Société canadienne d'hypothèques et de logement

Canada Mortgage and Housing Corporation

DÉTÉRIORATION DES GARAGES DE STATIONNEMENT ÉTAGÉS CONSIDÉRATIONS SUR L'ÉTENDUE, LES CAUSES ET LA RÉPARATION

SCHL Question habitation, comptez sur nous

DÉTÉRIORATION DES GARAGES DE STATIONNEMENT ÉTAGÉS CONSIDÉRATIONS SUR L'ÉTENDUE, LES CAUSES ET LA RÉPARATION

DÉTÉRIORATION DES GARAGES DE STATIONNEMENT ÉTAGÉS CONSIDÉRATIONS SUR L'ÉTENDUE, LES CAUSES ET LA RÉPARATION

Préparé à l'intention de la
Division de la recherche
Secteur de la recherche et de l'élaboration de propositions
Société canadienne d'hypothèques et de logement

par

SUTER KELLER INC.
Ingénieurs-conseils en structures
Ottawa

31 mars 1986

Expert-conseil principal: M. G.T. Suter, ing.
Suter Keller Inc.
Directeur de projet SCHL: M. Alvin J. Houston

Division de la recherche

Le présent rapport financé par la Société canadienne d'hypothèques et de logement n'exprime que l'opinion personnelle des auteurs et n'engage pas la responsabilité de la Société.

Remerciements

L'auteur tient à remercier les personnes suivantes qui ont collaboré à l'élaboration du présent document:

MM. K.H. Thompson (TPC), G.G. Litvan (DRB, CNR) et J.A. Bickley (Trow Ltd.) pour la révision;

M. F.E. Plimmer (SCHL) pour le schéma d'analyse de coût global et les données de prix de revient;

M. D. Morgan pour les photographies qui faisaient partie d'un projet de dernière année d'ingénierie à l'Université Carleton sous la direction de M. Suter;

MM. D. O'Neal (Ottawa Structural Concrete Services Ltd.), G. Blain (Magus Restoration Ltd.) et T. Nicholas (Golder Associates) pour leur coopération sur les lieux; et,

M. D. Nixon (TPC) pour les ouvrages de référence.

Table des matières Page

RÉSUMÉ À L'INTENTION DE LA DIRECTION.....iv

1.0 INTRODUCTION.....1

1.1 Historique.....1
1.2 La situation au Canada.....2
1.3 Portée.....3

2.0 TYPES DE DÉTÉRIORATION ET CAUSES

2.1 Vue d'ensemble du problème.....3
2.2 Détérioration due à la corrosion.....4

2.2.1 Protection de l'armature.....4
2.2.2 Principes de la corrosion.....4
2.2.3 Facteurs agissant sur la vitesse de corrosion.....6
2.2.4 Détérioration due à la corrosion.....10

2.3 Fissuration.....10
2.4 Lixiviation.....12
2.5 Écaillage.....12
2.6 Autres composants.....13

3.0 ÉVALUATION DE L'ÉTENDUE DE LA DÉTÉRIORATION.....13

3.1 Méthode générale d'investigation.....13
3.2 Phase I de l'investigation préliminaire.....15
3.3 Phase II de l'investigation détaillée.....15

3.3.1 Examen du délaminage.....16
3.3.2 Enrobage de béton.....16
3.3.3 Étendue de la corrosion - Mesure à l'aide d'électrodes.17
3.3.4 Perméabilité du béton.....17
3.3.5 Niveau de chlorure.....19
3.3.6 Qualité du béton.....19
3.3.7 Équipement de mesure de la résistance électrique.....19
3.3.8 Pente des dalles et avaloirs.....19
3.3.9 Présentation des données.....19

4.0 OPTIONS ET TECHNIQUES DE RÉPARATION.....20

4.1 Programme de réparation.....20
4.2 Aspect structural dans un programme de réparation.....20
4.3 Aspect fonctionnel dans un programme de réparation.....25
4.4 Options de réparation.....25
4.5 Techniques de remise en état.....26

4.5.1 Enlèvement du béton.....26
4.5.2 Préparation de l'armature.....26
4.5.3 Remplacement du béton.....26

4.5.4 Traitement de la surface.....27
4.5.5 Protection cathodique.....29

4.6 Évaluation de l'efficacité des méthodes de réparation.....30
4.7 Représentation photographique.....30

5.0 MÉTHODES D'INSPECTION ET D'ENTRETIEN.....30

6.0 QUESTIONS ÉCONOMIQUES.....41

6.1 Vue d'ensemble.....41
6.2 Estimation des coûts.....42

ANNEXE A: Ordre chronologique des étapes de détérioration des garages de stationnement étagés.....49

ANNEXE B: Liste de vérification de l'état d'un garage de stationnement étagé.....53

BIBLIOGRAPHIE.....60

RÉSUMÉ À L'INTENTION DE LA DIRECTION

INTRODUCTION

Ce rapport donne une vue d'ensemble des aspects les plus importants de la détérioration des garages de stationnement étagés sous l'action de la corrosion due à une exposition répétée aux sels de déverglaçage des chaussées et à l'humidité. Il contient aussi une évaluation des options de réparation et d'entretien des garages de stationnement multi-étages souterrains, en béton armé coulé sur place, qui eux surtout nécessitent d'importants programmes de réparation pour corriger leurs défauts. Ce document prétend servir de référence pour les auditoires techniques qui ne sont pas encore très au courant du problème de la détérioration et fait appel aux données provenant des deux études canadiennes précédentes faites sur les lieux.

PORTÉE

Les questions-clés abordées dans ce rapport sont:

- les causes de la détérioration et des exemples
- les facteurs agissant sur la vitesse de corrosion
- les techniques d'évaluation de l'étendue de la détérioration
- les options et méthodes de réparation courantes
- les méthodes d'inspection et d'entretien
- les questions économiques.

CONSTATATIONS

Causes de la détérioration et facteurs d'influence

La cause principale de la détérioration des garages de stationnement étagés en béton armé est attribuée à la corrosion de l'armature. La corrosion résulte de la présence combinée dans le béton, d'humidité, d'oxygène et de chlorures ioniques issus des sels de déverglaçage des chaussées. Sous l'effet de la corrosion, l'armature attaquée augmente de volume par rapport à l'armature saine, entraînant la fissuration du béton. Cette fissuration permet à l'eau de s'infiltrer davantage dans le béton, ce qui cause des problèmes supplémentaires de durabilité comme les épaufrures et l'écaillage, et aggrave les problèmes de maintien en état imputables notamment à la coloration, à la lixiviation et au passage de l'eau à travers la dalle.

Bien que la cause dominante de la détérioration des garages de stationnement étagés s'explique par la corrosion de l'armature d'acier attribuable aux sels de déverglaçage, d'autres facteurs contribuent à leur détérioration prématurée comme les pentes d'écoulement inadéquates, les avaloirs détériorés, l'encastrement des canalisations électriques et les programmes d'entretien déficients.

Programme d'investigation

Nous proposons un programme d'investigation préféré pour déterminer l'étendue de la détérioration et ses causes. Cette façon de procéder comporte deux

phases: d'abord un examen visuel pour se rendre compte de l'étendue des défauts et de leurs conséquences pour la structure et ensuite une évaluation quantitative et détaillée des dommages. Les techniques fondamentales d'investigation sur les lieux comprennent:

- une recherche du délaminage par la méthode de la chaîne traînée
- un examen de l'enrobage de béton à l'aide d'un pachomètre
- une évaluation de la corrosion par la mesure à l'aide d'électrodes.

Un tableau ci-inclus résume les paramètres d'essai sur les lieux et en laboratoire, ainsi que les normes de référence applicables. Dans les cas où il est difficile ou peu pratique d'appliquer une méthode analytique d'évaluation de la résistance de la dalle, on peut envisager un essai de charge. La liste de vérification, à l'annexe B, peut servir de guide pour juger de l'état d'un garage de stationnement étagé.

Programmes de réparation

Ce rapport présente différentes options de réparation et des techniques de remise en état détaillées point par point. Bien qu'il faille considérer chaque cas distinctement, la plupart des procédures de réparation peuvent comprendre:

- l'enlèvement du béton détérioré
- le nettoyage de l'armature et son remplacement, s'il y a lieu
- le remplacement du béton
- le traitement de la surface

Il décrit aussi différentes méthodes de traitement de la surface, y compris des revêtements pour béton modifié comprenant des additifs à base de polymères ou d'époxydes et des écrans de protection par membrane ou par bouche-pores.

Questions économiques

Nous proposons une technique d'estimation du coût global applicable à tout un éventail de cas pour parvenir à une solution de réparation efficiente. Nous établissons une comparaison entre le prix global de réparation d'une structure avec un bouche-pores et avec une membrane.

CONCLUSION

Plusieurs variables influent sur les coûts de réparation des garages de stationnement étagés. Des variables comme la configuration du garage, les détails de la structure, les détails d'utilisation, le financement et l'absence de données de comportement à long terme sur les écrans de protection, font qu'il est difficile d'établir des principes particuliers relatifs au coût de réparation. Des programmes d'entretien périodique se révèlent efficients en raison des dommages et des pertes de revenu moindres. Le ravalement des écrans de protection, des avaloirs en bon état et l'élimination du sel par le lavage du sol sont des facteurs importants dans la prévention d'une détérioration précoce. L'annexe A résume les travaux importants de recherche et d'amélioration des codes visant à accroître la durabilité des garages de stationnement étagés.

1.0 INTRODUCTION

1.1 Historique

Ce rapport prétend être un document de référence qui présente une vue d'ensemble des aspects les plus importants de la détérioration des garages de stationnement étagés. Il traite principalement des problèmes liés à la détérioration des garages de stationnement multi-étages souterrains, en béton armé coulé sur place. La corrosion est causée par l'interaction électrique des chlorures, de l'oxygène et de l'eau sur l'armature en acier. Ces chlorures peuvent pénétrer le béton à partir des sels de déverglaçage ou lui avoir été incorporés sous forme d'adjuvant. Ce rapport n'est pas exhaustif du point de vue théorique. L'accent est mis sur les concepts fondamentaux les plus importants pour un auditoire technique qui ne serait pas encore très au courant du problème.

Le document commence par examiner les causes premières de la détérioration des garages de stationnement étagés - pourquoi les structures de béton qui devraient normalement protéger contre la corrosion sont-elles particulièrement vulnérables à la pénétration des chlorures? Cette appréciation est suivie d'une revue des méthodes qui ont été élaborées pour déterminer l'étendue des dommages. Ensemble, ces sections servent de fondement aux chapitres suivants qui traitent des différentes options de réparation, ainsi que des méthodes d'entretien continu et d'inspection. Les questions économiques sont ensuite abordées pour servir d'introduction à l'efficience des travaux de réparation et d'entretien des garages de stationnement étagés.

Il s'agit là de la troisième étude entreprise par la SCHL sur la détérioration des garages de stationnement étagés. Les deux premières menées par M. J.A. Brickley de Trow Ltd. ont été respectivement publiées en 1981 et 1984. Celle de 1981, intitulée "Nature, Extent and Impact of Residential Parking Structure Deterioration" (Nature, étendue et conséquences de la détérioration des garages de stationnement résidentiels) traitait principalement des répercussions économiques de la détérioration de ces garages. Les données de ce rapport provenaient du relevé et de l'analyse des problèmes rencontrés dans 84 garages de stationnement étagés d'Ottawa, qui étaient pour la plupart chauffés. Cette étude avait amené les conclusions suivantes:

- il aurait fallu environ 10,75 millions de dollars (1981) pour réparer ces 84 garages, soit un coût moyen approximatif de 1 200 dollars par place de stationnement

- même alors, une analyse financière confirmait qu'à long terme, des réparations de haut niveau seraient revenues bien moins cher que des réparations plus superficielles, mais au départ moins coûteuses.

L'étude de 1984, intitulée "Parking Structure Deterioration: A Survey and Analysis of its Extent and Influencing Factors" (Détérioration des garages de stationnement étagés: relevé et analyse de son étendue et des facteurs d'influence) portait principalement sur les aspects techniques de la

détérioration de ces garages. Cette étude tentait de caractériser les facteurs qui jouaient en faveur du maintien en état des garages de stationnement étagés. En outre, elle essayait d'évaluer l'efficience des mesures de réparation en contrôlant l'efficacité des différentes méthodes de réparation. Les données provenaient essentiellement de garages de stationnement étagés en béton armé, chauffés. Cette étude avait amené les conclusions suivantes:

- il serait possible de construire des garages de stationnement étagés durables, en prêtant l'attention voulue aux détails de conception, de construction et d'entretien empêchant les sels de rejoindre l'armature.

- il serait possible de remettre en état les garages existants, mais une détérioration ultérieure est inévitable, à moins d'enlever tout le béton contaminé par le chlorure

- la vitesse de détérioration après les réparations peut être bien plus faible qu'avant les réparations, à condition que le remplacement du béton soit bien fait.

Le présent document reprend les points-clés de l'étude de 1984 et les complète pour donner un meilleur aperçu de la détérioration et de la réparation des garages de stationnement étagés.

1.2 La situation au Canada

La détérioration des grands garages de stationnement étagés s'est révélée pour la première fois vers la fin des années 70 et a proliféré en moins d'une décennie. Aucune étude particulière n'a tenu compte des effets du sel de déverglaçage, utilisé différemment selon les régions, sur la vitesse de cette détérioration. Puisque la cause première de la détérioration est due à la corrosion provoquée par ce sel, on s'attendrait à des vitesses de corrosion supérieures dans les régions où on en utilise beaucoup.

Le coût global des réparations des garages de stationnement étagés au Canada se situerait entre 1,5 et 3 milliards de dollars et les études ont fait ressortir que dans certains cas le coût de réparation pouvait excéder le coût initial de construction du garage.

Actuellement, des représentants de l'industrie de la construction, des concepteurs et des comités techniques unissent leurs efforts dans le dessein de trouver une solution à la détérioration des garages de stationnement existants. En 1983, un comité a été chargé de rédiger la norme CSA S413M, "Durable Parking Structures". Cette norme, qui devrait être publiée en 1986, traite particulièrement de la conception et de la construction de garages de stationnement étagés durables.

L'annexe A donne une liste chronologique des travaux importants de recherche et d'amélioration des codes.

1.3 Portée

Ce document est axé sur l'évaluation et la réparation des garages de stationnement souterrains, en béton armé coulé sur place, chauffés, qui sont faits de dalles suspendues. La vitesse de détérioration de ces garages est généralement supérieure à celle des autres, à cause d'un plus gros dépôt de sel provenant de la neige fondue, des effets de l'humidité, et du caractère cyclique du mouillage. En outre, les réparations peuvent être plus difficiles et plus coûteuses en raison de l'accès restreint, des horaires de travail limités, et d'une perte de revenu accrue pendant la durée des réparations. En général, les concepts relatifs aux causes de détérioration et aux techniques d'évaluation s'appliquent à d'autres formes de construction. Cependant, chaque cas doit être considéré individuellement quant à l'étendue des dommages structuraux et à la meilleure façon de procéder aux réparations.

2.0 TYPES DE DÉTÉRIORATION ET CAUSES

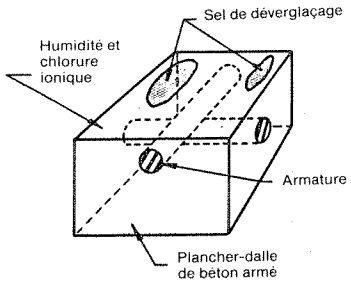
2.1 Vue d'ensemble du problème

Les garages de stationnement étagés sont soumis à des conditions d'utilisation astreignantes. Celles-ci comprennent les effets de surcharge comme l'impact des véhicules et l'abrasion, aussi bien que les effets environnementaux comme le degré d'humidité élevé, les variations de température et l'attaque par les sels de déverglaçage. Tous ensemble, ces facteurs peuvent conduire à une détérioration prématurée des garages de stationnement étagés, même lorsqu'ils ont été construits conformément aux codes du bâtiment en vigueur. Cette partie du rapport examine les types de détérioration les plus importants et leurs causes, qui dépendent généralement de nombreux facteurs intimement liés comme la composition du béton, les propriétés des matériaux, la qualité d'exécution des travaux et les méthodes d'entretien.

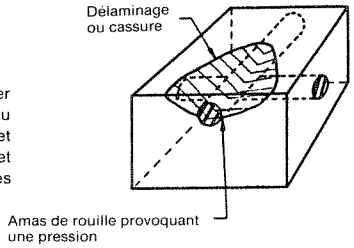
L'armature en acier de construction est protégée contre la corrosion une fois enrobée de béton grâce à une réaction chimique entre l'acier et le béton. Cette protection disparaît en présence de chlorures dans le béton, ceux-ci provenant essentiellement des sels de déverglaçage dissous qui se rendent jusqu'à l'armature, après avoir traversé le béton non protégé. La corrosion, résultat d'une lente réaction entre l'humidité, l'oxygène et le fer de l'armature, provoque la formation d'un dépôt, d'où accroissement de volume de l'armature attaquée par rapport au reste. Cela entraîne des contraintes internes qui peuvent, à la longue, provoquer la rupture de la masse de béton. Ce processus peut causer un délaminage du béton, une diminution de la section du béton, un décollement de l'armature, ainsi qu'une diminution de la section de l'armature qui, tous ensemble, peuvent amoindrir la solidité structurale.

