. Il est donc impossible d'établir pour ces cas une classification par groupes comme dans le cas des ouvrages en béton armé. Chaque cas décrit constitue en fait un exemple particulier. On constate cependant que la corrosion résulte toujours d'un manque de protection dû, soit à un défaut de la construction, soit à des imprudences ou à des négligeances lors du transport ou du stockage des aciers.

La répartition des types de constructions dans lesquelles la corrosion des armatures de précontrainte a été observée est donnée au tableau 13.

TABLEAU 13

Type de construction	Nombre de cas
Ponts	6
Constructions industrielles diverses	5
Conduites d'eau	2
Dalles de routes	1
Câbles d'ancrage	1
Total	15

Cette répartition est très peu significative au point de vue du risque de corrosion.

Au point de vue du type de protection des armatures dans les ouvrages, la répartition des cas relatés dans l'enquête est donnée au tableau 14. Deux types de câble se rencontrent parfois dans un même ouvrage.

TABLEAU 14

Type de protection	Nombre de cas
précontrainte par fils adhérents	5
câbles injectés	5
câbles extérieurs revêtus de béton	5
câbles libres dans leur gaîne	2

Les incidents provoqués par la corrosion apparaissent soit au moment de la mise en oeuvre des armatures soit après une certaine durée d'exploitation. Les ruptures de fils survenant au moment de la mise en oeuvre semblent être dues principalement à la corrosion fissurante ou à la fragilisation par hydrogène des aciers pendant leur transport ou leur stockage ; de telles ruptures se rencontrent dans 30 % des cas étudiés.

Le tableau 15 donne la répartition, en fonction de l'âge réel des constructions endommagées par la corrosion.

TABLEAU 15

Age	Nombre de cas
0 à 6 mois	5
1 à 5 ans	3
5 à 10 ans	5
10 à 20 ans	6

Les deux premiers groupes d'âges se rapportent aux cas où la corrosion résulte d'une négligence dans le stockage des armatures ou d'un défaut lors de la mise en oeuvre ; les deux derniers groupes se rapportent aux dégradations survenues sous l'action prolongée du milieu corrosif.

Suivant la nature du milieu ambiant les constructions corrodées présentent la répartition donnée au tableau 16.

TABLEAU 16

Milieu ambiant	Nombre de cas
Atmosphère normale	2
Atmosphère humide	5
Atmosphère industrielle	2
Milieu agressif - produits chimiques	3
- acides humiques	3
Atmosphère marine	1

On constate d'après ces tableaux qu'une grande partie des cas de corrosion (50 %) se présente en milieu chimiquement agressif, ce qui semble montrer que pour ces cas, le béton n'a pas été protégé de manière suffisamment efficace. Dans 30 % des cas, la corrosion se manifeste dans des ouvrages situés en atmosphère humide, favorisant le processus de condensation de vapeurs sur le béton et de concentration éventuelle de produits agressifs. La corrosion semble alors imputable à la porosité du béton entourant les armatures.

Différents types de corrosion se sont manifestés pour les ouvrages étudiés et conduisent à des dégradations plus ou moins prononcées des armatures.

Le tableau 17 donne la répartition des cas décrits en trois groupes suivant le type de corrosion et la nature des dégâts provoqués.

TABLEAU 17

Type de corrosion	Nombre de cas
rouille superficielle - traînées et points	3
corrosion rongeante - piqûre - pellicules perte de volume jusqu'à la rupture	7
corrosion fissurante - intercristalline et fragilisation par hydrogène } rupture	7

Ce tableau montre que le nombre de cas correspondant aux types de corrosion les plus dangereux, provoquant des ruptures spontanées et brutales, est important (44 %) vis-à-vis du nombre de cas de corrosion superficielle (56 %) pouvant être observés à temps, grâce aux précipitations de rouille sur la surface du béton. Ceci met en évidence l'importance statistique de ces formes dangereuses de corrosion.

TABLEAU 18

Etat du béton	Causes	Conséquences	Nombre de cas
Manque d'étanchéité du béton et des joints -	humidité, fumées de locomotives, acide carbonique, H_2S, percolation de l'eau, impuretés, $CaCl_2$, condensation de vapeurs,	Corrosion rongeante, fissures, épaufrures entrainant une réparation; corrosion rongeante avancée, rupture fragile entrainant la reconstruction.	3
Manque de recouvrement suffisant des armatures, exposées aux intempéries	humidité, gel	éclatement du recouvrement, et corrosion rongeante entrainant des réparations.	3
Manque de protection du béton décomposé chimiquement par les produits agressifs	attaque électrochimique par $KClO_3$, concentration de vapeurs contenant de l'eau régale + acide fluorhydrique; décomposition du béton par les acides humiques.	corrosion rongeante - réparation corrosion rongeante - reconstruction corrosion fissurante - reconstruction	3
Injection défectueuse,tardive, ou non existante	humidité dans les gaînes, atmosphère marine	Corrosion fissurante - remplacement des câbles Corrosion superficielle - réparation Corrosion fissurante - effondrement	5
Inclusion d'éléments corrosifs dans le béton ou dans le mortier d'injection	Ciments alumineux, ciments métallurgiques, mortier + $CaCl_2$, chlorure et sels d'ammonium	pH du béton < 9 - corrosion fissurante - reconstruction	4
Amorces de corrosion des armatures lors du transport et du stockage	H_2S et H_2SO_4 + azote, acide organique, atmosphère marine.	Corrosion fissurante, fragilisation, rupture.	3
Défauts de conception de l'ouvrage, fissuration et désagrégation du béton, dimensions trop faibles, impossibilité d'exécution correcte.	Acides organiques du sol, humidité, impuretés de l'air.	Corrosion fissurante, rupture	2

Dans tous ces cas de corrosion, on a pu mettre en évidence une ou plusieurs défectuosités de la protection des armatures qui, en présence de divers facteurs agressifs, ont provoqué une détérioration plus ou moins importante des armatures.

Le tableau 18 donne un résumé de l'ensemble des cas de corrosion signalés. Dans un grand nombre de ces cas (31 %), les dégradations sont attribuées à des défauts d'injection des câbles favorisant, suivant l'agressivité du milieu ambiant et l'étanchéité du béton, la corrosion superficielle ou la corrosion fissurante des armatures. Dans deux cas, on a omis d'injecter les câbles restés libres dans leurs gaînes ; ceux-ci n'ont été que superficiellement rouillés. Dans les autres cas , les dommages observés sont plus graves. La corrosion, due aux défectuosités de remplissage des gaînes, met en évidence l'importance d'une exécution soignée et du contrôle de l'injection.

La deuxième cause importante de corrosion (25 % des cas cités), est l'inclusion d'éléments corrosifs dans le béton, soit par utilisation de ciments alumineux ou métallurgiques, soit par addition de chlorure de calcium. Ces cas de corrosion sont extrêmement dangereux, car ils provoquent des ruptures fragiles des armatures.

Une série de cas de corrosion est imputable à des enrobages défectueux ou à des défauts d'étanchéité du béton ou des joints, ou encore à un manque de protection des armatures, au transport ou au stockage. La gravité des conséquences dépend de l'importance des défauts.

4.3.2. Analyse détaillée

Le nombre de cas signalés étant relativement faible, il est possible de les examiner séparément.

Avant d'aborder cet examen, il n'est peut-être pas inutile de rappeler que les armatures peuvent être endommagées par corrosion soit pendant leur stockage, soit avant leur enrobage dans le béton ou le mortier d'injection.

Deux cas signalés dans les réponses au questionnaire concernent des ruptures survenues lors du stockage.

Sur un chantier de pont, des ruptures de fils sont survenues dans 1 bobine sur cinq. Stockées sur un parc non protégé, situé à une certaine distance de la mer, les bobines étaient disposées horizontalement à même le sol. Les ruptures ont été constatées après le passage d'un typhon violent qui avait transporté de l'écume d'eau de mer sur le parc de stockage ; les parties rompues se trouvaient du côté de la mer.

Sur un deuxième chantier de pont, des bobines du même fil que celui du cas précédent étaient stockées dans un magasin en position verticale et sur deux couches.

Après une durée de stockage de un mois dans une atmosphère qui n'avait rien d'agressif, des ruptures ont été constatées sur 3 % des bobines ; elles étaient localisées suivant un diamètre horizontal dans les bobines de la couche inférieure.

Les caractéristiques de ces fils de 7 millimètres, ayant semble-t-il subi un traitement de bleuissement (stress-relieving), étaient les suivantes : tension de rupture 163 kg/mm2 ; limite élastique à 0,2 % d'allongement permanent : 147 kg/mm2 ; allongement après rupture mesuré sur une base de 100 mètres : 7,8 %.

Les fils étaient stockés en bobines de 1,5 mètres de diamètre, auquel correspond une tension d'enroulement de 93 kg/mm2.

De telles ruptures "spontanées" n'ont pas été constatées avec du fil tréfilé ; si celui-ci s'est parfois rompu, c'est pendant l'opération de mise en traction, mais des recherches ont montré que les ruptures auraient pu être évitées par une meilleure fabrication du produit ; elles prenaient naissance en effet dans des défauts du fil ou au droit de soudures de fabrication qui n'avaient pas été écartées dans les bobines envoyées sur chantier.

Les ruptures des aciers ayant subi un traitement de stress-relieving sont attribuées au stockage des fils sur des bobines de faible diamètre qui donne lieu à des tensions d'enroulement trop élevées. Dans le cas où des piqûres de corrosion se sont produites, les ruptures, beaucoup plus nombreuses que dans le second cas, sont survenues suite à la concentration de tension due à l'effet d'entaille.

Des expériences postérieures à ces incidents ont été entreprises afin de montrer qu'il était possible d'éviter de telles ruptures en augmentant le diamètre des bobines.

Les fils de 7 millimètres de diamètre soumis aux essais furent stockés sur des bobines de différents diamètres entreposés à l'air libre ; les résultats figurent dans le tableau 19.

TABLEAU 19

Diamètre des bobines (en mètres)	Tension d'enroulement (kg/mm2)	Rapport (en %) Tension d'enroulement / Tension de rupture du fil	Nombre de jours écoulés entre l'enroulement et la rupture pour cinq bobines				
			1	2	3	4	5
1	140	88	5	8	12	13	13
1,25	117	73	11	12	13	13	-
1,50	93	58	14	-	-	-	-
2,00	70	44	-	-	-	-	-

Les traits horizontaux de la dernière colonne signifient qu'il n'y a pas eu de rupture après neuf mois de stockage.

Ces résultats montrent que pour ces fils de 9 mm traités à chaud, l'entreposage à l'air libre non agressif sur des bobines de 2 mètres de diamètre n'a donné lieu à aucune rupture après un délai de 9 mois.

Il semble que les ruptures spontanées des fils de précontrainte pendant le stockage pourraient être considérablement réduites en nombre sinon évitées complètement si le diamètre des bobines était judicieusement adapté au diamètre du fil, abstraction faite du caractère d'agressivité de l'atmosphère du lieu de dépôt.

Des ruptures analogues à celles signalées dans les deux cas décrits ci-dessus sont survenues dans plusieurs pays ; elles ont été décrites par M. J.J. BOUVY dans le rapport du 2e Congrès, Thème I b tenu à Amsterdam en 1955 par la Fédération Internationale de la Précontrainte. Il s'agissait de

fils d'acier laminés à chaud (hot-rolled tempered steel wire) ; dans chacun des cas (cinq au total) la rupture est survenue alors que les fils étaient stockés sur des bobines dans l'état où elles avaient été fournies aux chantiers ou immédiatement après la mise en tension, avant mise en place du béton.

Ces ruptures furent attribuées à une sensibilité très élevée de ce type de fil à la corrosion sous tension, à l'enroulement sur des bobines de faible diamètre,ce qui donne lieu à des tensions de flexion élevées, au stockage dans des atmosphères agressives.