En outre, à mesure que la masse du béton devient de plus en plus poreuse à cause du réseau de fissures qui s'accroît, la vitesse de corrosion risque d'augmenter. Ce mécanisme fondamental corrosion-délaminage est expliqué à la fig. 1 et le caractère auto-générateur du problème l'est à la fig. 2.

1. L'humidité et le chlorure ionique pénètrent dans le béton et atteignent l'acier en quantité suffisante pour causer la corrosion. La corrosion s'étend à une vitesse qui est fonction de la concentration de chlorure et de la quantité d'humidité et d'oxygène présente.



2. La rouille s'amasse autour de l'acier provoquant une forte contrainte ou pression. Le délaminage se produit et se déplace vers la surface sous l'effet de la circulation et des cycles gel-dégel.



3. Le béton se détache laissant une épaufrure ouverte ou un nid de poule. La corrosion s'étend en cercle jusqu'à ce qu'un décollement complet de l'armature se produise; la diminution de volume s'accélère.

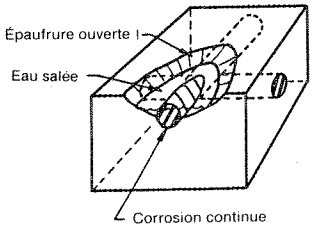


Fig. 1 Corrosion - mécanisme de délaminage[1]

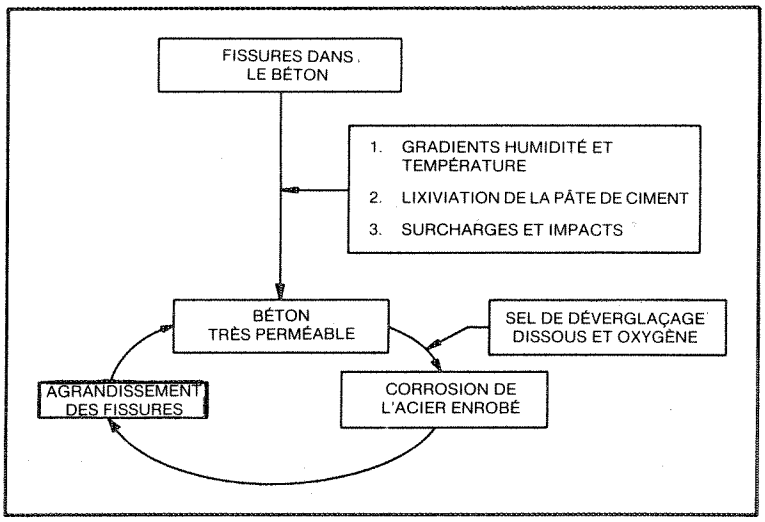


Fig. 2 Modèle schématique de l'interaction fissuration-corrosion (adapté du document de référence 2)

Nous abordons d'autres types de détérioration des garages de stationnement étagés, comme la fissuration, la lixiviation, l'écaillage et la détérioration aux joints. La discussion est axée sur les concepts fondamentaux de défaillance et résume les facteurs clés qui, a-t-on relevé, agissent sur la vitesse de détérioration. Une fois ces notions assimilées, on peut mieux comprendre les autres parties du rapport qui traitent des techniques employées pour mesurer l'étendue de la détérioration et des méthodes relatives aux mesures correctives.

2.2 Détérioration due à la corrosion

2.2.1 Protection de l'armature

Le béton non contaminé protège bien l'armature contre la corrosion grâce à deux mécanismes: la passivation de l'armature durant le processus d'hydratation du ciment et l'écran matériel que constitue l'enrobage de béton. L'hydratation du béton produit un hydroxyde de calcium qui amène un pH approximatif de 12,5 dans la solution pure. À ce niveau de pH, il se forme rapidement une couche d'oxyde passif qui empêche tout contact direct entre le métal et la solution; il ne peut donc pas y avoir de corrosion. En outre, il est possible de doser le béton pour lui conférer une faible perméabilité. Un béton peu perméable réduit fortement la pénétration des substances entraînant la corrosion et augmente la résistivité électrique, laquelle empêche le passage des courants provoquant la corrosion.

2.2.2 Principes de la corrosion

Cette section débute par une brève explication de la réaction électrochimique qui cause la corrosion du fer en présence d'oxygène et d'eau. Elle étudie ensuite l'effet supplémentaire des chlorures ioniques sur le processus électrochimique et traite enfin de la décomposition de la couche d'oxyde par les chlorures ioniques.

Le processus électrochimique de la corrosion est résumé à la fig. 3. L'acier de l'armature ne présente pas une structure chimique ou métallurgique entièrement uniforme. Il existe des régions de potentiel électrique différent, d'où la présence d'une anode à l'endroit de la corrosion et d'une cathode. Cette variation du potentiel électrique entraîne le processus de corrosion électrochimique. En présence d'humidité, le fer de l'anode se décompose en fers ioniques positifs et libère des électrons qui se déplacent, à travers l'acier, vers les points cathodiques. Une fois à la cathode, les électrons se combinent à l'oxygène et à l'eau pour former des ions hydroxyles négatifs. Ces ions hydroxyles réagissent, à leur tour, avec les fers ioniques positifs de la solution pour former un précipité, qui réagit plus avant avec l'oxygène pour donner un hydroxyde ferrique ou de la rouille. Les facteurs essentiels à la corrosion sont:

- l'existence d'anodes et de cathodes à différents potentiels électriques

- un électrolyte pour conduire le courant électrique
- l'oxygène

La présence de chlorures ioniques dans la solution accélère énormément le processus de corrosion en augmentant les variations de potentiel électrique sur la surface métallique et en diminuant la résistivité de l'eau.

Deux actions reconnues décomposent la protection anti-corrosion du béton obtenue chimiquement: la carbonatation et la décomposition directe du film d'oxyde. La carbonatation se produit quand le CO_2 de l'air réagit avec les hydroxydes de la solution dans les pores pour former des carbonates et de l'eau, faisant ainsi baisser le pH à environ 8,3. À ce niveau de pH, l'acier se corrode même sans contamination par le chlorure ionique. Toutefois, généralement les problèmes de corrosion dus à la carbonatation ne sont pas aussi importants que ceux dus aux chlorures ioniques. Dans le second processus, appelé passivation, le film d'oxyde est attaqué directement par les chlorures ioniques. Le phénomène n'est pas entièrement compris. Actuellement, trois théories avancées tentent d'expliquer le mécanisme. Ce sont: la théorie du film de passivation, la théorie de l'adsorption et la théorie du complexe transitoire[3].

2.2.3 Facteurs agissant sur la vitesse de corrosion

Concentration de chlorure

Généralement, on a constaté que plus la quantité de chlorure est élevée, plus la vitesse de corrosion est grande. Toutefois, on n'a jamais pu parvenir à un consensus absolu quant à la concentration minimale de chlorure qui déclenche la corrosion. Les concentrations sont typiquement indiquées en termes de pourcentage de masse de chlorure ionique par masse de ciment ou par masse de béton. Il est nécessaire de connaître la quantité de ciment d'un mélange donné pour convertir les valeurs entre les deux méthodes. La question est compliquée par la différence entre les vitesses de corrosion des chlorures de calcium et de sodium qui sont tous deux utilisés comme sels de déverglaçage, et par la différence entre les vitesses de corrosion des chlorures mélangés au béton et des chlorures qui se répandent dans le béton durci. On pense qu'il faut un pourcentage minimal approximatif de 0,15 p.c. de chlorure ionique par masse de ciment pour déclencher la corrosion. L'ACI précise actuellement que le contenu acceptable de chlorure ionique va de 0,06 à 0,15 p.c. par masse de ciment pour des structures exposées aux chlorures. L'ACNOR permet actuellement jusqu'à 2 p.c. de chlorure de calcium par masse pour certains types de structures. L'étude gouvernementale de 1984 indique que le niveau moyen de chlorure ionique était de 0,16 p.c. par masse de béton au niveau de l'armature supérieure, ce qui est considéré comme environ deux fois celui que l'on trouve dans les tabliers de pont en Amérique du Nord. Une étude détaillée des effets de la quantité de chlorure ionique sur la vitesse de corrosion est présentée dans le document de référence 3, publié par le comité 222 de l'ACI en 1985.

Teneur en humidité

La teneur en humidité du béton affecte la vitesse de corrosion en agissant sur la résistivité électrique transversale. Un béton entièrement saturé d'eau a une résistivité électrique approximative de 7 x 10^3 ohm/cm. Elle monte à 6 000 x 10^3 ohm/cm pour un béton séché à l'air. Des mesures faites sur place indiquent qu'au-dessus de 50 à 70 x 10^3 ohm/cm la corrosion de l'acier est négligeable. Cela démontre que la corrosion s'arrête tôt dans le processus de séchage et qu'elle ne devrait pas reprendre à moins que le béton ne soit pratiquement saturé.

Facteurs liés à la composition du béton

Les facteurs liés à la composition du béton qui permettent d'en réduire la perméabilité font décroître la vitesse de corrosion en limitant l'apport d'eau, d'oxygène et de chlorures. Des études ont indiqué que la rapport ciment-eau est un important facteur dans la composition du béton parce qu'elle permet de contrôler la corrosion en affectant la perméabilité. L'effet de la variation du rapport ciment-eau est illustré à la fig. 4. La fig. 5 montre l'action de la corrosion sur des éprouvettes d'essai en acier de 300 x 300 x 150 mm enrobées à une profondeur variant de 13 à 50 mm, pour différents rapports ciment-eau. Le départ de la corrosion est indiqué par la brusque montée de la courbe du potentiel en fonction du temps. L'effet bénéfique d'un rapport ciment-eau réduit, par exemple de 0,6 à 0,45, est particulièrement valable quand on augmente l'épaisseur d'enrobage de béton.

L'influence des variations de la teneur en ciment est moins claire. Les essais dans lesquels on a fait varier le contenu de ciment, en gardant le rapport ciment-eau constant, ont montré une variation peu significative de la protection de l'armature. Toutefois, de plus grandes quantités de ciment permettent de plus faibles rapports ciment-eau tout en conservant l'ouvrabilité. Peu de travaux ont porté sur l'effet de la taille, de la forme et de l'alternance de l'agrégat, sur la vitesse de corrosion.

Épaisseur de l'enrobage de béton

On a constaté qu'en augmentant l'épaisseur de l'enrobage de béton la vitesse de corrosion diminuait, surtout parce qu'on réduisait ainsi la pénétration des chlorures ioniques. La relation entre la pénétration du chlorure ionique et l'enrobage de béton est illustrée à la fig. 6. Cette relation est typiquement non linéaire parce que la diffusion des chlorures ioniques est fonction à la fois de la perméabilité du béton et des effets de la liaison chimique. Dans le temps, les codes permettaient un enrobage de béton d'une épaisseur aussi faible que 20 mm pour les garages de stationnement étagés. À l'heure actuelle, l'ACNOR ne précise aucune exigence particulière quant à l'enrobage de l'armature en milieu corrosif. L'étude gouvernementale de 1984 sur 36 garages de stationnement étagés révélait que l'enrobage était en moyenne de 42 mm, ce qui semblerait adéquat. Toutefois, l'enrobage variait énormément, puisque les épaisseurs rencontrées s'étalaient approximativement entre 0 et 115 mm. On a également comparé avec une étude entreprise en 1976 par le ministère des

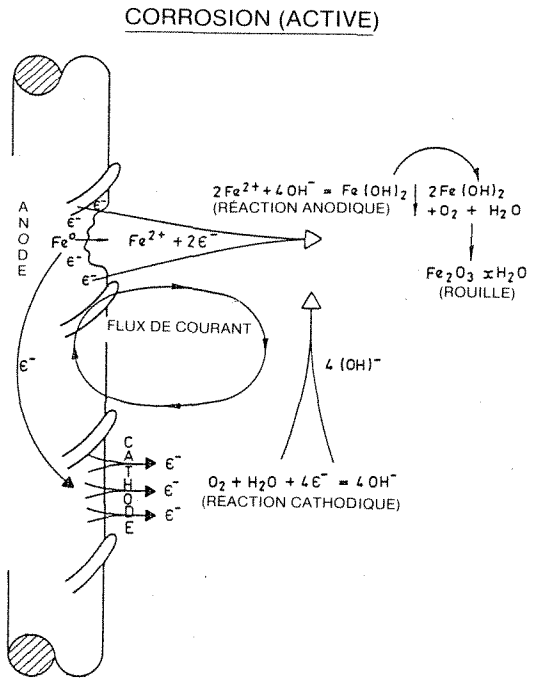


Fig. 3 Mécanisme de corrosion électrochimique[4]

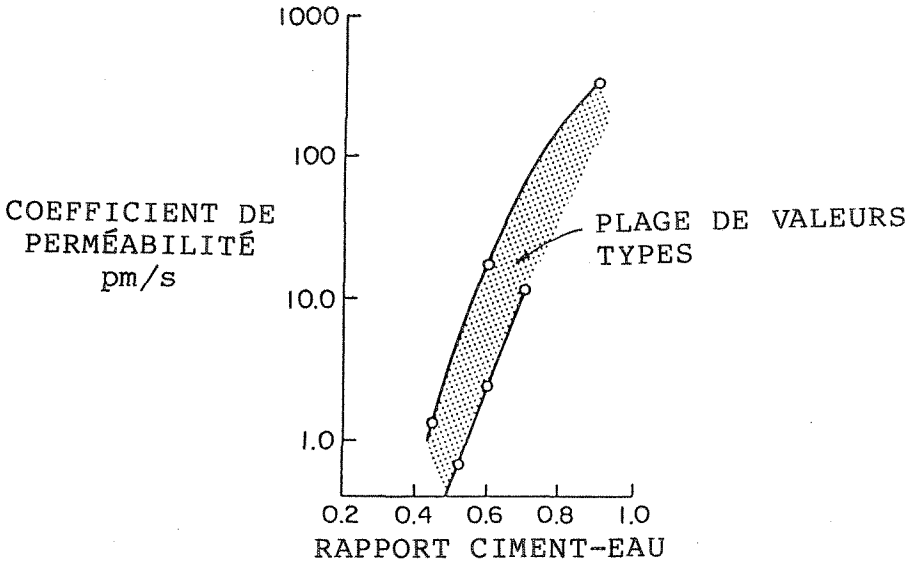
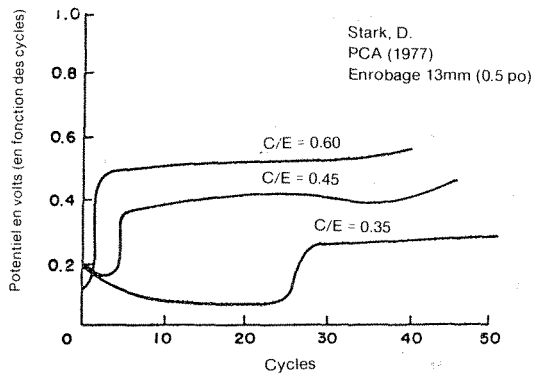
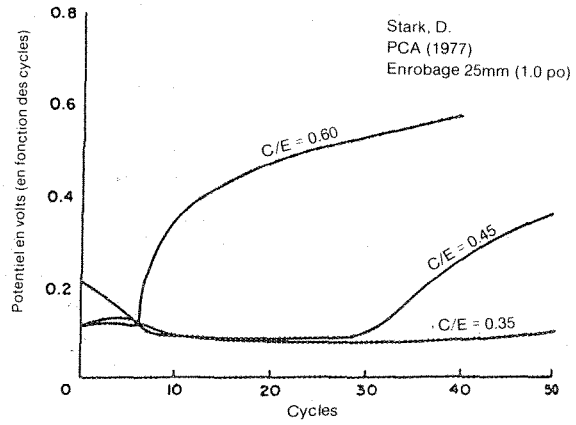
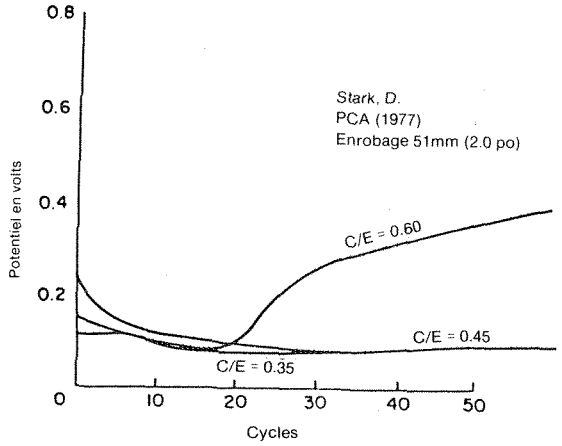


Fig. 4 Perméabilité des bétons selon leur rapport ciment-eau[5]







Notes:

- les essais ont été faits sur des échantillons de 300 x 300 x 150 mm
- chaque cycle comprenait 4 jours de contact avec une solution de NaCl à 3.5 %, suivis de 10 jours de séchage sous humidité relative de 50 %
- la corrosion active est indiquée par une brusque montée de la courbe du potentiel en fonction du nombre de cycles

Fig. 5 Effet de la variation du rapport c/e sur la corrosion pour un enrobage de béton allant de 13 à 51 mm.[6]

Transports et des Communications de l'Ontario (MTCO) qui portait sur la conformité relative aux spécifications dans le cas des tabliers de pont. Bien qu'il faille tenir compte du fait qu'il est plus facile de mettre en place l'armature d'un tablier de pont que celle d'un garage de stationnement, l'étude gouvernementale de 1984 a révélé que dans 81 % des garages concernés, les variations d'épaisseur de l'enrobage excédaient celles que l'on considérait comme normales chez un bon constructeur de ponts. Cette différence dans la mise en place de l'armature devrait être prise en considération par les concepteurs lorsqu'ils précisent les exigences minimales relatives à l'enrobage dans les garages de stationnement étagés.