La corrosion des câbles postcontraints du Réservoir de Richmond en Californie est également bien connue (Engineering News-Record - 2 juin 1955).

Il s'agissait de torons placés dans des gaînes de 1,5" ; par suite des frottements importants lors de la mise en tension, le mortier d'injection n'a pas été mis en oeuvre immédiatement afin de pouvoir procéder à une nouvelle traction.

Quand celle-ci a commencé, cinq mois après la première, on a constaté la rupture attribuée à la corrosion, des torons constituant de nombreux câbles. Ici encore, il ne s'agit pas d'un cas de corrosion dans le béton mais cet exemple montre à nouveau la nécessité d'assurer une protection suffisante des fils avant leur enrobage dans le mortier d'injection ou dans le béton.

Nous ne pouvons reprendre ici la description de tous les cas connus de rupture de fil ; rappelons cependant la rupture survenue en 1957 de 98 % des fils mis en oeuvre lors de la construction d'un pont au Brésil (voir Bulletin de l'Associaçao Brasileira de Metais - octobre 1958). Ces fils étirés de section ovale et de caractéristiques Re = 145 kg/mm2, Rr = 160 kg/mm2 se sont rompus dans un intervalle de temps de cinq à dix jours environ après la mise en tension. Une étude très complète comprenant des recherches de laboratoire, a démontré que la cause des ruptures résidait dans une fragilisation par l'hydrogène suite à une exposition des fils, d'ordre surtout accidentel, à de l'hydrogène sulfuré en présence d'humidité.

Bien que de telles ruptures ne nous paraissent pas faire l'objet de l'enquête de l'A.I.P.C., car le béton ou le mortier d'injection n'y jouent aucun rôle, nous avons cependant cru utile d'en rappeler l'existence et la possibilité. Même si elles ne contribuent pas à l'insécurité des ouvrages parce qu'elles sont constatées sur l'aire de stockage ou avant tout enrobage, elles conduisent, dans les cas qui nous ont été signalés, à des troubles importants lors de l'exécution des ouvrages. Du point de vue de l'économie,et aussi bien pour le maître de l'ouvrage que pour le constructeur, il s'agit d'un aspect non négligeable du comportement des fils ; il montre combien est indispensable la protection efficace de ces armatures dès leur fabrication et à tout moment de leur existence et de leur mise en oeuvre, avant le contact avec le béton ou le mortier qui, en dernier lieu, doit les enrober.

Examinons à présent les cas de corrosion rencontrés dans les constructions en béton précontraint et qui ont fait l'objet d'une réponse au questionnaire.

- Cas de portiques en béton précontraint reliés verticalement à la partie supérieure, par des voiles préfabriqués également en béton précontraint.

Vieux d'environ quinze ans, cet ouvrage est en fait un tunnel qui assure le passage de voies de chemin de fer sous une chaussée, sur une longueur de plus de seize cent mètres ; situé dans une zone humide en bordure d'un fleuve, il est parfois soumis à l'action des fumées de locomotive.

Les désordres se sont manifestés dès la fin de la construction ; ils intéressent la face inférieure des hourdis et les voiles verticaux.

Dans les hourdis sont apparus des ensembles de fissures parallèles aux aciers longitudinaux et transversaux de précontrainte ainsi que des épauffrures au droit des joints des dalles constituant le hourdis ou les voiles verticaux.

Dans les portiques, on a constaté la présence de nombreuses fissures perpendiculaires à la précontrainte dans les zones de changement de section, le décachetage de quelques câbles et des égouttures importantes au droit des câbles où la corrosion s'est manifestée.

Il est supposé que les désordres constatés proviennent d'un fractionnement très important des pièces constituant l'ouvrage, des difficultés de leur assemblage qui a entraîné une exécution relativement mauvaise.

De plus, l'étanchéité réalisée sur l'ensemble de l'ouvrage s'est révélée après un ou deux ans particulièrement inefficace et de nombreuses égouttures ont contribué à aggraver les premiers désordres, c'est-à-dire les fissures filiformes relevées dès la fin de la concentration.

Les réparations prévues comprennent une réfection de la chape d'étanchéité et des injections en produits bitumeux ou matières plastiques, pour protéger contre l'oxydation les aciers actuellement à nu ou présumés à nu.

- Cas d'un pont en béton précontraint au-dessus d'une rivière.

La présence de vapeur d'eau dans les gaînes contenant les câbles n'est pas exclue : la gaîne n'a pas été injectée immédiatement après la mise en tension. La tension était différente d'un fil à l'autre, la valeur la plus élevée étant d'environ 90 kg/mm2 pour une tension de rupture garantie des fils de 160 kg/mm2.

Peu de jours après la mise en traction, une série de ruptures furent constatées; elles affectaient les fils les plus sollicités.

On n'a pu déterminer si les ruptures devaient être attribuées à une corrosion ordinaire ou à la corrosion sous tension, mais on suppose que la corrosion au droit des ruptures, est due à la présence de chlorures dont la provenance n'a pu être établie.

- Cas d'un pont en béton précontraint avec poutres en caisson.

Ce type de pont se rencontre fréquemment. Les fils de précontrainte sont situés à l'intérieur des caissons, ils sont en général enrobés complètement par un mortier de ciment. Plusieurs examens d'ouvrages après 10 années de service ont confirmé l'absence de corrosion pour autant que toute introduction d'eau dans les caissons soit évitée, ce qui suppose une bonne efficacité de la chape d'étanchéité en-dessous de la chaussée et pour autant qu'une ventilation naturelle suffisamment intense des caissons soit assurée.

Pour un des ouvrages examinés, ces deux conditions n'étaient pas réunies, une atmosphère très humide règnant en permanence à l'intérieur des caissons. Le mortier d'enrobage des fils de précontrainte présentait en outre des fissures de retrait. Ce mortier a éclaté en plusieurs endroits et les fils se sont recouverts d'une pellicule de rouille de 1 mm d'épaisseur.

Les fils oxydés ont été brossés, l'enrobage a été rétabli et on a créé les ouvertures nécessaires à une bonne ventilation naturelle des caissons.

- Cas d'un pont à poutres multiples.

La nappe supérieure de l'armature assurant la précontrainte transversale d'un pont à poutres multiples sous chaussée a été disposée dans des rainures peu profondes ménagées dans la face supérieure des poutres du tablier. Les câbles n'étaient donc pas placés dans des gaînes ; la couche de roulement en béton a été coulée directement sur les fils.

Après dix années de service, on a découvert que de très nombreux fils de cette armature transversale étaient profondément corrodés : leur section était parfois réduite à la dimension d'une aiguille, certains fils étaient rompus.

Il ne s'agit pas ici d'un phénomène de corrosion fissurante sous tension, mais d'une simple corrosion rongeante due à l'eau qui a traversé la couche de roulement en béton, légèrement fissurée par suite des déformations de l'ouvrage.

- Cas de poutres en béton précontraint supportant des cuves de bain électrolytique.

Ces poutres sont situées dans une usine de fabrication de $KClO_3$ et soumises à des coulures de bain électrolytique de pH compris entre 6,5 et 7. Les containers sont directement posés sur des blocs en béton coulés sur les poutres de 4 mètres de longueur, de 15 x 30 cm de section posées sur des supports locaux en béton en contact avec un plancher également en béton. Le système de précontrainte est un système par adhérence. Les armatures sont constituées de fils de 2 mm de diamètre étirés à froid et d'étriers de 3 mm de diamètre ; le recouvrement des fils est de 20 à 25 mm, celui des étriers de 15 à 20 mm.

Le béton est de bonne qualité, sa résistance à la compression est d'environ 600 kg/cm2.

Les poutres avaient deux ans lorsqu'elles ont été examinées, les dégradations étant apparues sous forme de précipitation de rouille et de fissures. Les dégâts sont principalement localisés sur les surfaces en contact avec les supports de la poutre et les supports des containers. Le béton est fissuré et désagrégé en ces endroits et les armatures sont fortement corrodées.

Les dégradations sont attribuées à une attaque électrochimique due à des fuites de liquide provenant des containers. Les examens ont montré que ces fuites sont à l'origine de ponts de contact au-dessus des isolateurs par l'intermédiaire de dépôts de sels précipités. Les pertes de courant ont été décelées par des mesures de différence de potentiel en plusieurs endroits. Les dommages sont localisés là où des différences importantes ont été mesurées, ce qui semble bien indiquer qu'elles sont les causes de la corrosion.

Une étude est en cours pour prévenir les dégâts de poutres susceptibles d'être soumises à des attaques électrochimiques sévères. Les armatures sont protégées au moyen de membranes en plastic avant bétonnage. Les résultats de cette recherche ne nous sont pas connus. Une autre mesure de protection contre les fuites des réservoirs de bain électrolytique peut consister dans le traitement des faces des poutres à l'aide de matières plastiques.

- Cas de poutres en béton précontraint constituant toiture.

Ces poutres sont situées dans un bâtiment où on traite de l'acier en vue de le rendre superficiellement inoxydable. L'atmosphère contient des gaz provenant des produits chimiques employés (eau régale et acide fluorhydrique). Le béton des poutres n'avait subi aucun traitement préalable en surface. Les caractéristiques de l'acier et du béton sont les mêmes que celles du cas précédent. La construction avait huit ans à l'époque des investigations. Les dégradations dues à la corrosion se sont manifestées sous la forme de précipitations sur la surface des poutres et d'écaillages au droit des étriers. La corrosion des étriers s'est produite dans les poutres situées au-dessus des cuves contenant les produits chimiques. Les dommages sont dus probablement à un recouvrement insuffisant des étriers (1,5 et 5 mm), compte tenu de la présence d'une atmosphère particulièrement agressive contenant notamment du chlore.

- Cas de dalles de toiture au-dessus d'un hall de gare de chemin de fer.

Ces dalles nervurées de 2 cm d'épaisseur, avec nervures de 5 x 5 cm, espacées de 57 cm sont précontraintes à l'aide de torons constitués de deux fils étirés torsadés de 1,5 mm de diamètre et de 200 kg/mm2 de résistance à la rupture, disposés aussi bien dans les nervures que dans la dalle. Quelques étriers ont également été prévus. L'enrobage des torons est de 5 à 8 mm. Le béton a été confectionné partiellement avec du ciment Portland et partiellement avec du ciment alumineux fondu.

Les dégâts se sont manifestés quelques années après la construction : on a constaté que les fils logés dans les dalles confectionnées avec le ciment alumineux étaient corrodés, tandis que ceux logés dans les dalles faites avec du ciment Portland n'ont commencé à se corroder que par après. Le pH du béton déterminé en utilisant la phénolphtaléine comme indicateur était inférieur à 9 sur une profondeur de 7 mm dans le bas du béton de ciment alumineux tandis qu'il n'était inférieur à 9 que sur une profondeur de 2 mm dans le cas du béton de ciment Portland.

Les fils corrodés étaient rompus en de nombreuses sections rapprochées, les parties corrodées étant partiellement de couleurs brune et noire. En d'autres endroits, on pouvait les casser à la main par flexion. Les fils étaient de plus fissurés : fissures et ruptures partaient d'une pointe marquée de corrosion. Les sections de rupture étaient d'abord perpendiculaires à l'axe du fil pour devenir ensuite obliques par rapport à cet axe ; la plage perpendiculaire à l'axe du fil était généralement fortement corrodée.

Les produits de la corrosion contenant du sulfure de fer, on suppose que les fissures se sont produites sous l'action de l'acide sulfurique. La diminution de pH s'étendant jusqu'aux fils dans les dalles confectionnées avec du ciment alumineux est certainement en rapport avec les dégâts dus à la corrosion. La progression plus lente dans la diminution du pH des dalles faites avec du ciment Portland explique les dégradations plus tardives de ces dalles.