2.2.4 Détérioration due à la corrosion

La décomposition à la fois de la masse de béton et de l'armature d'acier se traduit par une détérioration des garages de stationnement étagés, causée par les effets directs de la corrosion de l'armature. La détérioration du béton commence avec les contraintes de dilatation dues à l'accumulation des produits de la corrosion. Le volume résultant de cette accumulation peut être de 3 à 6 fois supérieur à celui du même métal non corrodé. Lorsque la résistance à la traction du béton est dépassée, il se produit du délaminage, soit des décollements dans le plan horizontal. À mesure que le processus de corrosion s'étend, ces décollements se propagent vers la surface du béton qui finit par se briser en formant des cavités circulaires appelées épaufrures. Ce processus se trouve aggravé par la circulation des véhicules. En plus de cela, il peut se produire une perte appréciable du métal de l'armature et un décollement de cette armature et du béton. Tous ces effets peuvent avoir des répercussions sérieuses sur la structure. Les endroits dont la partie supérieure comporte une armature particulièrement dense, comme les chapiteaux de pilier et les planchers-dalles unidirectionnels au-dessus des poutres, peuvent être particulièrement vulnérables. La réduction simultanée, par la corrosion, de la section du béton conçue pour résister à la compression et au cisaillement et de la résistance à la traction de l'armature, peut entraîner des situations particulièrement dangereuses.

Lors de l'étude de 1984, on a découvert que d'une manière typique, la progression du délaminage ne devenait mesurable qu'après cinq années d'utilisation environ. La vitesse de progression était très variable sur la partie du platelage contrôlé et on a pensé qu'elle était fonction de facteurs locaux comme la densité de l'armature à la partie supérieure, la qualité du béton, l'épaisseur de l'enrobage, les variations de température, et la vitesse à laquelle le chlorure se déposait. La fig. 7. montre l'influence du temps sur la progression du délaminage pour différents garages de stationnement étagés, lorsqu'il n'y a pas eu de réparations.

2.3 Fissuration

Bien qu'il puisse y avoir corrosion dans le béton sans trop de fissuration apparente, l'interaction corrosion-fissuration n'a pas été entièrement déterminée. Il est clair que le béton renferme des fissures avant que la corrosion ne commence et que ces fissures, une fois qu'elles communiquent,

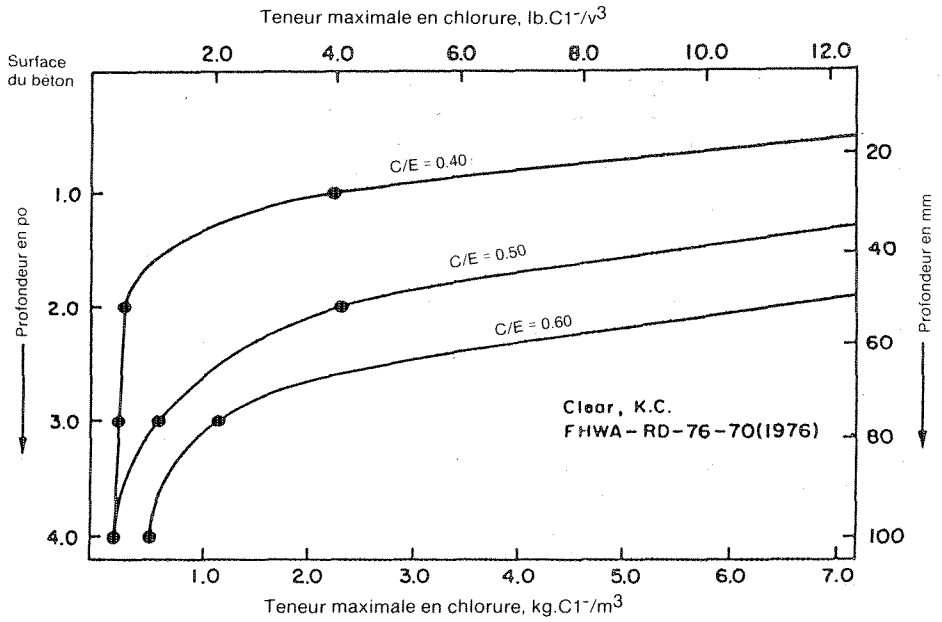


Fig. 6 Effet de l'épaisseur de l'enrobage de béton sur la pénétration du chlorure après 830 applications journalières de sel[8]

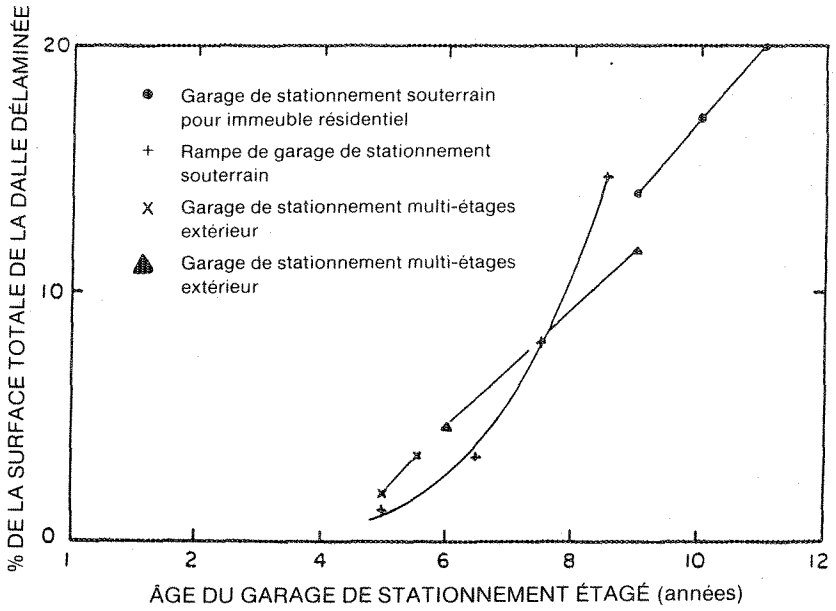


Fig. 7 Progression du délaminage en fonction du temps[9]

favorisent la corrosion. La fissuration résulte aussi de la corrosion, à cause de la dilatation due à l'accumulation des produits de la corrosion. On a avancé certains arguments à savoir que puisque la pénétration du chlorure jusqu'à l'armature était si rapide, les effets dus au fissurage étaient minimes. En outre, on n'a établi qu'une faible corrélation entre la largeur des fissures à admettre et la vitesse de corrosion.

La fissuration peut avoir des répercussions sur la structure, l'aspect et le maintien en état. Les questions touchant les répercussions sur la structure devraient tenir compte du déplacement des fissures ainsi que de l'étendue et de la fréquence des fissures par rapport à l'emplacement de l'armature. Les effets de la fissuration sur le maintien en état résultent du passage accru des chlorures et des produits de la pâte de ciment; nous en traiterons d'ailleurs sous la rubrique détérioration due à la lixiviation. L'ACI, le MTCO et la SCHL ont mis au point un certain nombre de critères pouvant servir à clarifier la question de l'étendue de la fissuration[7].

2.4 Lixiviation

À mesure que l'eau pénètre dans une dalle de béton, la chaux que contient la pâte de ciment peut se dissoudre et se combiner aux chlorures déjà dissous, entraînant plus tard l'apparition de taches et de pellicules sur la face inférieure de la dalle. Ce processus de détérioration appelé lixiviation peut conduire à des défaillances à la fois au plan de l'utilisation et de la structure. En plus des taches en surface, la solution fortement alkaline produite par la lixiviation peut attaquer le revêtement des véhicules. Les canalisations mécaniques et électriques encastrées dans les dalles de béton ou suspendues en-dessous peuvent aussi être attaquées soit par la corrosion soit par l'accumulation de produits dissous. Après un certain temps, la lixiviation peut affaiblir la résistance du béton en détruisant la liaison granulat-pâte et armature-pâte. Les vides qui en résultent augmentent aussi la perméabilité du béton et par conséquent la corrosion. On peut contrôler la lixiviation grâce à des mesures permettant d'éliminer l'eau de surface et de diminuer la perméabilité comme en ménageant une pente appropriée de la surface des dalles, en assurant un meilleur débit des avaloirs, en ayant recours à des systèmes d'imperméabilisation et en concevant et en entretenant bien les joints.

2.5 Ecaillage

L'écaillage est une décomposition de la surface du béton due aux cycles gel-dégel, aggravés par la présence de produits chimiques de déverglaçage. Pendant la construction, l'écaillage peut se contrôler en suivant soigneusement des méthodes de finition qui évitent le ressuage excessif à la surface du béton et en ajoutant un entraîneur d'air. Au début, l'écaillage se manifeste par de petits éclats superficiels alors que le mortier contenu dans le mélange de béton est attaqué. Finalement, la détérioration du béton progresse en profondeur, exposant ainsi le granulat et plus de mortier. Dans la plupart des cas, l'écaillage est de nature superficielle, mais la décomposition accroît la porosité du béton et amoindrit l'épaisseur de l'enrobage. Lors de l'étude de 1984, on a trouvé que dans les structures intérieures l'écaillage était moindre

et, par conséquent, on ne l'a pas évalué quantitativement.

2.6 Autres composants

De façon générale, les joints se pratiquent dans les structures en béton pour contrôler la fissuration et annuler l'effet des contraintes dues au retrait et aux variations de température. Les défaillances des joints sont souvent associées à une défaillance du mastic d'étanchéité, due soit à l'effet d'impact des véhicules, soit à une sous-estimation du mouvement des joints, soit encore à une défaillance du béton à proximité du joint. L'eau chargée de sel s'accumule souvent à l'endroit où le joint est détérioré. Cela peut provoquer un écaillage localisé du béton et finalement une perte totale d'efficacité du joint retrait-flexion.

L'accumulation d'eau à la surface du béton peut provoquer une détérioration du béton par lixiviation, coloration et pénétration d'une plus grande quantité de chlorures provenant de l'eau stagnante chargée de sel. Il faut prévoir l'écoulement de l'eau en donnant de la pente à la partie supérieure des dalles, vers les avaloirs à écoulement libre. Ces avaloirs doivent être posés au point le plus bas de la dalle et conçus de façon que leur nettoyage soit facile. Le joint entre l'avaloir et la dalle adjacente doit être étanche.

3.0 ÉVALUATION DE L'ÉTENDUE DE LA DÉTÉRIORATION

3.1 Méthode générale d'investigation

Les objectifs d'un programme d'investigation de la détérioration d'un garage de stationnement étagé consistent premièrement à déterminer la nature et l'étendue de la détérioration, deuxièmement à déterminer les causes sous-jacentes de cette détérioration et troisièmement à mettre sur pied un plan de réparation complet. Ce plan devrait permettre à la fois de corriger les problèmes existants et de parer avec efficience à toute détérioration ultérieure possible pendant la durée utile du bâtiment.

La détérioration des garages de stationnement étagés varie beaucoup. Certains types de détérioration, comme la fissuration et l'écaillage, apparaissent facilement lors d'une inspection visuelle, alors que pour découvrir d'autres problèmes potentiellement plus sérieux comme la corrosion de l'armature, il faut faire appel à des techniques particulières. Le tableau 1 indique les applications particulières et les limites des techniques d'investigation, en même temps que les normes à respecter. Des précisions sont fournies dans les sections suivantes.

Il faut que la méthode d'investigation elle-même soit systématique et approfondie pour être représentative. La façon de procéder à l'investigation en deux phases qui est exposée ci-après peut servir de guide; elle est complète, bien que l'investigation ne soit pas toujours justifiée. Puisque la taille du garage et l'étendue de la détérioration varient, le nombre et le genre d'essais doivent être évalués en fonction de chaque cas. Voici deux

Tableau 1 Résumé des essais de la Phase II de l'investigation

Essai	Paramètres mesurés	Limites de l'essai	Normes de référence
Chaîne traînée	Délaminage horizontal du béton	Précis jusqu'à une profondeur approximative de 150 mm	
Pachomètre	Épaisseur de l'enrobage de béton	Précis à ± 3mm jusqu'à 40 mm et à ± 5 mm pour un enrobage supérieur à 40 mm	BS 4408: Part 1: 1969, Recommendations for Non-Destructive Methods of Test for Concrete, Part 1: Electro-Magnetic Cover Measuring Devices
Électrodes	Corrosion	Mesure des potentiels liés à la probabilité statistique de corrosion	ASTM C876-80, Half-cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete
Pénétration du chlorure	Vitesse de pénétration du chlorure ionique		
	Essai 1 "Essai lent"	Durée approximative de 90 jours	AASHTO T 259-80
	Essai 2 "Essai rapide"	Durée de 6 heures	Portland Cement Association for the Federal Highway Administration
Teneur en chlorure	Niveau de Cl^- dans le béton	Tenir compte des niveaux de Cl^- de l'agrégat et des adjuvants	FHWA-RD-77-85 Sampling and Testing for Chloride Ion in Concrete
Qualité du béton	Résistance à la traction, teneur en ciment, densité, teneur en air		CAN3 A23.1-M77 CAN3 A23.2-M77
Résistance électrique	Perméabilité de la membrane		Durability of Concrete Bridge Decks, NCHRP Synthesis no. 57, Transportation Research Board, Washington D.C., 1979, 60pp.

documents utiles qui livrent des renseignements supplémentaires et des informations générales sur les investigations dans les garages de stationnement étagés: "Interim Guidelines, Investigation, Repairs, Design and Construction of Parking structures", publié l'ACI, section de l'Ontario; et "Guide For Making a Condition Survey of Concrete in Service", rédigé par le comité 201 de l'ACI. En plus, une liste de vérification de l'état d'un garage de stationnement étagé est donnée à l'annexe B. C'est une version simplifiée de formules détaillées employées pour l'étude de 1984; cette liste de vérification pourrait servir de guide soit pour la Phase I soit pour la Phase II, selon la taille, la complexité et l'étendue des dommages dans un garage de stationnement étagé.

3.2 Phase I de l'investigation préliminaire

Cette phase de l'investigation se caractérise essentiellement par une inspection visuelle visant à déterminer la nature du problème, à planifier une investigation détaillée et à se faire une idée des répercussions des défauts sur la structure. Les points suivants doivent être couverts lors de la Phase I:

- Une revue des documents de façon à connaître les détails de conception et l'historique de la construction. Cette revue porte notamment sur les dessins architecturaux et structuraux du garage tel qu'il a été construit, les spécifications, les documents de construction et les dossiers des réparations précédentes. Il faut accorder une attention particulière aux dimensions de l'armature, à l'espacement type et aux exigences relatives à l'enrobage.

- Une inspection visuelle et photographies de tout le garage, y compris l'ossature, l'exécution des joints et l'écoulement de l'eau. Les détails peuvent se noter sur le plan d'ensemble. On y inscrit les défauts visuels comme le délaminage, les épaufrures, la coloration, l'écaillage et les fissures. Il faut noter la largeur des fissures et repérer les endroits où l'armature croise les fissures. Il faut vérifier le bon écoulement de l'eau et l'efficacité des pentes.

- La prise d'échantillons de béton épaufré peut permettre un examen préliminaire de l'étendue de la corrosion de l'armature. On peut aussi percer le béton et en recueillir de petits échantillons pour déterminer en laboratoire la teneur en chlorure.

- Les essais avec une chaîne traînée et un pachomètre qui permettent de mesurer le délaminage et l'épaisseur de l'enrobage, peuvent être entrepris en un certain nombre d'endroits. Ces endroits doivent être caractéristiques des détails structuraux, des détails d'utilisation et de l'étendue de la détérioration visuelle rencontrés dans un garage de stationnement particulier.

3.3 Phase II de l'investigation détaillée

Après avoir achevé la phase I et déterminé le bien-fondé de travaux supplémentaires, il faut entreprendre la phase II de l'investigation de façon à

analyser quantitativement les points clés suivants:

- l'étendue de la corrosion
- l'étendue du délaminage
- l'enrobage de béton
- le niveau de chlorure
- la perméabilité du béton
- la résistance du béton.

La surface inspectée en détail variera entre 20 et 100 p.c. de la superficie totale. À l'aide d'un cordeau de maçon ou d'un crayon de menuisier, on peut tracer un ensemble de grilles sur la dalle de béton, afin de pouvoir reporter les données du chantier sur les plans d'ensemble. Les grilles dont la maille peut varier entre 1 x 1 m et 2 x 2 m, suivent normalement l'alignement des piliers.

3.3.1 Examen du délaminage

La vérification des endroits où le béton se détache horizontalement fait appel à la méthode de la chaîne traînée. Cette technique simple consiste à traîner une chaîne au contact direct du béton en lui imprimant un mouvement oscillant. On peut employer différentes longueurs de chaîne, depuis une seule chaîne d'environ 1,5 m de longueur jusqu'à quatre chaînes plus courtes d'environ 0,5 m de longueur fixées à un manche de bois. Tandis que l'on traîne la chaîne de la façon indiquée, la dalle rend un son sourd lorsqu'il y a délaminage et un son de cloche aigu lorsque le béton est sain. Une fois que la surface touchée par le délaminage a été grossièrement délimitée, on martèle le béton pour déterminer avec précision l'étendue du délaminage, puis on marque le pourtour de peinture en bombe aérosol.