Les dalles ont dû être enlevées et remplacées. Les conclusions tirées de ce cas, qui s'est reproduit pour d'autres constructions, sont la nécessité d'interdire l'emploi de ciment alumineux pour les ouvrages en béton précontraint de même que le danger d'utiliser des fils de très faible diamètre et des enrobages de faible épaisseur.

- Cas de poutres précontraintes préfabriquées.

Ces poutres supportent le plafond d'une usine de tissage ; elles sont situées au-dessus des cuves de blanchissage et ainsi soumises à l'action directe de la vapeur; leurs dimensions et les caractéristiques des matériaux ne sont pas connues.

Les aciers de précontrainte dont l'enrobage est de un centimètre ont été corrodés après un an ou deux, aux endroits où la vapeur d'eau agissait de façon intense. On a constaté, au contact de l'acier, de très fortes concentrations d'ions chlore ; lors de la confection des poutres, du $CaCl_2$ avait été utilisé mais en proportion telle que les concentrations de chlorure trouvées près des aciers corrodés ne s'expliquent pas. Il est supposé que sous l'influence de la vapeur d'eau, l'humidité a été l'objet d'une forte migration dans le béton et qu'elle s'est concentrée le long des armatures dont la conductibilité thermique est meilleure que celle du béton.

- Cas de la couverture de hangars d'aviation.

Les poutres principales sont des poutres en béton précontraint comportant des câbles extérieurs situés en grande partie au-dessus du niveau de la

toiture. Ces câbles, exposés directement aux intempéries, ont été enrobés d'un mortier riche en ciment, dont l'exécution a été très mal soignée ; le recouvrement des fils variait de 0,1 à 5 cm.

On a constaté après une dizaine d'années, quatre ruptures de fils très localisées. Il s'agissait de quatre fils supérieurs d'un câble au droit de son passage à travers un raidisseur faisant saillie sur l'âme de la poutre principale.

Dans cette zone d'accès difficile, l'enrobage avait été exécuté sans soin et la stagnation d'eau au contact des fils était possible.

Les ruptures se sont présentées avec striction comme celles de l'acier doux, les lèvres se trouvant après rupture, à une distance de 1,5 cm l'une de l'autre. Cette striction semble avoir été rendue possible par l'augmentation progressive des tensions suite à la diminution lente de section au fur et à mesure de la progression de la corrosion. En d'autres endroits, de fortes oxydations des fils furent constatées sous l'enrobage.

- Cas d'une conduite d'adduction d'eau de 900 mm de diamètre.

Les tuyaux sont constitués par un noyau en béton confectionné à l'aide de ciment Portland à haute résistance et centrifugé. Ce noyau de 6,5 cm d'épaisseur est précontraint longitudinalement par 18 tirants constitués de barres de 7 mm de diamètre en acier tréfilé à 110/120 kg/mm2. Il est en outre précontraint transversalement par une armature constituée de fils de 5 mm de diamètre en acier tréfilé dont la résistance à la rupture est de 160 kg/mm2 et enroulée sous une tension de traction d'environ 90 kg/mm2. Une protection extérieure des fils est réalisée par un revêtement en béton fin confectionné à l'aide de ciment métallurgique et mis en place dans un moule vertical par le procédé "Vacuum concrete" ; aucune addition de $CaCl_2$ n'a été faite.

Les tuyaux ont été entreposés pendant 6 mois dans des prairies ; ils ont ensuite été enfouis pendant 10 ans dans un sol légèrement acide, dont le pH était compris entre 4,8 et 7,3 ; une protection cathodique a été réalisée.

Après 6 mois d'entreposage, des ruptures de fils ont été constatées aux extrémités de certains tuyaux, dans les régions en contact avec le sol. Après 10 ans , on a constaté des cassures réparties dans tous les tuyaux enterrés.

Les dégradations après 6 mois consistent en des ruptures des spires d'about de l'armature transversale avec éclatement du béton d'enrobage : les fissures sont normales à l'axe du fil. La couche de béton d'enrobage s'est avérée trop mince, 10 à 12 mm au lieu de 20 mm prévus ; les cassures correspondent en outre à des emplacements de nids de gravier dans le revêtement.

Après 10 ans, on a constaté des ruptures des fils au cours de l'enlèvement de plusieurs tuyaux. Pour l'un deux, on a noté l'apparition de 11 spires rompues au moment de l'extraction de la fouille. Le béton d'enrobage était sans consistance et les fils tantôt corrodés, tantôt intacts. Certains fils présentaient des fissures transversales mais souvent aucun signe extérieur n'annonçait la rupture.

Les dégradations après 6 mois sont attribuées à la corrosion fissurante sous tension provoquée par les produits de décomposition du gazon ou de certains éléments du sol, là où le revêtement de protection était d'épaisseur insuffisante ou poreux.

La remise en état a consisté en un enduisage par un produit passivant des fils mis à nu, par la réalisation d'un enrobage de 25 mm d'épaisseur et par le rétablissement de la protection cathodique.

Certaines des dégradations observées après 10 ans sont dues à des séquelles de la corrosion fissurante ayant agi à 6 mois.

- Cas de tuyaux en béton précontraint servant de conduites d'eau.

Ces tuyaux de 90 mm d'épaisseur et de 1,30 m de diamètre sont constitués par un noyau sur lequel on a enroulé une armature de précontrainte couverte ensuite d'une couche de béton de 32 mm d'épaisseur . Lors de l'enroulement, les fils ont été étirés de façon telle que leur diamètre passe de 7 mm à 6,9 mm. La tension de rupture de ces fils est de 150 kg/mm2.

Le noyau présentait des défauts qui furent réparés à l'aide d'un béton auquel on avait mélangé un accélérateur de prise contenant du chlorure de calcium, du chlorure d'ammonium et des sels d'ammonium.

Les tuyaux étaient entreposés à ciel ouvert. Les dégâts apparurent longtemps après la fabrication. On a observé une série de ruptures de fils aux endroits où le noyau avait été réparé, ailleurs, les fils étaient intacts. A l'emplacement des réparations, les fils portaient des stries parallèles à la direction de la tension et des zones corrodées, les ruptures ne se situant pas nécessairement à l'emplacement des endroits corrodés.

Les ruptures se sont produites sans déformation ; les cassures sont le plus souvent planes et paraissent transcristallines.

Les dégâts sont attribués à la formation d'agents corrosifs au contact du béton normal et du béton de réparation contenant du $Ca\,Cl_2$.

- Cas des ancrages d'une turbine dans le rocher d'une caverne.

Les ancrages sont constitués de 15 fils de précontrainte de forme ovale et de 30 mm2 de section. Ces fils à empreintes présentent une tension de rupture de 163 kg/mm2 et une limite élastique à 0,2 % de 151 kg/mm2. Ils sont laminés et traités thermiquement. Il est probable que la tension maximum dans les parties courbes des fils était égale à la limite élastique.

Les extrémités des fils se terminent en forme de coin en vue de leur ancrage dans un anneau cônique. Sur une longueur de 50 cm, les fils sont rassemblés en double botte de 15 et de 25 mm de diamètre. La cavité du rocher dans laquelle les fils sont placés est sujette à des infiltrations d'eau ne contenant aucune substance agressive si ce n'est de très faibles teneurs en chlors.

Pour protéger les fils contre la corrosion, on les a enduits individuellement d'une couche de bitume à froid avant leur assemblage en bottes. Les extrémités des fils n'ont pas reçu de couche de bitume afin d'éviter des glissements dans les ancrages. Après leur assemblage en bottes, les fils furent recouverts d'une triple protection constituée par trois couches de gaze enduites de bitume à chaud, la gaze avait été traitée à l'aide de produits bactéricides.

Après la mise en tension et la fixation, la plaque d'ancrage fut enduite de bitume. Les dégâts se sont produits 10 et 20 mois après la mise en précontrainte. Des contrôles exercés à l'aide d'un vérin ont montré que dans certains ancrages, l'effort de précontrainte était tombé à zéro tandis que dans d'autres, il était réduit à quelques tonnes. Sur 25 ancrages contrôlés, 17 étaient défectueux. On a constaté des ruptures de fils sur la longueur de l'ancrage, mais la plus grande partie des ruptures se sont présentées au voisinage ou dans les têtes d'amarrage extérieures au rocher.

L'isolation à l'aide de gaze enduite de bitume était arrachée derrière la tête d'ancrage tandis que la couche de bitume entourant la surface de l'acier était poreuse et perméable, voire localement inexistante. En certains endroits, on a observé de légères traces de rouille tandis qu'en d'autres la corrosion était profonde et étendue. Les zones de rupture des fils ne présentent aucune striction ; la section de rupture est plane et perpendiculaire à l'axe du fil.

Des fissures ont aussi été observées ; pour elles comme pour certaines ruptures, l'origine était un point de corrosion superficielle. Des essais effectués sur des morceaux de fils prélevés ont montré une diminution de la résistance à la rupture.

La cause des dégradations est donc imputée à la corrosion et aux concentrations de tensions qu'elle engendre.

Les causes de la corrosion ne sont pas clairement établies. Les faibles teneurs en chlore contenues dans l'eau n'auraient pu être nuisibles pour l'acier que si on admet que cette substance ait pu se concentrer à la surface des fils. Aucune substance nuisible n'a été trouvée dans les matières isolantes.

Les défauts locaux de la couche de bitume à froid ont pu provoquer une concentration de la corrosion. On a effectivement constaté des points de corrosion aux endroits où la couche de protection présentait de petits défauts.

- Cas de deux ponts franchissant une rivière.

Un de ces ponts est situé au voisinage de sources chaudes. La précontrainte est réalisée à l'aide de câbles du type Freyssinet de 12 ∅ 5 mm en acier patenté et tréfilé sans revenu, injectés après mise en tension. Le béton est de très bonne qualité, sa résistance sur cylindre dépassant 600 kg/cm2 ; l'ouvrage ne présente pas de fissures. Le béton du pont situé près de la source chaude est protégé par une couche de bitume qui s'est détériorée dans le temps. Lors d'une inspection effectuée sept ans après la construction, on a constaté l'absence d'injection de certains câbles. Malgré ce défaut les fils ne présentaient qu'une oxydation superficielle, accompagnée de points noirs et de quelques rares piqûres. Dans les câbles qui avaient été injectés, les fils étaient parfaitement adhérents au mortier d'injection et exempts de traces de corrosion, malgré quelques défauts locaux d'injection constitués par un manque de remplissage des canaux aux endroits où les fils étaient en contact.

- Cas d'un pont d'autoroute.

Il s'agit d'un pont précontraint à l'aide de barres de 3/4" de diamètre. Cinq mois après la construction, on a constaté la rupture de 44 barres sur un total de 180, suivie de l'effondrement du pont. Les ruptures de barres sont des ruptures fragiles dues à la corrosion sous tension. Les essais effectués sur des barres prélevées dans l'ouvrage ont montré une diminution de 10 % de la résistance et une réduction considérable des allongements à la rupture. La corrosion a débuté avant la mise en oeuvre des armatures, lors du transport par mer et lors du stockage à même le sol, sous la pluie. Les barres corrodées ne s'étaient pas rompues lors de leur mise en tension à $0,7\,\sigma_{max.}$; la corrosion a pu se développer dans l'ouvrage par suite des défauts d'injection: 50 % de la surface des barres se trouvaient sans protection, en atmosphère marine et semi-industrielle.

- Cas d'une dalle de route.

Ce dernier cas concerne des ruptures fragiles de câbles de précontrainte dans une dalle de route : ces câbles étaient logés dans des gaînes plastiques non injectées. Après 6 ans d'exploitation le béton des dalles s'est désagrégé et a provoqué des ruptures de gaînes. On n'a pas constaté, jusque-là, de pertes importantes de précontrainte. Peu de temps après les ruptures des gaînes, 90 % des câbles se sont rompus, par suite d'une corrosion sous tension en présence d'humidité et d'acides humiques , qui ont créé une différence de potentiel importante entre les parties isolées des câbles et les parties non protégées par suite de la rupture des gaînes.