3.3.2 Enrobage de béton

L'épaisseur de l'enrobage de béton se mesure à l'aide d'un pachomètre. Il s'agit d'un instrument électromagnétique à piles, qui indique les distortions d'un champ magnétique appliqué provoquées par l'armature en acier. Une fois le diamètre de la tige d'armature connu, on peut calibrer l'instrument pour indiquer l'épaisseur de l'enrobage de béton. On emploie généralement deux types de pachomètres, l'un à main et l'autre automatique monté sur roues. La précision approximative de l'instrument joue de ± 3 mm jusqu'à 38 mm d'épaisseur d'enrobage et de ± 6 mm au-delà de 38 mm. La précision peut être vérifiée en examinant à l'oeil les tiges d'armature exposées dans les parties où il y a délaminage, ou par carottage.

3.3.3 Étendue de la corrosion - Mesure à l'aide d'électrodes

Cet essai non destructif sert à indiquer s'il y a corrosion de l'armature. Il ne donne pas de vitesse de corrosion particulière, mais il renseigne sur l'état actif ou passif de l'armature d'acier. L'appareil fonctionne selon le principe que la corrosion provoque une différence de potentiel entre l'acier de l'armature et une électrode cuivre-cuivre/sulfate. Cet appareil se compose d'un câble de mise à la terre que l'on relie à l'armature apparente, d'un voltmètre et d'une électrode cuivre-cuivre/sulfate. Une pierre poreuse en contact avec l'électrode et une éponge humide en contact avec la surface du béton complètent le circuit. On met l'instrument en contact avec la surface du béton aux intersections des mailles de la grille et on lit les indications du voltmètre. Il faut parfois commencer par mouiller la surface du béton pour permettre le passage du courant. En se basant sur une électrode cuivre-cuivre/sulfate, on a établi les trois conditions de corrosion suivantes:

- une différence de potentiel inférieure à -0,2 V indique avec une probabilité supérieure à 90 % qu'il n'y a pas corrosion

- une différence de potentiel comprise entre -0,2 et -0,35 V indique qu'il pourrait y avoir corrosion

- une différence de potentiel supérieure à -0,35 V indique avec une probabilité supérieure à 90 % qu'il y a corrosion.

Après avoir porté sur le carroyage du plan les valeurs indiquées par le voltmètre, on peut tracer les lignes équipotentielles et délimiter ainsi graphiquement les endroits frappés par la corrosion.

3.3.4 Perméabilité du béton

Deux essais ont été mis au point pour mesurer la vitesse de pénétration du chlorure ionique dans le béton. Un essai "lent" consiste à appliquer une solution de chlorure de sodium à 3 % sur la surface de la dalle de béton. Pendant une période de 90 jours, on prélève des échantillons à différentes profondeurs pour mesurer la teneur en chlorure. L'Association du ciment Portland applique depuis peu une méthode d'essai rapide. On utilise des carottes de 100 mm d'une longueur de 50 mm. Cet essai présente un avantage important, celui de pouvoir tester la perméabilité des produits d'étanchéité, des revêtements et des traitements d'imperméabilisation. La technique consiste à contrôler la quantité de charge électrique qui passe dans un échantillon soumis à un potentiel électrique constant. Un côté de l'échantillon est immergé dans une solution de chlorure de sodium et les chlorures ioniques sont forcés de se déplacer à travers le béton, sous l'influence du potentiel électrique appliqué. Plus la charge électrique totale qui passe dans l'échantillon est faible, plus le béton est imperméable aux chlorures ioniques. Un schéma de ce mécanisme est montré à la fig. 8. Le tableau 2 indique des valeurs pour le "béton seul" et pour une "surface de béton traitée".

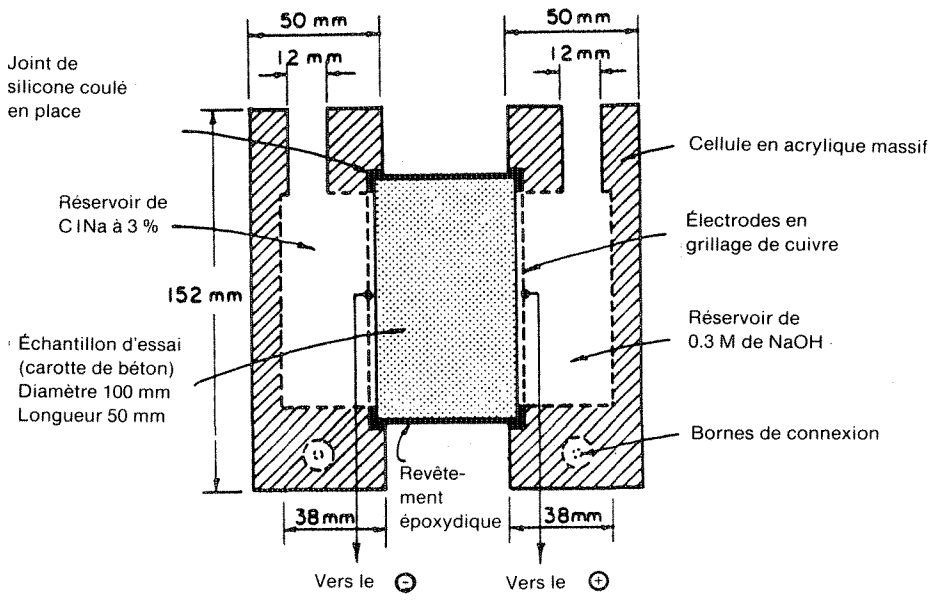


Fig. 8 Schéma de l'appareil d'essai de perméabilité[10] de l'ACP

Tableau 2 Résultats de l'essai de perméabilité du béton[11] de l'ACP

Interprétation des résultats		
Perméabilité au chlorure	Charge passée (coulombs)	Type de béton
Élevée	4 000	Rapport ciment-eau élevé (0,6)
Modérée	2 000 à 4 000	Rapport ciment-eau modéré (0,4 à 0,5)
Faible	1 000 à 2 000	Rapport ciment-eau faible Béton dense "Iowa"
Très faible	100 à 1 000	Béton modifié au latex Béton scellé intérieurement
Négligeable	100	Béton imprégné de polymères Béton polymère

3.3.5 Niveau de chlorure

La teneur en chlorure ionique s'obtient en laboratoire par un processus d'extraction de l'acide. Les échantillons peuvent être soit des morceaux prélevés dans la carotte ou de la poudre provenant du forage du béton. Les résultats expriment le rapport entre la masse de chlorures ioniques et la teneur en ciment. Cet essai peut n'avoir qu'une application restreinte quand on dispose d'un budget de réparation limité et que la détérioration est passablement importante, auquel cas il confirme simplement que le niveau de chlorure ionique est beaucoup plus élevé que le seuil.

3.3.6 Qualité du béton

Les essais normalisés suivants permettent d'avoir une idée générale de la qualité du béton. Leur mode opératoire respectif est décrit dans les normes ACNOR CAN3-A23.1-M77 et CAN3-A23.2-M77.

- les essais de résistance à la compression
- la teneur en ciment
- la densité
- la teneur en air

3.3.7 Équipement de mesure de la résistance électrique

Les mesures de résistance électrique s'effectuent sur des membranes d'étanchéité faites de matériaux diélectriques. On a établi les relations qui existent entre la résistance, le nombre de trous dans la membrane et la perméabilité à l'eau de celle-ci. La résistance se mesure à l'aide d'une plaque de contact en cuivre qui est placée sur la surface de la membrane, d'un ohmmètre et d'un câble de mise à la terre que l'on relie à l'armature d'acier. Les limites de l'essai sont énoncées dans l'ouvrage de référence indiqué au tableau 1.

3.3.8 Pente des dalles et avaloirs

Le cheminement de l'eau vers les avaloirs peut être déterminé en repérant les endroits où l'eau stagne et en utilisant des instruments de topographie pour mesurer les variations d'élévation. Cela donne une idée des endroits où l'eau s'amasse. Il faut un relevé précis de l'emplacement et de l'état des avaloirs pour connaître les problèmes généraux d'écoulement et savoir où ajouter d'autres avaloirs s'il y a lieu.

3.3.9 Présentation des données

On peut présenter les données de différentes façons. Les observations visuelles concernant les épaufrures, la lixiviation et les fissures peuvent être notées sur les plans d'ensemble. Cela donne une vue caractéristique de la

face supérieure de la dalle, mais la face inférieure subit parfois des dommages importants. Une technique graphique utile consiste à employer des transparents superposables dont la couleur varie selon le type d'essai. En superposant ces transparents, on peut voir immédiatement la corrélation qui existe entre les points bas de la dalle, les endroits atteints par le délaminage et par la corrosion. Les fig. 9 à 11 tirées des dossiers établis sur les lieux lors de l'étude de 1984, donnent des exemples de présentation des données, à partir des observations visuelles et des mesures du délaminage et du potentiel électrique. On emploie de plus en plus des graphiques produits par ordinateur. Cette technique réduit le temps de préparation des données et permet de les utiliser avec plus de souplesse.

4.0 OPTIONS ET TECHNIQUES DE RÉPARATION

4.1 Programme de réparation

Le programme de réparation doit envisager les aspects structural, économique et fonctionnel. Les questions économiques sont traitées à la section 6. Bien qu'il y ait de nombreuses manières de remédier à la détérioration du béton due à la corrosion, les objectifs fondamentaux sont de rétablir la solidité de la structure et de retarder toute future détérioration possible, de façon efficiente pour la durée utile du bâtiment. La première étape de la mise sur pied d'un programme de réparation consiste à évaluer les résultats de l'inspection d'état. La détérioration peut souvent être attribuée à une combinaison de causes: forte teneur en chlorure, enrobage de faible épaisseur et béton relativement perméable. Puisque dans la plupart des cas il est impossible de modifier l'environnement favorisant la corrosion, la méthode de réparation doit être axée sur les moyens de protéger l'armature contre la contamination par les chlorures. On parvient le plus souvent à isoler l'armature en faisant appel à un écran matériel. On commence à employer depuis peu dans les garages de stationnement étagés, des systèmes de protection cathodique qui permettent de séparer électriquement les chlorures de l'armature.

Cette section débute par un résumé des aspects structural et fonctionnel dont les différents programmes de réparation devraient tenir compte. Elle se poursuit par un résumé des options de réparation pratiques et une description des détails de remise en état du béton armé. Ensuite, elle passe en revue les aspects importants des différents écrans matériels et livre les sources de renseignements détaillés. Une section à part explique les principes de la protection cathodique. Cette section se termine par un résumé des données recueillies lors de l'étude de 1984 qui portaient sur le comportement des différents écrans de protection.

4.2 Aspect structural dans un programme de réparation

Les conséquences de la détérioration sur la structure ont été examinées dans les sections précédentes. Les renseignements obtenus après le passage de la chaîne indiquent l'étendue des dommages. À partir de ces renseignements combinés aux résultats de l'examen visuel et aux résultats des essais de

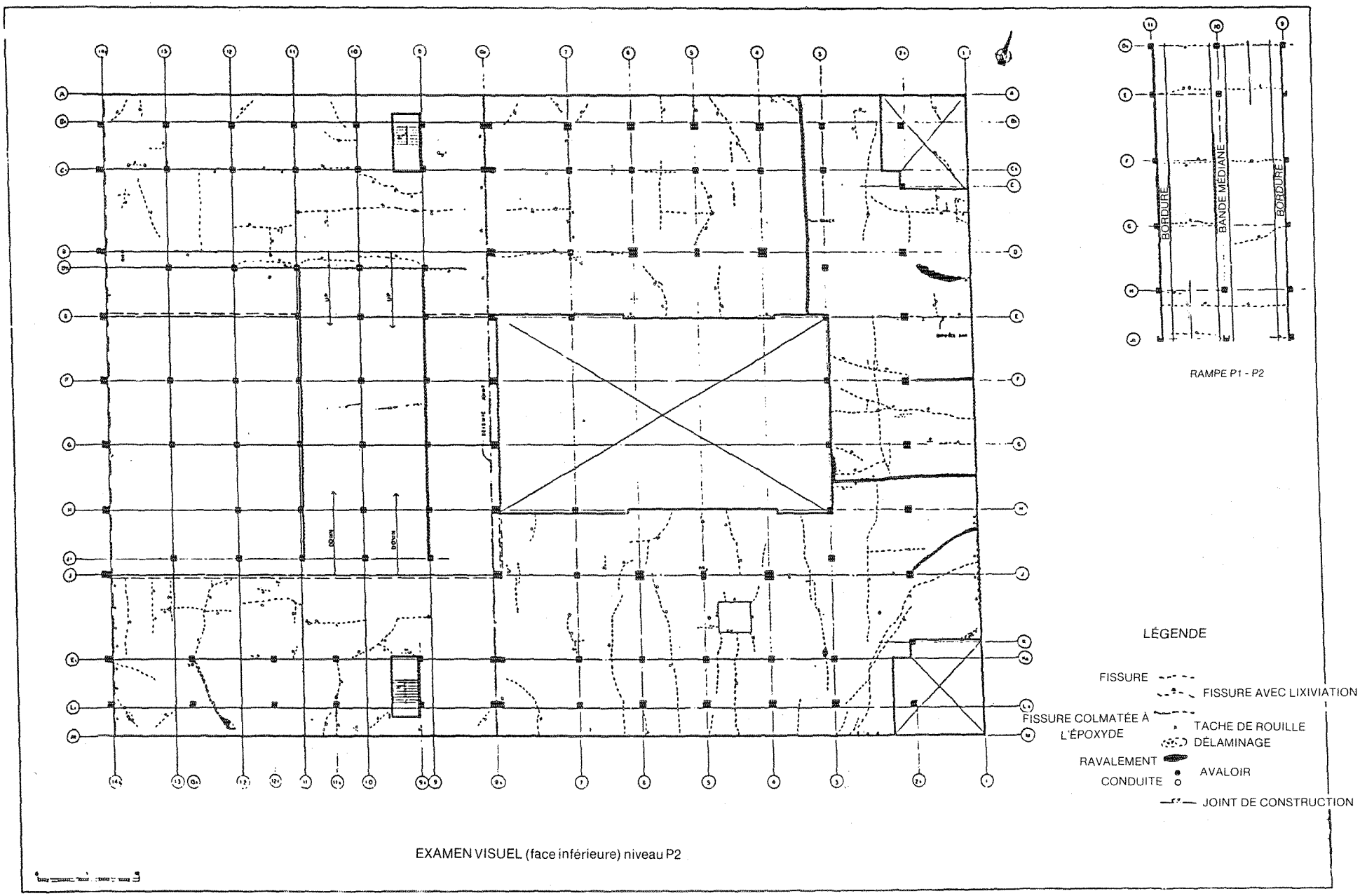


Fig. 9 Résultats d'un examen visuel montrant l'étendue de la fissuration

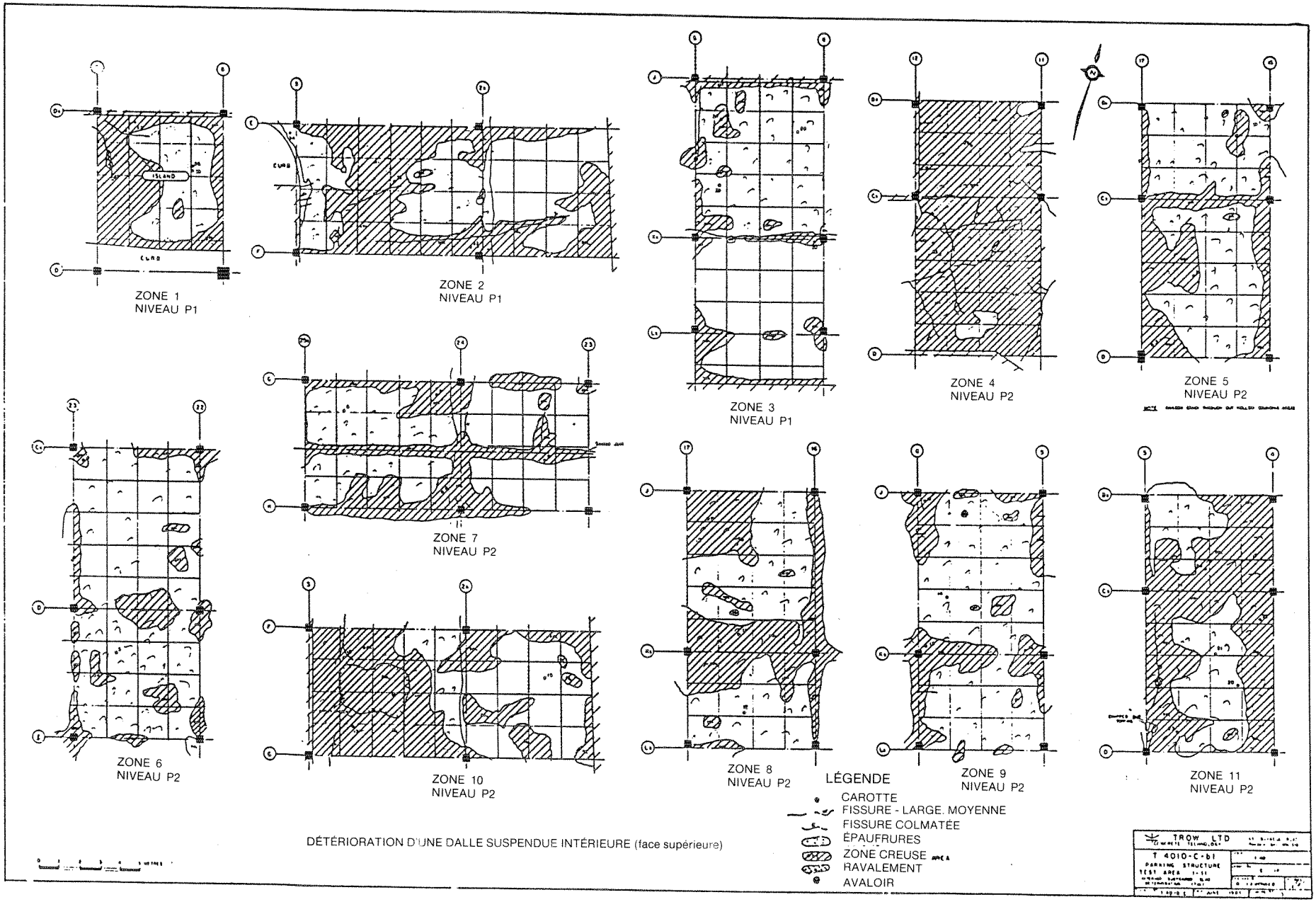


Fig. 10 Résultats d'un examen après passage de la chaîne
Les zones touchées par le délaminage sont repérées par "DEL"