Les cas qui précèdent ne peuvent, en raison de leur nombre peu élevé, représenter l'ensemble des problèmes de corrosion des armatures de précontrainte. C'est pourquoi, il nous a paru utile de signaler au paragraphe suivant, quelques travaux récents traitant de ces problèmes.

4.3.3. Informations bibliographiques.

Plusieurs aspects théoriques et pratiques des problèmes de corrosion des aciers de précontrainte ont été développés lors du 5e Congrès de la FIP à Paris en 1966. Une partie des études de l'A.S.P. en 1964, 1967 et 1968 a été consacrée à la corrosion des armatures de précontrainte.

Parmi les études présentées, deux problèmes nouveaux ont été soulevés.

Le premier problème est relatif à deux cas d'accidents survenus à des constructions précontraintes dans lesquelles des ruptures fragiles de câbles sont attribuées à des effets de piles qui se produisent au contact des fils et des gaînes traitées au zinc. Les opinions sont partagées à ce sujet et les recherches du Professeur BERTHIER montrent que cette différence de potentiel est trop faible pour provoquer la fragilisation des aciers dans les conditions les plus sévères. Cependant, des cas analogues ont été signalés au Danemark (Symposium de la FIP - Madrid 1968).

Le second problème est celui de l'utilisation d'armatures galvanisées pour lesquelles on a également signalé, en Allemagne, des ruptures fragiles. Les avis sont également partagés et le problème ne semble pas encore être résolu.

La Commission "Durabilité des Constructions Précontraintes" de la FIP a étudié une large documentation traitant de l'influence, sur la corrosion des aciers de précontrainte, de la galvanisation des armatures et des gaînes, ainsi que de l'emploi des ciments sursulfatés et alumineux et du chlorure de calcium dans le béton ou dans les mortiers d'injection.

A la suite de ses travaux, cette Commission a été amenée à recommander, jusqu'à nouvel ordre, d'éviter toute utilisation de ces matériaux dans les constructions précontraintes.

Plus récemment encore, les problèmes de corrosion des armatures de précontrainte ont été abordés au Symposium de la FIP à Madrid en juin 1968. Signalons notamment deux rapports présentés à ce Symposium et tout d'abord, celui de M. R. KOWALCZYK qui traite des résultats des examens effectués sur 9.000 éléments porteurs dans 500 bâtiments construits entre 1956 et 1966. Ces examens montrent que 92 % des canaux ou gaînes ont été correctement injectés. On n'a constaté de défauts d'injection que dans 8 % des cas examinés, sans relever en général de traces significatives de corrosion. Ce n'est que dans quelques éléments seulement qu'on a constaté des dégâts importants dus à la corrosion. Les cas de corrosion sont plutôt dus à la mauvaise qualité du béton de remplissage des joints. La corrosion est attribuée à la condensation de l'eau sur des éléments de toiture composés de plusieurs tronçons assemblés par précontrainte. Le type de corrosion le plus couramment cité est la corrosion rongeante et les piqûres.

Les défauts de construction les plus courants sont les mauvais remplissages de joints par le mortier, la fissuration de ces joints et l'injection incomplète.

L'efficacité de la protection de câbles extérieurs a été également examinée ; on constate que la plupart de ces câbles sont mal protégés par suite de la fissuration de retrait du mortier d'enrobage et par suite des éclatements de cet enrobage sous l'action du gel. Les câbles intérieurs sont mieux protégés.

Signalons ensuite le rapport de M. S. KAJFASZ qui étudie l'influence, sur

la corrosion, de la fissuration du mortier d'injection dans les gaînes ; il conclut que ces fissures n'influencent pas la corrosion des armatures, même dans des conditions très sévères.

Dans une étude récente intitulée "Corrosion and Corrosion Protection of tendons in prestressed concrete bridges", R.SZILARD donne un aperçu de l'état actuel des connaissances relatives à la corrosion dans les ponts précontraints. L'auteur y cite les causes de corrosion observée dans plusieurs ouvrages et énumère les moyens et les précautions à prendre pour éviter les dégradations par corrosion.

Les principales conclusions et recommandations sont les suivantes:
"Dans la plupart des cas, un béton ou un mortier d'injection ayant de bonnes qualités d'imperméabilité peut fournir une excellente protection des aciers de précontrainte en ambiance corrosive, pour autant que certaines conditions soient satisfaites.

L'effet de protection du béton ou du mortier peut être attribué à sa forte alcalinité, à son imperméabilité, à l'absence relative de fissuration et à sa résistance électrique.

La corrosion de l'acier de précontrainte, comme la corrosion de tous les métaux, est un phénomène physico-chimique qui n'apparaît qu'en présence des 4 conditions suivantes:

- humidité à la surface de l'acier, agissant comme électrolyte ;
- différence de potentiel électrique ;
- présence d'oxygène dans la région cathodique ;
- possibilité de dissolution anodique de l'acier.

Les conditions favorisant la corrosion sont les suivantes:

- présence de sels dans le béton ou le mortier d'injection ;
- présence de substances chimiques agressives dans le milieu ambiant ;
- ambiance humide mais non saturante du béton ou du mortier ;
- porosité du béton ou du mortier ;
- présence de vides entre le béton (ou le mortier) et l'acier ;
- enrobage insuffisant ou défauts d'injection ;
- dégradations causées par l'acier lors du transport, du stockage ou de la mise en oeuvre.

L'auteur propose un certain nombre de recommandations générales et de mesures à prendre en vue d'éviter la corrosion des armatures :

- utilisation d'un emballage adéquat pour le transport des armatures (notamment pour le transport par mer). L'emploi d'une huile soluble comme protection est fortement recommandé ;
- durée de stockage des aciers réduite au minimum, dans des entrepôts secs en évitant tout contact avec le sol ;
- bétonnage ou injection aussi rapide que possible après mise en tension des fils.