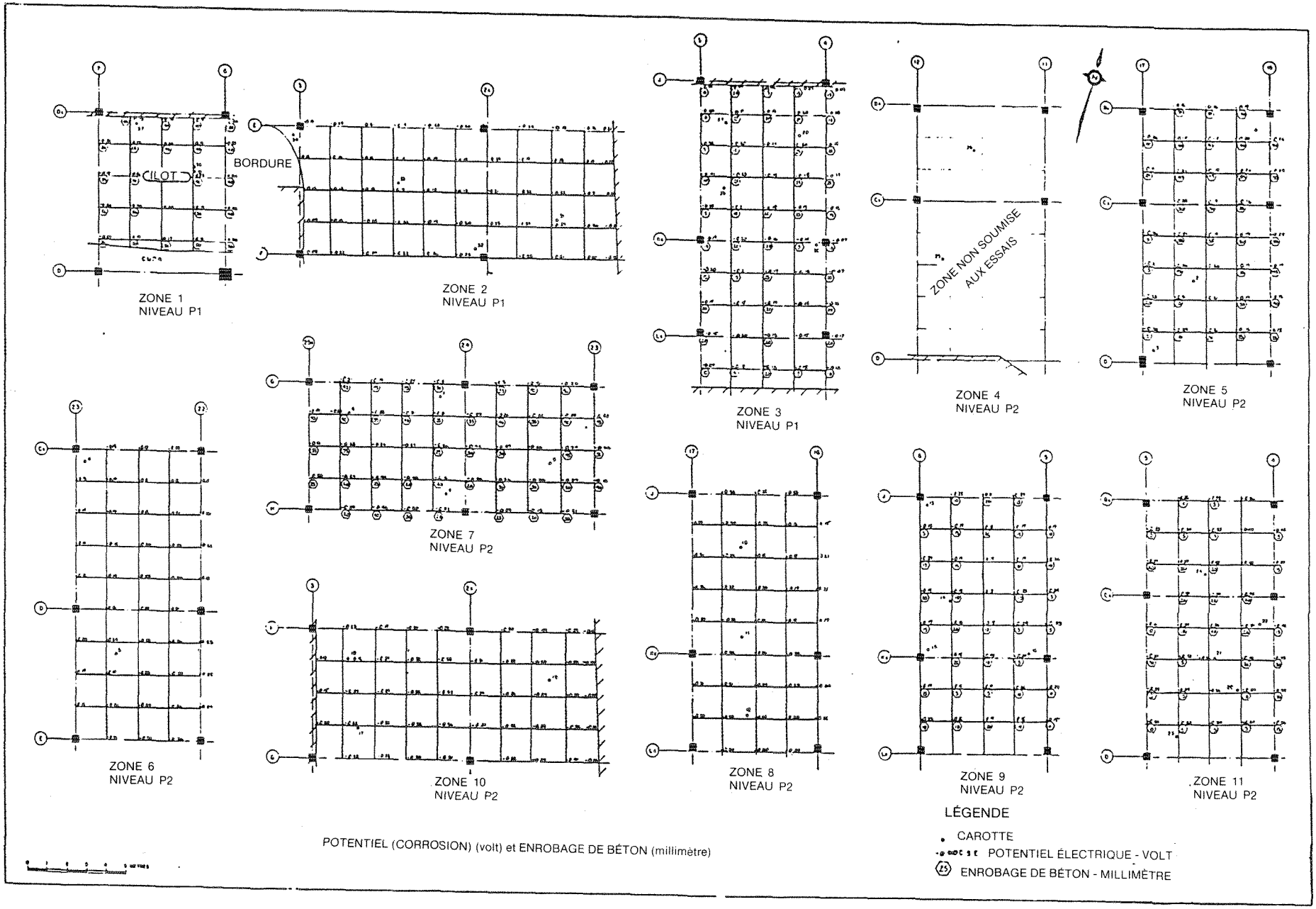


Fig. 11 Résultats de mesures à l'aide d'électrodes pour rechercher la corrosion

résistance des matériaux, on peut procéder à une analyse de la structure. Cela permet de savoir:

- si la structure présente actuellement des risques. Dans certains cas il peut être nécessaire de limiter la circulation ou de l'interdire.

- si la structure peut supporter la surcharge supplémentaire que représente un système de barrière avec revêtement de béton

- jusqu'à quel point il est possible d'enlever le béton endommagé dans une zone particulière et quels sont les besoins d'étayage. L'emplacement des étais varie selon l'étendue des dommages et le déroulement des travaux de réparation. Pendant les travaux, les charges doivent être transférées jusqu'aux fondations en étayant d'un étage à l'autre. Dans certains garages de stationnement endommagés l'étayage peut parfois s'avérer nécessaire lorsque les réparations sont ajournées.

Il faut aussi considérer la compatibilité des propriétés des matériaux d'origine et des matériaux envisagés pour la réparation, dont les différences de fluage et de retrait, la résistance d'adhérence et le module d'élasticité des matériaux d'origine et d'apport; ces propriétés peuvent avoir une influence sur la répartition de la charge entre le béton d'origine et le béton réparé. Dans de nombreux cas la contribution du béton endommagé, y compris le matériau d'enrobage, peut être ignorée et une diminution maximale de 10 % de la section de l'armature serait acceptable.

Pour les situations dans lesquelles il est difficile ou peu pratique de procéder à une évaluation analytique de la perte de solidité structurale, on peut effectuer un essai de charge. On peut aussi faire cet essai dans le but de corroborer les résultats des analyses. Les méthodes d'essai pour mesurer la résistance à la charge sont décrites à la section 20 de la norme CAN3-A23.3M84; elles précisent l'ampleur, la durée et les tolérances de flèche résiduelle pour différents mouvements structuraux. Il existe de nombreuses façons d'appliquer la charge, y compris l'emploi de parpaings, de sacs de sable et de réservoirs d'eau. Dans toute méthode d'évaluation il faut soigneusement tenir compte de l'aspect limitatif des essais de charge. Ces essais ne renseignent que sur une partie de la structure et ce, au moment de l'essai seulement. Quand on étend les résultats des essais de charge à d'autres parties d'une structure, il faut considérer soigneusement la nature et l'étendue de la détérioration, aussi bien dans les parties soumises à l'essai que dans les autres. Certains types de charges, comme les charges latérales ou celles dues à une variation de volume par retrait, peuvent être difficiles à simuler. Il peut être nécessaire d'employer des dispositifs de mise en charge plus sophistiqués comme des vérins hydrauliques ou de modifier le système vertical de mise en charge pour simuler leurs effets.

4.3 Aspect fonctionnel dans un programme de réparation

Il faut évaluer les restrictions possibles auxquelles les travaux de réparation pourraient être assujettis, en raison du bruit, de la poussière, des vibrations et de l'emploi de matières dangereuses. Il faut aussi considérer les modifications à apporter aux conditions environnementales de la structure comme les contrôles de température et l'amélioration de la ventilation. Il faut penser à l'incidence visuelle des mesures de réparation. La durée et le déroulement des travaux ont aussi des répercussions sur le coût, étant donné la perte de revenu et le déplacement des espaces de stationnement utilisables.

4.4 Options de réparation

Le choix final d'une option de réparation dépend de l'évaluation des facteurs précités. Toutefois, les limites budgétaires peuvent exiger d'échelonner les travaux sur une certaine période. Les techniques d'estimation du coût global qui sont étudiées à la section 6 de ce rapport peuvent servir à évaluer les différentes options de réparation. Les cinq options de réparation suivantes résument des façons de procéder globales pour la remise en état:

1. Injection d'époxyde dans les fissures et pose d'une membrane imperméable à l'eau avec couche d'usure. Cette injection n'est efficace que lorsque la fissuration s'est stabilisée. Tout mouvement ultérieur à l'injection provoquera une autre fissure à proximité de l'époxyde, d'où l'inefficacité des réparations.

2. Remplacement du béton et de l'armature endommagés et pose d'une membrane imperméable à l'eau avec couche d'usure.

3. Remplacement du béton et de l'armature endommagés et coulage d'un revêtement de béton dense.

4. Remplacement du béton et de l'armature endommagés et installation d'un système de protection cathodique.

5. Démolition totale et reconstruction de la structure.

En outre, les mesures de réparation devraient être axées sur les joints de dilatation et l'amélioration de l'écoulement de l'eau. Les différentes façons de procéder aux réparations comportent des avantages et des inconvénients qui doivent être considérés individuellement. De nombreuses structures ne peuvent supporter des surcharges permanentes ou une hauteur libre réduite qu'imposerait un revêtement de béton. Dans ce cas, les solutions de rechange consistent à enlever plus de béton ou à poser une fine membrane.

4.5 Techniques de remise en état

4.5.1 Enlèvement du béton

La quantité de béton à enlever est généralement déterminée par l'examen du délaminage; l'idéal serait d'éliminer tout le béton dont la teneur en chlorure est supérieure au seuil de corrosion, mais cette solution ne se révèle pas toujours pratique. Le périmètre de la zone de béton à enlever doit être découpé à la scie sur une profondeur d'au moins 15 mm. Il faut enlever le béton jusqu'à ce que l'on rencontre un béton et une armature sains. On peut se servir de brise-béton légers en veillant à endommager le moins possible le béton sous-jacent et adjacent qui n'est pas atteint. On commence depuis peu à employer des techniques de défonçage à l'eau sous forte pression. Cette méthode a l'avantage de réduire les dommages causés au béton sous-jacent par l'impact des brise-béton et d'assurer une adhérence plus forte entre le béton d'origine et le béton réparé.

4.5.2 Préparation de l'armature

Le métal de l'armature doit être décapé au jet de sable. Il faut ensuite évaluer la réduction relative de métal due à la corrosion. Il est fréquemment nécessaire d'ajouter de l'acier mais, normalement, il ne faut pas le souder à l'acier en place. L'acier requis doit se poser par chevauchement ou grâce à des chevilles liaisonnées. En général, l'acier neuf est revêtu d'époxyde. L'acier d'origine doit être revêtu à la main d'une peinture époxydique. Il y a un certain désaccord quant à la nécessité d'appliquer une couche d'époxyde sur l'acier en place. Certains experts estiment ce recours inutile puisque la grande partie de l'armature n'est pas traitée et que la pose d'une membrane étanche réduit la pénétration ultérieure du chlorure. D'autres croient cependant que l'application de peinture s'impose parce que l'acier de remplacement étant enrobé de béton sain, le béton adjacent non contaminé sera porté à produire de forts courants galvaniques risquant d'accélérer la corrosion. La décision finale peut être guidée par l'étendue globale des dommages, les limites budgétaires, ainsi que par l'expérience que l'on a de l'écran de protection et la confiance que l'on a en lui.

4.5.3 Remplacement du béton

Il faut appliquer un produit de reprise avant de couler le béton pour s'assurer qu'il adhère efficacement au béton d'origine. Les trois types de produits de reprise employés pour les travaux de ravalement du béton comprennent l'enduit sable-ciment, les résines époxydes et les additifs à base de polymères. L'expérience acquise sur les chantiers a démontré les avantages et les inconvénients de chaque matériau et le choix d'un produit particulier dépend des considérations économiques, de l'expérience acquise, des pratiques de construction et des conditions d'utilisation. Les enduits sable-ciment qui contiennent un mélange semblable à l'élément mortier du béton de ravalement ont été employés avec succès sur les chantiers depuis 15 ans, particulièrement pour le revêtement des tabliers de pont. Les résines époxydes offrent une résistance accrue, elles résistent à l'eau et à l'action des produits chimiques, tout en

offrant un temps de cure plus rapide, d'environ 6 heures. Toutefois, des défaillances peuvent se produire dans le matériau de reprise à base d'époxyde, à cause du coefficient de dilatation thermique différent des deux matériaux. Les additifs à base de polymères ont des caractéristiques de pénétration de l'humidité réduites et des temps de cure plus courts. Les addifits à base d'acétate de polyvinyle sont susceptibles de rupture en cas d'exposition répétée à l'humidité ou à un pH élevé. Le dosage du béton doit être conforme aux exigences des normes CAN3-A23.1-M77 et CAN3-A23.2-M77 pour une exposition de la catégorie A avec un béton de densité normale. Cela nécessite typiquement un mélange à air entraîné avec un rapport ciment-eau maximal de 0,45 et une teneur en ciment minimale de 360 kg/m^3. Il peut être nécessaire d'employer des plastifiants pour obtenir l'ouvrabilité voulue.

4.5.4 Traitement de la surface

La fonction première des mesures de traitement de la surface dans les travaux de réparation du béton est de fournir un écran qui réduise fortement la pénétration des chlorures ioniques et de l'humidité. En outre, la surface doit résister à l'usure due à la circulation. Il y a deux façons de procéder à la pose d'un écran de protection: couler un revêtement de béton d'une épaisseur typique maximale d'environ 50 mm ou poser une membrane imperméable à l'eau, avec ou sans couche d'usure.

Revêtements de béton

Quand on décide de couler un revêtement de béton, il faut considérer les surcharges permanentes et la réduction de la hauteur libre. Bien que quatre types principaux de revêtements de béton aient été employés, l'expérience acquise sur les chantiers est basée sur le béton dit "à faible affaissement et forte densité" (LSDC) et le béton au latex (LMC).

La faible perméabilité du béton "LSDC" est obtenue grâce à un très faible rapport ciment-eau et à un degré élevé de consolidation. Il nécessite un équipement de finition spécial. On applique un produit de reprise sur la surface du béton d'origine avant le coulage. Le mélange type contient un rapport ciment-eau approximatif de 0,3 et a une forte teneur en ciment de plus de 470 kg/m^3, son affaissement étant inférieur à 25 mm. Il faut prévoir une cure humide d'au moins 72 heures après la mise en place.

Le béton "LMC" se compose d'un mélange habituel de béton auquel on ajoute une émulsion de latex polymérique contenant environ 15 % de latex solide par masse de béton. L'émulsion sert à réduire la perméabilité et donne de bonnes caractéristiques d'adhérence. Comme l'épaisseur nécessaire est moindre avec le béton "LMC" qu'avec le béton "LSDC", il présente donc un avantage quant à la masse. Le béton support doit être mouillé avant le coulage pour minimiser la quantité d'eau qu'il pourrait absorber dans l'enduit de reprise, sinon l'adhérence entre le matériau de base et le matériau de ravalement serait réduite. Il faut prévoir une cure humide d'au moins 24 heures pour une hydratation appropriée du ciment, puis soumettre le béton à une cure sèche de 72 heures pour que le latex puisse former un film.

On a également employé des revêtements de béton habituels à faible rapport ciment-eau; bien que leur coût soit typiquement inférieur à celui des revêtements en "LSDC" et en "LMC", leur durabilité est typiquement moindre et leur perméabilité est plus grande. On a employé parfois des revêtements de béton de résine contenant des polymères ou des additifs époxydes. Leur emploi limité jusqu'à ce jour fait que l'on manque d'information sur leur comportement à long terme.

Systèmes d'étanchéité à l'eau

Ces systèmes se rangent dans les catégories générales des membranes et des bouche-pores. Le rôle des membranes est d'imperméabiliser la surface du béton. Les bouche-pores réduisent la pénétration en remplissant les pores à l'intérieur du béton.

Vu la grande variété de membranes et de bouche-pores offerts dans le commerce et l'absence d'essais normalisés permettant de vérifier la pénétration et la durabilité, il est difficile de spécifier les avantages et les inconvénients de ces différents produits.

Les bouche-pores doivent être réappliqués à des intervalles allant d'un à cinq ans. On ne peut pas les employer pour remplir les fentes superficielles du béton comme les fissures. Les différents types de bouche-pores comprennent l'huile de lin bouillie, la silicone, le caoutchouc chloré, les époxydes et les uréthanes. Un programme d'essais complets en laboratoire, parrainé en vertu du "National Cooperative Highway Research Program", a tenté d'évaluer le comportement d'une gamme étendue de bouche-pores de genres différents. Les résultats ont été publiés dans le rapport NCHRP n° 244 intitulé "Concrete Sealers for Protection of Bridge Structures", que l'on peut obtenir auprès du "Transportation Research Board" à Washington. Ce programme d'essais a d'abord déterminé les bouche-pores qui permettent de réduire la pénétration du chlorure dans le béton. Ceux qui se sont révélés efficaces ont ensuite été testés pour surveiller la réduction de la vitesse de pénétration du chlorure en fonction de différentes teneurs en humidité, la vitesse de couverture et les conditions simulées de vieillissement à long terme. Le programme a fait ressortir un comportement très variable parmi les bouche-pores ayant subi l'essai. Toutefois, ceux qui se sont révélés efficaces pour réduire la pénétration du chlorure, l'ont été tout au long des essais en laboratoire.

Les membranes d'étanchéité se sont généralement mieux comportées que les bouches-pores pour la réparation des garages de stationnement, elles durent plus longtemps et elles résistent mieux à la pénétration du chlorure. Toutefois, elles coûtent généralement plus cher. Il existe deux types de systèmes à membranes: ils sont dits "à membrane mince" et "à membrane épaisse". Les systèmes à membrane mince se composent d'une membrane de caoutchouc d'environ 1 mm d'épaisseur et d'une couche d'usage d'époxyde ou de caoutchouc d'une épaisseur approximative de 0,5 mm dans laquelle on enrobe du sable siliceux. Les membranes peuvent être fabriquées en feuilles, mais, d'après l'expérience acquise sur les chantiers, la forme liquide donne de meilleurs résultats. Les systèmes à membrane épaisse se composent de bitume

caoutchouté appliqué à chaud ou à froid (3 à 4 mm d'épaisseur) que l'on recouvre d'une couche d'usure faite d'un mastic d'asphalte (15 à 25 mm d'épaisseur). L'étanchéité du mastic d'asphalte confère une protection supplémentaire. On peut faire varier l'épaisseur pour obtenir une pente d'écoulement adéquate vers les avaloirs. Malgré que les systèmes à membrane épaisse coûtent moins cher que ceux à membrane fine, on ne peut pas les employer dans les endroits où la hauteur est limitée. En outre, la membrane peut être attaquée par l'huile et l'essence et, une fois usée par l'abrasion due à la circulation, il est très difficile de l'enlever pour la remplacer. On a constaté que le comportement de la membrane dépendait généralement beaucoup de la méthode de pose employée. La surface de béton doit être sèche, exempte de contaminants comme l'huile et les restes de membranes précédentes, sinon il faut s'attendre à un cloquage. Le cloquage est dû à la dilatation des gaz, aux solvants et à l'humidité; il peut parfois nécessiter l'enlèvement total d'une membrane qui vient d'être posée. On peut se procurer des renseignements sur un produit particulier auprès du fabricant. On peut trouver des lignes directrices sur les écrans de protection pour le béton dans la publication ACI 515.1R-79 intitulée "A Guide to the Use of Waterproofing, Dampproofing, Protective and Decorative Barrier Systems for Concrete", publiée par l'American Concrete Institute.

4.5.5 Protection cathodique

On a commencé à employer les systèmes de protection cathodique sur les ponts il y a environ dix ans. Étant donné que les problèmes de détérioration dus à la corrosion étaient semblables dans les garages de stationnement étagés, on a décidé de leur appliquer cette technique. Bien que le coût initial de son installation soit élevé, la protection cathodique est une méthode qui a des chances de prévenir la corrosion après une réparation.

La corrosion se produit aux endroits où le courant électrique quitte une partie métallique appelée anode. Le principe de la protection cathodique consiste à renverser le passage du courant en se servant d'une source appliquée de l'extérieur, de façon que le flux d'électrons soit toujours envoyé dans l'armature. On obtient cela en reliant l'armature à la borne négative d'un générateur de courant continu et en enrobant dans le béton un réseau électrique positif au niveau de l'armature. Les systèmes offerts dans le commerce se composent de faisceaux de fils de platine ou de carbone enrobés dans un revêtement ou encastrés dans des rainures taillées à la surface du béton. On a également mis au point des systèmes de grillages de polymères conducteurs, ainsi qu'une peinture conductrice que l'on applique sur la face inférieure de la dalle. Le courant est généralement fourni par un circuit comprenant un transformateur et un redresseur qui transforme le courant 110 volt alternatif en courant continu basse tension. La puissance requise peut être contrôlée soit par un système de rétroaction qui utilise des électrodes de référence placées dans le béton soit des sondes de contrôle de la corrosion noyées dans le béton. La consommation de courant est généralement faible, soit moins de 10 watts pour 100 m^2. Puisque la protection cathodique n'empêche pas l'eau de pénétrer dans le béton, il est nécessaire de poser aussi un écran matériel. La protection cathodique dans les garages de stationnement étagés est une

technique encore relativement récente de sorte qu'on n'en connaît pas encore l'efficacité ni le coût d'entretien.

4.6 Évaluation de l'efficacité des méthodes de réparation

Il ne faut pas s'attendre que les réparations tiennent pendant toute la durée utile d'une structure. L'étude de 1984 a essayé d'évaluer l'efficacité des différentes réparations en surveillant la progression de la détérioration depuis la réparation de certains garages de stationnement. La détérioration après les réparations a été mesurée en examinant le délaminage et la corrosion. Le tableau 3 donne la description des systèmes de protection par genre et le tableau 4 les résultats de l'examen. La description des types de garages concernés est donné dans le rapport sur l'étude de 1984. Les résultats de l'étude sont basés sur une taille d'échantillon limitée et portent sur une période de surveillance allant de 2 à 6 ans. Les conclusions suivantes sont tirées de l'étude:

- les écrans de protection par membrane se comportent mieux que les bouche-pores. Ils permettent de freiner considérablement la progression du délaminage et de la corrosion

- il est raisonnable de s'attendre que le délaminage progresse de 1 p.c. par an après la réparation et la pose d'une membrane de bonne qualité. Cette valeur représente approximativement le quart de la détérioration qui aurait lieu sans la réparation

- on juge que la pose d'une membrane d'étanchéité constitue une mesure efficiente de remise en état.

4.7 Représentation photographique

Les fig. 12 à 18 font une synthèse photographique des détériorations types rencontrées dans les garages de stationnement étagés, des techniques d'investigation et des mesures de remise en état.

5.0 MÉTHODES D'INSPECTION ET D'ENTRETIEN

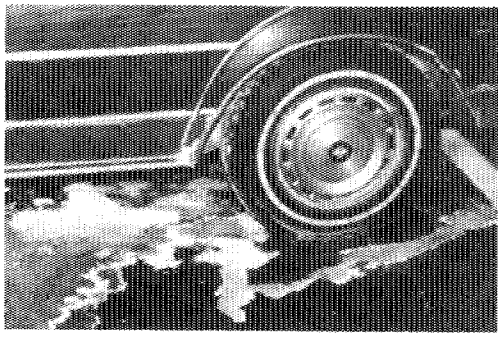
Vu les exigences particulières à leur utilisation spécialisée et leur environnement contraignant, les garages de stationnement étagés requièrent des des inspections périodiques et des méthodes d'entretien qui tiennent compte que ce sont aussi des structures. Les garages de stationnement étagés peuvent être considérés comme une forme hybride de structure se situant entre le pont et le bâtiment, dont chacun nécessite des méthodes d'inspection et d'entretien particulières. Lorsqu'on essaie de déterminer les exigences d'inspection et d'entretien pour les garages de stationnement étagés, il ne faut pas oublier que les garages de stationnement multi-étages souterrains, en béton armé, sont de création plutôt récente, et que les données relatives à leur réparation le sont encore plus. Les travaux de remise en état font appel à des techniques et des matériaux nouveaux qui doivent encore subir l'épreuve du temps. Cela

Tableau 3 Description générique des systèmes d'étanchéité d'après une étude réalisée par la SCHL en 1984[12]

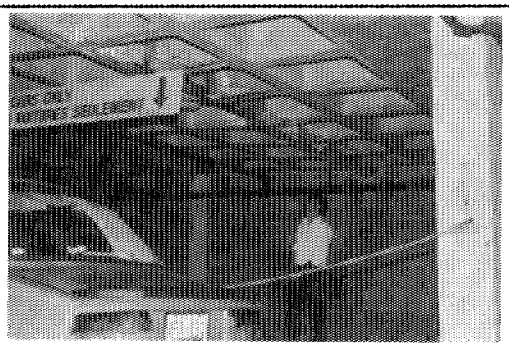
Caractérisation du produit	Description générique
W-1	Revêtement cimentaire appliqué sur place, renforcé de fibre de verre courte à l'épreuve des alkalis.
W-2	Membrane d'étanchéité en bitume caoutchouté appliquée sur place, avec couche d'usure séparée et mastic d'asphalte.
W-3	Membrane d'étanchéité au latex-néoprène appliquée sur place, avec couche d'usure en goudron de houille et époxyde.
W-4	Membrane d'étanchéité en polyuréthane à deux composants, appliquée sur place, avec couche d'usure en polyuréthane et sable.
W-5	Membrane d'étanchéité en goudron de houille et époxyde, renforcée d'une feuille en fibre de verre recouverte de sable siliceux.
W-6	Membrane d'étanchéité en polymère caoutchouté-asphalté, appliquée sur place, avec couche d'usure en bitume caoutchouté et latex.
I-1	Membrane d'étanchéité cimentaire appliquée sur place, contenant des catalyseurs et du quarts traité.
S-1	Solution de résines d'époxyde souples, à base de solvant, à deux composants, appliquée sur place.

Tableau 4 Résultats de l'évaluation de l'efficacité des méthodes de réparation [13]

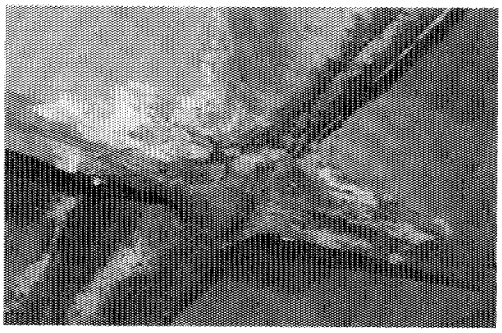
Garage	Âge (ans)	Système de protection	Dommage (Pourcentage de la dalle délaminée depuis réparation)	Temps depuis réparation (années)	Corrosion
c1	13	W-3 (perméabilité négligeable)	4.6	3	Aucune
c2	16	W-4 sur époxyde (perméabilité nulle)	0.2	5	Aucune
c3	26	Divers	17.4	6	Dans 2.8 % de la zone
c4	13	I-1 dans les fissures	s/o	2	s/o
c5	9	W-1 (perméabilité faible)	1	2	28 %
c6	15	Bouche-pores	80	2-3	42.1 %
c7	26	Asphalte	39.4	3	35.2 %
c8	9	W-2	1.8	5	1.7 %
c9	7	W-5 (perméabilité nulle)	0.8	5	Aucune
c10	21	W-3 sur asphalte sur époxyde	6.6	2	Aucune
c11	10	S-1	37.7*	4-5	Pas d'essai
Garage privé	9	W-3	8.3	3	2.3 %



Dépôts importants de sel de déverglaçage à la surface de la dalle



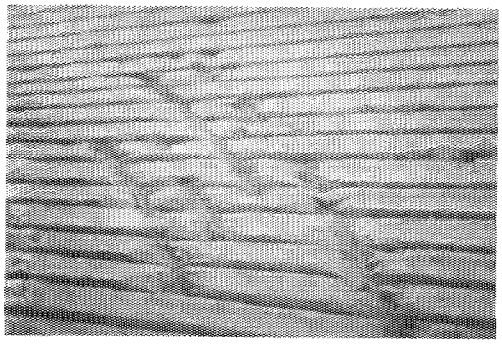
Partie du garage de stationnement fermée à cause de la détérioration



Vue rapprochée montrant les épaufrures du béton, l'armature d'acier corrodée et les dépôts dus à la lixiviation

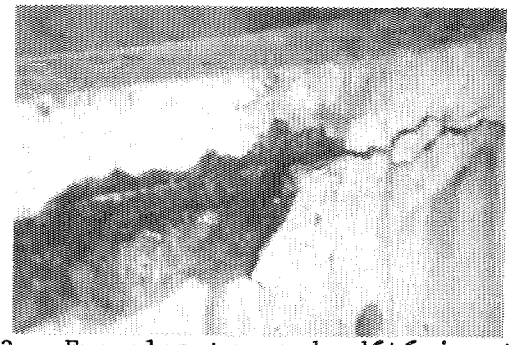
Fig. 12. Pénétration des sels de déverglaçage et détérioration résultante de la surface inférieure du plancher-dalle

Lixiviation importante à la face inférieure de la dalle et dépôts résultants sur les servitudes mécaniques



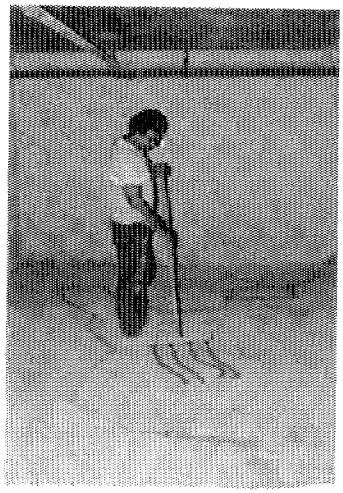
Épaufrures en V sur une rampe. Noter l'enrobage de béton moins épais à cause des rainures de traction

Épaufrures à la face inférieure du plancher-dalle et tige de construction corrodée

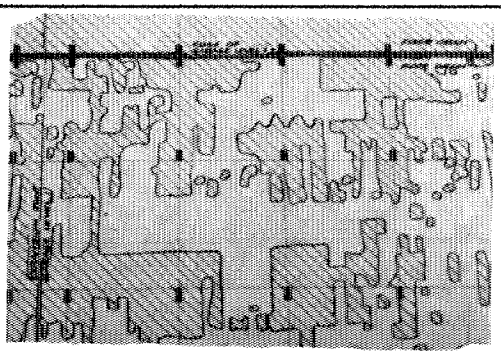


Vue rapprochée montrant les épaufrures sur la poutre faîtière

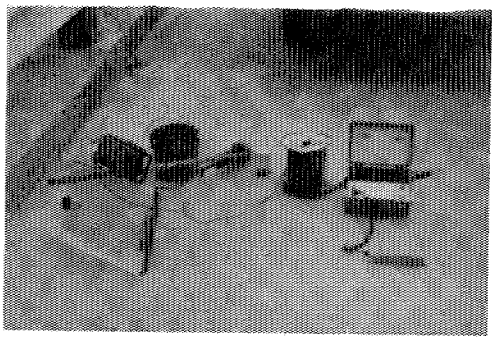
Fig. 13. Exemples types de détérioration d'un garage de stationnement étagé.