L'enrobage de béton ne procure une protection efficace contre la corrosion que si le béton est de haute qualité, compact, imperméable, durable et homogène. Il est recommandé notamment:

- d'utiliser un ciment portland ou portland + pouzzoland ;
- de réaliser un rapport E/C voisin de 0,4 ;
- de n'utiliser que des matériaux exempts de substances chimiques agressives ;
- d'utiliser des graviers et des sables de bonne granulométrie ;

- d'éviter l'emploi d'adjuvants non éprouvés, en dehors des plastifiants et entraineurs d'air ;
- de ne mettre en oeuvre que des aciers propres, exempts de rouille ;
- de réaliser, dans le cas d'une ambiance chimiquement agressive, un enrobage minimum de 2" 1/2 ;
- d'éliminer la possibilité de passage de courants vagabonds dans les armatures ;

En ce qui concerne l'injection ou la technique d'injection, l'attention des praticiens est attirée sur les points suivants:

- une injection est toujours nécessaire sauf dans le cas d'une précontrainte par câbles extérieurs, où des mesures spéciales de protection doivent être prises ;
- emploi d'un ciment portland ;
- l'emploi d'agrégats doit être réservé uniquement pour l'injection des gaînes de grande dimensions, à raison de 30 % en poids de ciment ;
- le rapport E/C doit être de l'ordre de 0,4 ;
- l'emploi de plastifiants ou d'entraineurs d'air est recommandé ;
- éviter l'emploi de bétonnières traditionnelles pour réaliser les mélanges d'injection ;
- effectuer les injections aussitôt que possible ;
- éviter les injections à l'air comprimé".

Il est intéressant également de rappeler les idées du Professeur LOBRY de BRUYN concernant les problèmes de corrosion dans les constructions précontraintes :

"Les fils tréfilés patentés sont moins sensibles à la corrosion que les fils laminés, tempés et revenus, non seulement en raison des différences de structure mais encore en raison de la différence d'état de surface des deux types de fils.

Des ruptures de fils sont en général susceptibles de se produire dans les circonstances suivantes :

- lorsque, à la suite d'une attaque par corrosion, la surface du fil est piquée ;
- certains corps chimiques dans le voisinage du fil, particulièrement les nitrates, peuvent engendrer une corrosion intercristalline sous tension au cours de laquelle l'attaque par corrosion se produit aux joints des cristaux. Les tensions mécaniques entraînent une extension de l'attaque; il s'en suit une formation de véritables fissures.
  La rupture de l'acier provient d'une interaction des deux phénomènes.
- Parmi d'autres substances agressives, l'hydrogène sulfuré peut rendre l'acier fragile. L'attaque de l'acier par l' H_2S dégage de l'hydrogène à l'état atomique ; celui-ci pénètre à l'intérieur de l'acier où la transformation de l'état atomique à l'état moléculaire crée des tensions internes causant la fragilisation de l'acier (phénomène de fragilisation de l'acier par l'hydrogène).

La corrosion par piqûres des fils, observée notamment lorsque le béton contient des chlorures et lorsque les fils sont recouverts d'une couche relativement mince de béton, peut s'expliquer comme suit:

l'hydroxyde de calcium, qui se forme par suite d'une réaction lors de la fixation du ciment, stabilise le film d'oxyde naturel à la surface de l'acier et provoque ainsi un effet anti-corrosif. Cependant, les chlorures détruisent

ce film protecteur et des centres de corrosion anodiques ou "foyers" se constituent dans le béton aux endroits où les conditions locales de ventilation sont médiocres.

On constate que le phénomène de piqûre se manifeste essentiellement sur les faces inférieures des fils là où, par suite de la vibration du béton, il se forme des cavités aqueuses. On a également constaté que le risque de voir apparaître des zones profondément piquées diminue au fur et à mesure que l'on épaissit la couverture de béton.
En général, les fils en immersion permanente subissent moins de corrosion que des fils immergés périodiquement ; dans le ler cas l'oxygène accède en effet plus difficilement à la surface du fil.

La corrosion intercristalline sous tension des fils de précontrainte n'est pas fréquente car ce genre de corrosion n'est dû pratiquement qu'à la présence de nitrates. Les chlorures ne sont pas susceptibles d'entraîner ce type de corrosion. Les sulfates, les phosphates et les solutions diluées de plusieurs acides et alcalis ne provoquent pas davantage de fissures par corrosion intercristalline dans les fils d'acier sous tension.

La fragilisation des fils de précontrainte sous l'action de l'hydrogène est surtout provoquée par la présence d'hydrogène sulfuré soit dans l'atmosphère des régions industrielles ou des régions agricoles, soit dans le liant utilisé dans certains bétons.

Un ciment alumineux qui, dans certains cas, peut contenir des quantités considérables de sulfure subit dans le temps une modification destructrice de sa structure. Il se forme dans le béton des pores relativement importants, au travers desquels le CO_2 présent dans l'atmosphère peut pénétrer jusqu'aux fils et libérer une certaine quantité de sulfure d'hydrogène du béton voisin. L'action de l'hydrogène sulfuré se combine à celle de l'humidité pour rendre l'acier fragile.
De tels dégâts peuvent n'être qu'une conséquence d'une instabilité de structure du ciment alumineux durci.

L'hydrogène sulfuré est probablement l'agent corrosif le plus dangereux pour les fils de précontrainte.

4.3.4. Conclusions.

Bien que le nombre de cas décrits dans les réponses à l'enquête soit insuffisant pour permettre de tirer des conclusions générales sur la corrosion du béton précontraint, on peut néanmoins en retenir quelques renseignements précieux quant aux mesures essentielles à prendre pour éviter les dégradations:

- les aciers utilisés doivent être exempts de toute trace de corrosion ;
- les enrobages doivent être suffisamment importants et bien exécutés ;
- les bétons et mortiers ne peuvent contenir aucun agent susceptible d'entraîner la corrosion des armatures ;
- les bétons doivent être compacts et protégés efficacement contre l'action des atmosphères agressives.