Méthode de la chaîne traînée pour le repérage des parties délaminées

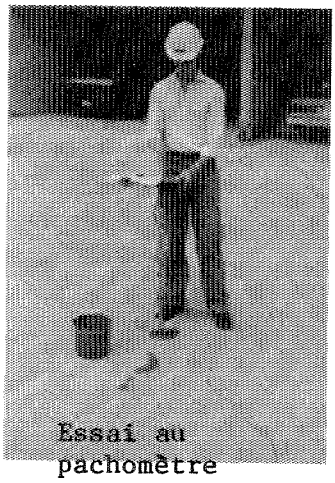


Les secteurs ombrés du plan représentent les parties délaminées



Équipement d'essai à électrodes servant à mesurer la corrosion (à gauche)

Pachomètre servant à mesurer l'épaisseur de l'enrobage de béton (à droite)

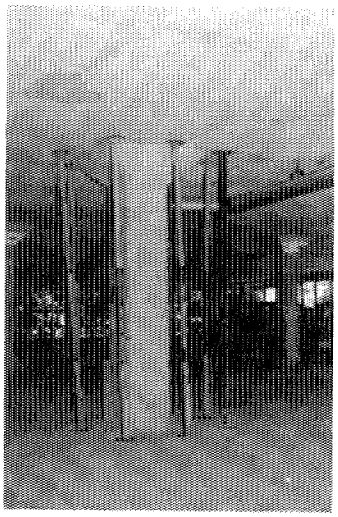


Essai au pachomètre

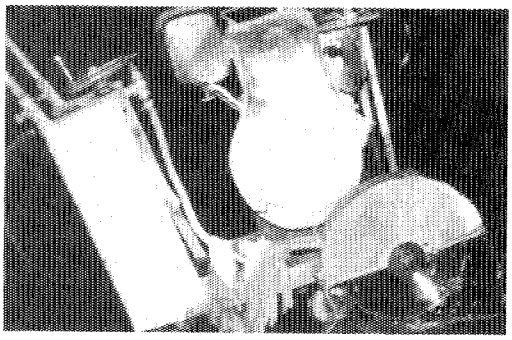
Essai avec un instrument à électrodes

Démonstration de l'essai avec un instrument à électrodes et avec un pachomètre

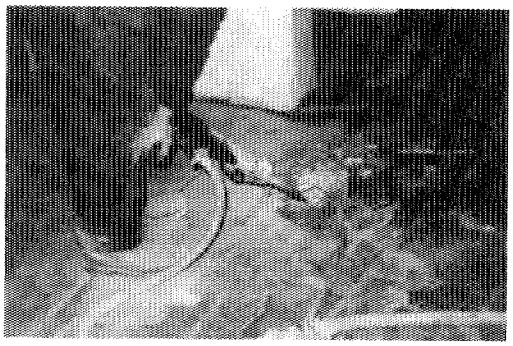
Fig. 14. Méthodes d'essai appliquées lors d'un examen d'état



Partie d'une dalle étayée au voisinage du chapiteau d'un pilier avant le burinage

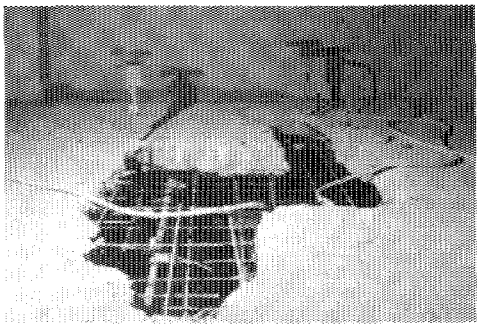


Scie à béton découpant autour de la partie à buriner

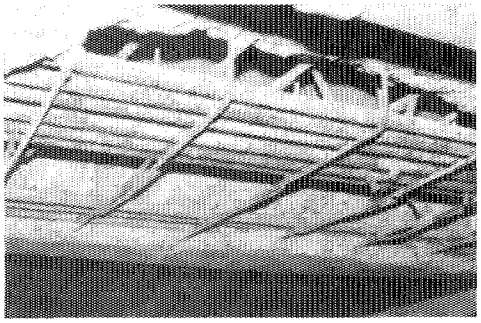


Burinage du béton avec un brise-béton

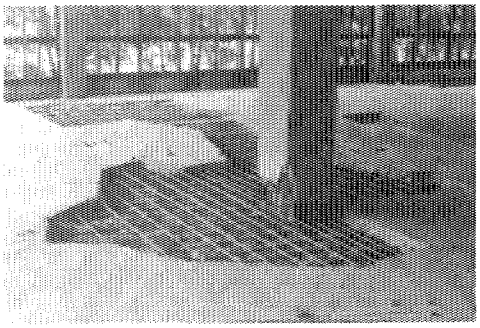
Fig. 15. Préparation d'un plancher-dalle pour la réparation



Béton entièrement défoncé

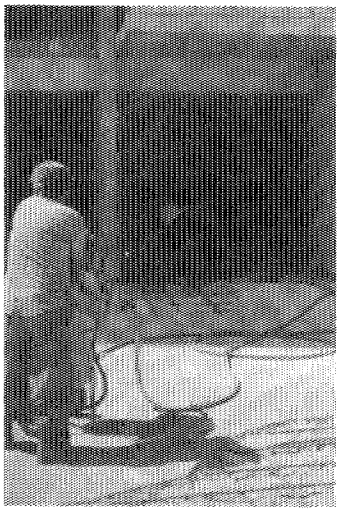


Acier d'une poutre renforcée mis à nu et détérioration importante du béton

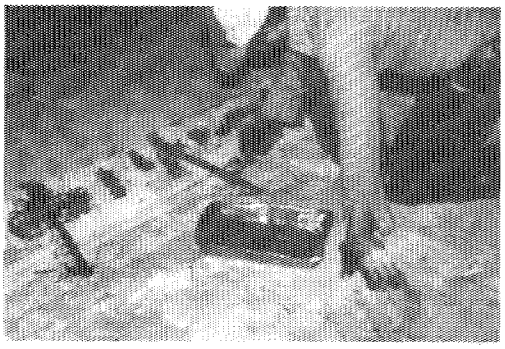


Vue d'ensemble de l'armature mise à nu

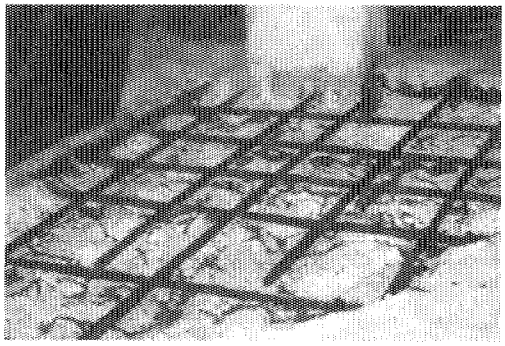
Fig. 16. Burinage important nécessaire pour mettre à nu les parties corrodées de l'armature



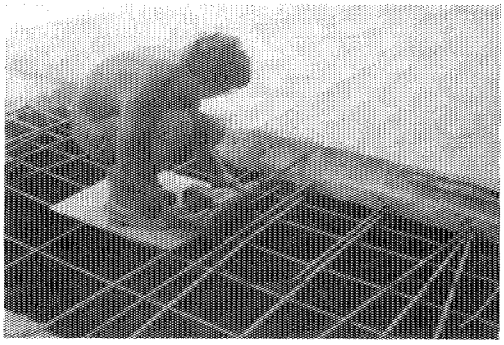
Décapage de l'armature au jet de sable



Application d'un revêtement d'époxyde sur l'acier décapé au jet de sable

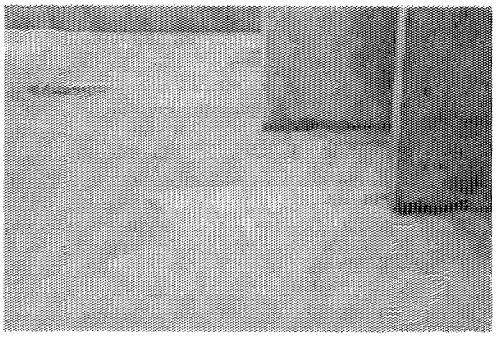


Armature d'acier entièrement recouverte de peinture époxyde

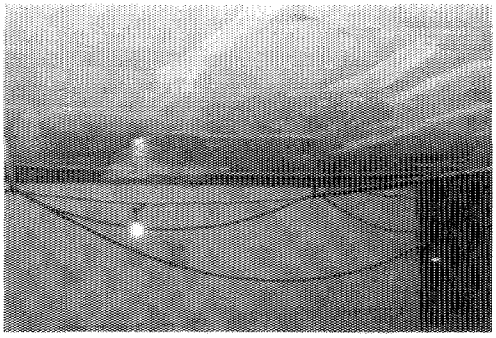


Perçage des trous de chevilles d'ancrage de l'acier rapporté

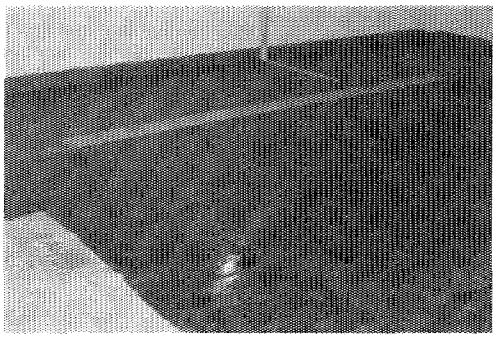
Fig. 17. Suite des mesures correctives



Vue d'ensemble montrant les parties ravalées



Face inférieure de la dalle montrant la partie ravalée



Membrane d'étanchéité époxyde en place

Fig. 18. Dernières étapes de la réparation

signifie que toute méthode d'inspection et d'entretien doit conserver un certain degré de prudence afin que les problèmes ultérieurs de maintien en état n'atteignent pas l'ampleur des dommages que l'on rencontre dans de nombreux garages de stationnement d'aujourd'hui.

En se basant sur les connaissances actuelles, nous recommandons les méthodes d'inspection et d'entretien suivantes:

- une inspection annuelle doit être effectuée par du personnel qualifié. Il faut surveiller particulièrement l'état de tout écran de protection, s'il y a lieu. Quand l'écran de protection matériel consiste en un bouche-pores ou une membrane, l'inspection visuelle est relativement facile. Quand la membrane est recouverte d'une couche d'usure, les dommages de la membrane n'apparaissent pas aussi facilement; toutefois, une recherche des fuites à la partie inférieure du plancher donnera une bonne idée des premiers signes de défaillance de la membrane.

- Le propriétaire doit appliquer un programme d'entretien régulier. Ce programme doit comprendre l'inspection des avaloirs pour s'assurer qu'ils sont propres et en état de fonctionner; le lavage à l'eau des planchers; et une ventilation adéquate. Le document de référence 1, "Parking Garage Maintenance Manual" donne tous les détails particuliers relatifs aux travaux d'entretien dans les garages de stationnement étagés et à leur fréquence. Il faut aussi surveiller certaines parties de ces structures, comme les endroits à grande circulation et les endroits très humides. Il faut noter deux autres points: premièrement, en chauffant moins on prolonge la durée utile du plancher; et deuxièmement, il faut y éviter l'amoncellement des sels ou des mélanges sel/sable de déverglaçage.

6.0 QUESTIONS ÉCONOMIQUES

6.1 Vue d'ensemble

Les coûts associés à la détérioration des garages de stationnement étagés et aux réparations subséquentes sont très variables, car ils dépendent d'un grand nombre de facteurs, y compris:

- La nature et l'étendue de la détérioration. La nature de la détérioration affecte certains points comme la présence de corrosion, la pénétration relative d'un étage à l'autre des dépôts dus à la lixiviation et les répercussions de la corrosion et des épaufrures sur la structure. L'étendue de la détérioration détermine la quantité de béton et d'armature qu'il faut enlever et remettre.

- Les détails de structure comme l'impact de la solidité du garage de stationnement sur le reste du bâtiment, l'épaisseur de la dalle et le type de dalle.

- La configuration du garage. Les coûts de réparation dépendent directement de la grandeur du garage de stationnement, de la complexité des rampes, de l'espacement des piliers et du nombre d'étages de stationnement.

- Les détails d'utilisation comme la présence d'installations mécaniques et électriques, encastrées ou suspendues, le besoin de changer la pente, l'accès pour les réparations, l'horaire des travaux de réparation, les exigences de finition de la surface.

- L'évaluation de la durée utile ultérieure de la structure. L'âge de certains garages peut ne pas justifier des réparations de grande envergure, tandis que le mauvais état de garages plus récents pourrait justifier des réparations considérables pour atteindre la durée utile requise.

- Le détails de financement des réparations comme les taux d'intérêt du moment, la source de financement et la perte de revenu subie pendant la remise en état, due à la fois à une diminution des rentrées et au coût de déplacement des espaces de stationnement.

- L'évaluation du comportement à long terme des divers écrans de protection. Comme la plupart de ces systèmes ne sont en place que depuis moins de 10 ans, on ne dispose que de résultats limités quand à leur comportement réel.

Vu les nombreux facteurs en cause, il est difficile d'établir des principes spécifiques applicables à une large gamme de cas de réparation, pour en arriver à la solution de réparation la plus efficiente. L'étude de 1984 a toutefois permis de déterminer quelques lignes directrices qui se sont révélées

capables de faire baisser le coût global des réparations, à savoir:

- des réparations de grande qualité reviennent généralement moins cher à la longue que des réparations superficielles moins coûteuses au départ

- les coûts de réparation seront moins importants si l'on commence à consacrer de l'argent à la surveillance et aux réparations tôt dans la vie du garage de stationnement, plutôt que d'attendre que les dégâts soient importants avant de les réparer.

La réparation des garages de stationnement étagés est généralement un compromis entre ce qui est techniquement possible et ce qui est économiquement faisable. Par exemple, il est souhaitable d'enlever tout le béton contaminé par le chlorure lors d'une remise en état, avant de poser une membrane d'étanchéité. Même si la plus grande partie du béton a une teneur en chlorure supérieure au seuil de la corrosion, ce béton peut être généralement sain et un enlèvement total ne se justifierait pas économiquement. On a essayé d'aborder la solution à ce type de problème de différentes façons. "Manning and Ryell" dans le "Transportation Research Record" n° 762 publié en 1980, ont mis au point une matrice décisionnelle pour les différentes options possibles de réparation de tabliers de pont[14]. Vu les nombreuses variables à considérer dans la réparation des garages de stationnement étagés, il serait difficile de leur adapter un tel système. Généralement, la façon de procéder consiste à se servir des résultats d'un examen de l'état pour quantifier l'étendue du problème et calculer le coût des différentes options de réparation. Cette façon de procéder repose beaucoup sur le jugement et l'expérience des ingénieurs.

6.2 Estimation des coûts

L'estimation du coût des options de réparation nécessite une évaluation du prix de certains éléments particuliers comme l'enlèvement du béton et les systèmes de revêtement, ainsi qu'une évaluation des conséquences à long terme du coût du programme de réparation. Le tableau 5 dresse la liste des différents coûts unitaires types des éléments de réparation. Elle est basée sur des données SCHL relatives aux prix moyens des soumissions reçues en Ontario en 1984.

On peut établir une comparaison des coûts à long terme en se servant de la technique d'analyse d'estimation du coût global. Cet outil de prévision financière prend les coûts futurs touchés par l'inflation et les taux d'intérêt et les ramène à une valeur actualisée, permettant ainsi de comparer les différentes options en considérant les coûts à long terme. Trois exemples de programmes de réparation pour la durée utile sont présentés aux fig. 19, 20 et 21. Les fig. 19 et 20 donnent les détails de deux cas de structures réparées avec un bouche-pores dont la durée utile supposée était respectivement de 2 ans et 3 ans. La fig. 21 donne les détails d'un cas de structure réparée avec une membrane d'étanchéité de haute qualité dont la tenue en service est estimée à 10 ans. L'analyse d'estimation du coût global pour les garages de stationnement

Tableau 5 Prix moyens SCHL pour les soumissions reçues en Ontario en 1984

Élément de la réparation	Coût unitaire $
1. Enlèvement du béton bitumineux (102 mm)	7.17/m^2
2. Enlèvement du béton bitumineux (manuel)	17.34/m^2
3. Coulage du béton bitumineux (64 mm)	10.18/m^2
4. Enlèvement et remplacement du béton (25 mm)	86.49/m^2
5. Enlèvement et remplacement du béton (77 mm) Toiture	95.44/m^2
6. Enlèvement et remplacement du béton (77 mm) Intérieur	98.35/m^2
7. Remplacement complet du béton de la dalle	264.46/m^2
8. Réparations dessous (poutre maîtresse et piliers)	305.89/m^2
9. Membrane étanche et couche d'usure	
Duronite	27.40/m^2
Vulcan	20.85/m^2
Rubberoad	23.90/m^2
10. Avaloirs	
E 1830	664.00 ch.
E 1400	450.00 ch.
11. Colmatage des fissures	113.26/m
12. Protection cathodique	85.79/m^2
13. Revêtement de béton au latex	38.00/m^2
Joints (contrôle de la fissuration)	6.42/m
14. Revêtement de béton	23.85/m^2
Joints (contrôle de la fissuration)	9.14/m

Hypothèses

- aucune protection initiale
- réparation importante la 6e année
- application d'un bouche-pores de grande qualité
- durée utile prévue pour le bouche-pores, 2 ans
- réparations périodiques de la dalle la 12e, 18e, 24e, 30e et 36e année
- taux d'actualisation de 11 %, taux d'inflation 5 %

		VALEUR ACTUELLE $
1.	Coût des immobilisations	
	10 000 m² x 0.716 x 82.00 $	587 120
2.	Coûts d'entretien	
	Coût annuel d'entretien pour les années 6 à 40	
	10 000 m² x (14.837 x 0.716) x 1.10 $	116 856
3.	Renouvellement cyclique	
	a) Nettoyage des dalles et nouvelle application de bouche-pores (2e, 4e, 6e, 8e année, etc.)	
	10 000 m² x 7.494 x 9.15 $	685 701
	b) Réparations périodiques (12e, 18e, 24e, 30e, 36e année, etc.)	
	10 000 m² x 1.47 x 36.50 $	536 550
	c) Coûts mineurs d'interruption de stationnement (2e, 4e, 8e, 10e, 14e, 16e, 20e, 22e, 26e, 28e, 32e, 34e et 38e année)	
	300 x 5.308 x 12.00 $	19 109
	d) Coûts majeurs d'interruption de stationnement pendant les réparations cycliques (6e, 12e, 18e, 24e, 30e et 36e année)	
	300 x 2.186 x 50.00 $	32 790
	COÛT TOTAL DE CETTE OPTION	1 978 126 $

Fig. 19 Analyse du coût global - Structure protégée avec un bouche-pores ayant une durée utile de 2 ans

Hypothèses

- aucune protection initiale
- réparation importante la 6e année
- application d'un bouche-pores de grande qualité
- durée utile prévue pour le bouche-pores, 3 ans
- réparations périodiques de la dalle la 12e, 18e, 24e, 30e et 36e année
- taux d'actualisation de 11 %, taux d'inflation 5 %

		VALEUR ACTUELLE $
1.	Coût des immobilisations	
	10 000 m^2 x 0.716 x 82.00 $	587 120
2.	Coûts d'entretien	
	Coût annuel d'entretien pour les années 6 à 40	
	10 000 m^2 x (14.837 x 0.716) x 1.10 $	116 856
3.	Renouvellement cyclique	
	a) Nettoyage des dalles et nouvelle application de bouche-pores (3e, 6e, 9e, 12e année, etc.)	
	10 000 m^2 x 4.888 x 9.15 $	447 252
	b) Réparations périodiques (12e, 18e, 24e, 30e, 36e année, etc.)	
	10 000 m^2 x 1.47 x 36.50 $	536 550
	c) Coûts mineurs d'interruption de stationnement (3e, 9e, 15e, 21e, 27e, 33e et 39e année)	
	300 x 2.702 x 12.00 $	9 727
	d) Coûts majeurs d'interruption de stationnement pendant les réparations cycliques (6e, 12e, 18e, 24e, 30e et 36e année)	
	300 x 2.186 x 50.00 $	32 790
	COÛT TOTAL DE CETTE OPTION	1 730 295 $

Fig. 20 Analyse du coût global - Structure protégée avec un bouche-pores ayant une durée utile de 3 ans

Hypothèses	. aucune protection initiale	
	. réparation importante la 5e année	
	. pose d'une membrane et d'une couche d'usure	
	. durée utile prévue pour la couche d'usure, 10 ans	
	. taux d'actualisation de 11 %, taux d'inflation 5 %	
1.	Coût des immobilisations	VALEUR ACTUELLE $
	10 000 m^2 x 0.757 x 110.00 $	832 700
2.	Coûts d'entretien	
	Coût annuel d'entretien pour les années 6 à 40	
	10 000 m^2 x 11.353 x 1.10 $	124 883
3.	Renouvellement cyclique	
	a) Enlèvement et pose d'une nouvelle couche d'usure et toute réparation consécutive de la membrane (15e, 25e et 35e année)	
	10 000 m^2 x 0.827 x 55.00 $	459 850
	b) Perte de revenu pour interruption de stationnement (5e, 15e, 25e et 35e année)	
	300 x 1.584 x 50.00 $	23 760
	COÛT TOTAL DE CETTE OPTION	1 436 193 $

Fig. 21 Analyse du coût global - Structure protégée avec un système de membrane ayant une durée utile de 10 ans

étagés nécessite un certain nombre de suppositions. Certaines comme les coûts futurs de financement et les limites de tenue en service, qui peuvent avoir une incidence importante sur les coûts totaux sont difficiles à prévoir. Le comportement d'un écran de protection est mal connu en raison du manque d'expérience. D'autres suppositions comme le coût initial des immobilisations peuvent être évaluées avec plus de sûreté si elles sont basées sur les résultats d'un examen d'état précis et les taux d'intérêt du moment. L'influence relative de suppositions données peut être examinée pour un garage de stationnement particulier, en tenant compte de tout un éventail de frais de financement possibles et de la tenue en service d'un écran de protection, ou des deux. Les estimations de coût global des fig. 19 à 21 sont faites à partir des suppositions suivantes:

- surface du plancher-dalle suspendu — 10 000 m^2
- durée utile du garage de stationnement — 40 ans
- capacité du garage de stationnement — 300 voitures
- prix mensuel du stationnement — 50.00 $
- taux d'actualisation — 11%
- taux d'inflation — 5%
- 10 % de la surface de la zone présentent des signes de délaminage lorsque des réparations importantes s'avèrent nécessaires (6e année pour les exemples de réparation avec bouche-pores et 5e année pour l'exemple avec membrane d'étanchéité)
- un programme annuel d'entretien comprenant le lavage périodique de la dalle et des réparations mineures de la couche d'usure dans les endroits à forte circulation — 1.10/m^2
- une durée utile de 10 ans pour le système de membrane
- une durée utile de 2 et 3 ans pour les bouche-pores (deux cas envisagés)
- un délaminage annuel de 2 % pour le béton protégé par des bouche-pores et de 1 % pour le béton protégé par des systèmes de membrane.

Alors que dans les trois exemples donnés, le garage de stationnement protégé par une membrane d'étanchéité affiche le coût global le plus bas, il faut évaluer soigneusement les coûts de réparation de chaque garage à partir des meilleures données - qu'il est possible d'obtenir quant au comportement, aux coûts des matériaux et aux autres facteurs - qui valent à un certain moment et pour le lieu particulier où le garage est construit. Les coûts globaux sont très difficiles à prévoir sur une durée utile typique de 40 à 50 ans et la prudence sur le plan technique voudrait que l'on s'oriente vers les mesures les

plus efficaces qui soient pour retarder l'action de la corrosion.

En ce qui concerne les coûts d'inspection et d'entretien des garages de stationnement réparés, le peu d'expérience que l'on a justifie de prévoir un budget annuel s'étalant entre 0,5 et 2 % environ de la valeur de la structure. En supposant qu'en 1985 le coût de construction typique est de 320 $/m^2 pour un garage de stationnement multi-étages souterrain en béton armé, le coût annuel d'inspection et d'entretien s'échelonnerait entre 1,60 et 6,40 $/m^2.

ANNEXE A

Ordre chronologique des étapes de détérioration des garages de stationnement étagés

Ordre chronologique des étapes de détérioration des garages de stationnement étagés

Juillet 1977: un premier ouvrage

"Design Durable Maintenance Free Prestressed Concrete Parking Structures", H.C. Walker, "Concrete Construction".

Mars 1980: un journal consacre toute une édition aux garages de stationnement étagés

C'est la première fois qu'un journal technique à grand tirage consacre toute une édition à la conception et à la réparation des garages de stationnement étagés: "Concrete International, Design and Construction" vol. 2, n° 3, mars 1980.

Août 1981: premier ensemble de lignes directrices

"Investigation, Repairs, Design and Construction of Parking Structures". Ces lignes directrices provisoires sont élaborées par le comité des garages de stationnement étagés de l'ACI, section de l'Ontario. Elles couvrent les examens d'état et les méthodes de réparation des garages de stationnement détériorés.

Septembre 1981: une première conférence

Congrès d'automne de l'American Concrete Institute à Québec.

Des conférences ultérieures portent sur les garages de stationnement étagés:

- Septembre 1982: séminaire de la "National Association of Corrosion Engineers" à Chicago (Illinois).

- Octobre 1984: atelier d'une journée sur le sujet "Concrete Failures and Deterioration and Rehabilitation of Parking Garages" (Défauts et détérioration du béton dans les garages de stationnement étagés et remise en état des lieux) à Ottawa (Ontario).

- Mai 1985: atelier international sur le sujet "Alkali-Aggregate Reactions in Concrete and Construction and Rehabilitation of Concrete Parking Structures" (Réactions alkali-agrégat dans le béton, construction et remise en état des garages de stationnement étagés) à Montréal (Québec).

- Octobre 1985: quatrième congrès canadien intitulé "Learning from Experience/Avoiding Failures" (L'expérience nous enseigne comment éviter les défaillances) à Ottawa (Ontario).

Novembre 1981: rapport SCHL

La SCHL mandate un examen visuel de 84 garages de stationnement étagés attenant à des immeubles résidentiels dans l'agglomération d'Ottawa. Elle publie par la suite les résultats dans un rapport intitulé "The Nature, Extent and Impact of Residential Parking Strcutures' Deterioration" en novembre 1981. C'est la première étude de la sorte au Canada.

1982: étude entreprise par la Société de logement de l'Ontario

Il s'agit d'un examen visuel de 159 garages de stationnement étagés en Ontario. Ces garages reçoivent la cote de 1 (aucune détérioration importante) à 10 (état très avancé de détérioration).

Mai 1982: réunion du comité de direction de l'ACNOR

Un groupe de travail est créé pour établir le mandat du comité technique qui sera formé pour préparer une norme ACNOR sur les garages de stationnement étagés durables. Ce groupe est présidé par M. K.H. Thompson de Travaux publics Canada.

Juillet 1982: première publication du CRNC

"Détérioration des garages de stationnement", par G.G. Litvan, CBD 224F, Conseil national de recherches du Canada.

Juillet 1982: manuel d'entretien

"Parking Garage Maintenance Manual" publié par le "Parking Consultants Council" de la "National Parking Association" (É.-U.) Ce manuel couvre les méthodes de nettoyage et d'entretien considérées comme essentielles pour prévenir la détérioration prématurée des garages.

Printemps 1983: formation d'un comité technique de l'ACNOR

Ce comité est formé pour rédiger l'avant-projet de la norme ACNOR S413M, "Durable Parking Structures" (Garages de stationnement étagés durables). Il se réunit pour la première fois en octobre 1983. La norme qui devait être publiée en mai 1986, régit les garages de stationnement neufs. Aucune mesure n'a encore été prise quant à la préparation d'une norme sur la réparation des garages existants.

Septembre 1984: Bulletin technique des constructeurs SCHL

Exigences relatives à la conception de toutes les nouvelles habitations avec garage de stationnement, financées ou assurées aux termes de la LNH après octobre 1984.

Décembre 1984: étude SCHL

La SCHL, le CNRC, TPC et ASC mandatent la compagnie "Troy Ltd." d'effectuer une étude sur les garages de stationnement étagés à Montréal, Toronto et Ottawa ainsi que sur un petit nombre de ces garages dans les Maritimes.

Mars 1985: formation d'une association représentant l'industrie de la réparation

Neuf entrepreneurs de Toronto forment une association pour représenter cette nouvelle industrie. Ils vont recruter des membres parmi tous les entrepreneurs canadiens qui se spécialisent dans la réparation des garages de stationnement étagés.

Mise sur pied d'un code aux États-Unis

Les deux articles de pointe sousmentionnés, qui traitent de la détérioration des garages de stationnement étagés, ont été récemment publiés dans le "Journal of the American Concrete Institute":

- "Corrosion of Metal in Concrete"[3]
  Janvier - février 1985

- "State-of-the-Art Report on Parking Structures"[15]
  Juillet- août 1985

Un code régissant l'investigation et la réparation des garages de stationnement étagés existants, ainsi que la conception des nouveaux garages, devrait paraître en 1988-1989.

ANNEXE B

Liste de vérification de l'état d'un garage de stationnement étagé

Synthèse des renseignements sur les plans et devis relatifs aux garages de stationnement étagés

A. Renseignements généraux

1. Nom et adresse de l'immeuble:

_____
_____
_____

2. Date de la dernière révision des plans: _____

3. Places de stationnement: Terrasse: _____ Sous- sol: _____

4. Type de structure: (dalle plate/dalle plate avec retombées/dalle unidirectionnelle/précontrainte/acier d'armature) (encercler)

5. Aérien ou souterrain. Fermé ou ouvert.

6. Chauffé ou non chauffé.

7. Structure séparée ou attenante à l'immeuble.

8. Nombre d'étages, terrasse exclue: _____

B. Données de conception

1. Sur des feuilles séparées montrer:

- plan type de l'étage avec carroyage, dimensions, etc.
- emplacement des joints de dilatation
- détails des joints de dilatation
- détails des avaloirs
- vue en coupe de la structure

Note: S'il y a une membrane d'étanchéité montrer les raccordements aux avaloirs et aux joints de dilatation.

2. Béton:

Catégorie d'exposition spécifiée: A B C D
(encercler - se reporter au tableau 7 de la norme ACNOR CAN3-A23.1-M77, "Béton - Constituants et exécution des travaux".

Air entraîné: _____%

Teneur minimale en ciment: _____kg/m^3

Résistance après 28 jours: _____MPa

3. Enrobage spécifié: _____mm

4. Membrane d'étanchéité/bouche-pores spécifié?

Type: _____

5. Tiges d'armature revêtues d'époxyde? _____

6. Pente vers les avaloirs _____%

7. Distance entre les avaloirs: _____mètre

Liste pour la vérification de l'état des garages de stationnement étagés

A. Renseignements généraux

1. Nom et adresse de l'immeuble

_____
_____
_____

2. Nom et numéro de téléphone du gérant de l'immeuble

_____
_____

3. Type de construction: _____

4. Réparations précédentes: _____
_____
_____

5. Inspecté par: _____

6. Date: _____

B. Synthèse des cotes attribuées

Note: Cette section doit être remplie après les sections C et D.
(coter: très mauvais/mauvais/acceptable/bon/très bon)

	Dessus visuel	Dessous visuel	Cote globale
Dalle-terrasse	_____	_____	_____
Dalles intérieures	_____	_____	_____
Rampes	_____	_____	_____
Joints de dilatation	_____	_____	_____
Murs, piliers	_____	_____	_____
Autres: _____	_____	_____	_____

Cote globale pour le garage: _____

Commentaires sur les défauts de structure importants: _____

_____

_____

_____

C. Dalle sur terre-plein Plancher suspendu Rampe Dalle-terrasse
(encercler)

Note: Faire autant de photocopies de cette section qu'il est nécessaire.

1. Étage: _____

2. Surface supérieure

a) Type de protection: membrane bouche-pores aucune
(encercler)

b) Membrane

Description: _____

État: usée aux endroits à forte circulation _____

décollée du béton _____

déchirée ou fissurée _____

c) Bouche-pores

Évidence d'une nouvelle application? _____

Si on verse de l'eau sur le béton, forme-t-elle des gouttelettes? _____ Pénètre-t-elle? _____

d) Ravalements et nids de poule

Aucun _____

Quelques-uns _____

Nombreux _____

Très nombreux _____

e) Fissures en surface

i) Nombre de fissures		ii) largeur des fissures	
Aucune	_____	Difficilement visibles	_____
Quelques-unes	_____	Facilement visibles (1 m long/20 m^2)	_____
Nombreuses	_____	0.5 mm ou moins (1 à 5 m long/20m^2)	_____
Très nombreuses	_____	plus de 0.5 mm (plus de 5 m long/20 m^2)	_____

f) Délaminage du béton

_____ de la surface (estimé après passage de la chaîne de façon aléatoire)

Note: Pour certaines membranes, il n'est peut-être pas possible de distinguer une membrane décollée d'un béton délaminé.

g) Entretien

Les planchers sont-ils nettoyés au balai? _____
Traces de dépôt de sel? _____

h) État général de la face supérieure

Très bon _____

Bon _____

Acceptable _____

Mauvais _____

Très mauvais _____

3. Face inférieure

a) Fissures avec dépôt de lixiviation/taches de rouille

Aucune _____

Quelques-unes _____ (1 m long/20 m^2)

Nombreuses _____ (1 à 5 m long/20m^2)

Très nombreuses _____ (plus de 5 m long/20 m^2)

b) Nombre d'épaufrures dans le béton

Aucune _____

Quelques-unes _____ (1 % de la surface totale)

Peu nombreuses _____ (1 à 2 % de la surface totale)

Nombreuses _____ (plus de 2 % de la surface totale)

c) Tiges d'armature à nu

i) Nombre de tiges à nu		(ii) État des tiges	
Aucune	_____	Non rouillées	_____
Quelques-unes	_____	Légèrement rouillées	_____
Nombreuses	_____	Modérément rouillées	_____
Très nombreuses	_____	Sévèrement rouillées	_____

d) Endroits humides

Aucun _____

Quelques-uns _____

Nombreux _____

Très nombreux _____

Ces taches correspondent-elles à des endroits de la surface supérieure où l'eau stagne? _____

e) État général de la face inférieure

Très bon _____

Bon _____

Acceptable _____

Mauvais _____

Très mauvais _____

D. Autres parties
(inscrire: Aucun/peu/quelques-uns/nombreux/très nombreux)

1. Joints de dilatation (planchers et terrasse)

Fuite _____

Fissuration/séparation du béton _____

Taches de rouille _____

Épaufrures avoisinantes _____

Tiges avoisinantes à nu _____

Mouvement du joint de dilatation possible? oui non

2. Joints de dilatation (piliers et murs)

Fuite _____

Taches de rouille _____

Épaufrures avoisinantes _____

Tiges avoisinantes à nu _____

Mouvement du joint de dilatation possible? oui non

3. Piliers/poutres

Fissures _____

Épaufrures _____

Tiges à nu _____

4. Murs parpaings béton coulé (encercler)

Taches d'eau _____

Épaufrures _____

Tiges à nu _____

5. Avaloirs

Avaloirs _____ propres _____ bouchés _____

Emplacement adéquat? _____
Y a-t-il de grands espaces couverts d'eau stagnante sans avaloirs?

Fuites autour des avaloirs? _____

Fuites à travers les traverses supérieures? _____

Détérioration du béton avoisinant? _____

BIBLIOGRAPHIE

1. "Parking Garage Maintenance Manuel", "National Parking Association", Washington, D.C., 1982, p. 30.

2. "Cracking - Corrosion Interaction in Concrete Exposed to Marine Environment", par P.K. Mehta et B.C. Gerwick, "Concrete International", octobre 1982, p. 49.

3. "Corrosion of Metals in Concrete", par le Comité 222 de l'"ACI", Journal de l'"ACI", n° 1, vol. 82, janvier-février 1985, p. 6.

4. "Repair of Concrete Damaged by Reinforcement Corrosion", par P.C. Hewlet, "Concrete Society", Écosse, octobre 1985, p. 16.

5. "Corrosion Control - Concrete Design and Construction Practices", par D. Whiting, séminaire intitulé "Solving Rebar Corrosion Problems in Concrete", "NACE", Chicago, Illinois, septembre 1982, p. 9.

6. Whiting, p. 10.

7. "Parking Structure Deterioration: A Survey and Analysis of its Extent and Influencing Factors", par J.A. Bickley (non publié), SCHL, décembre 1984, p. 31.

8. Whiting, p. 11.

9. Bickley, p. 38.

10. Bickley, p. 18.

11. Bickley, p. 19.

12. Bickley, p. 20.

13. Bickley, p. 69.

14. "Decision Criteria for the Rehabilitation of Concrete Bridge Decks", par D.G. Manning et J. Ryell, "Transportation Research Record" n° 762, "Transportation Research Board", 1980, p. 7.

15. "State-of-the-Art Report on Parking Structures", par le Comité 362 de l'"ACI", Journal de l'"ACI", n° 4, vol. 82, juillet-août 1985, p. 6.