

Pathologie des Constructions

Cours 2^{ème} année
Master Académique

Matériaux en Génie Civil

Pathologie des Constructions

Sommaire

Chap. 1. Définitions et introduction à la pathologie

Chap. 2. Pathologie des terrassements.

Chap. 3. Pathologie des murs de soutènements.

Chap. 4. Pathologie des fondations.

Chap. 5. Pathologie du béton armé.

Chap. 6. Pathologie des maçonneries et des enduits.

Chap. 7. Dégradation des matériaux.

Chap. 8. Les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages en béton armé.

Chap. 9. Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion.

Chap. 10. L'humidité dans les bâtiments.

Chap. 11. Le diagnostic des pathologies des constructions.

Chap. 12. Contrôles destructifs & non destructifs du béton.

Chap. 13. Réparation des structures en béton armé.

Chap. 1. Définitions et introduction à la pathologie

Terme de médecine, « **pathologie** » désigne la science qui cherche à établir, par l'observation et l'expérimentation, les lois de l'anormalité dans le domaine biologique.

- Analyser les principaux mécanismes physico-chimiques lors du vieillissement qui peuvent conduire à l'endommagement des matériaux (béton, béton Armé et béton précontraint) et des structures en béton dans son environnement.
- Reconnaître les dégradations des structures et des altérations des matériaux.
- Comprendre quelles sont les causes de ces effets (diagnostic causal)
- Surveillance et/ou maintenance.

Les maladies :

- ◆ Pathologies des ouvrages en béton : (problèmes liés aux matériaux, à la conception, à l'exécution, etc...).
- ◆ Les techniques de réparations : (présentation qualitative et dispositions constructives)

L'expertise et le projet de réparation structurelle :

- ◆ Les mesures et les enquêtes,
- ◆ La méthodologie des expertises et des réparations,

Pathologie des ouvrages

- Les fissurations sous les actions des charges d'exploitation, sous les variations spontanées de dimensions (retraits et gonflements, gradients thermiques...)
- Le matériau, résistances et altérations liées aux principales agressions physico-chimiques de l'environnement.
- Qualités des ciments, bétons chimiquement résistants.
- Eaux agressives (sulfates, chlorures, autres sels, eaux de mer, eaux pures, eaux acides,...)
- Notions de durabilité du béton durci.
- Les principaux paramètres de la durabilité d'un béton.
- Approche des mécanismes physico-chimiques internes (diffusion, perméabilité, porosité,...).

Ressuage

Le ressuage est une forme de ségrégation du béton frais. La propriété de sédimentation du béton frais entre le moment du compactage et le début de la prise. La durée de ce phénomène est d'environ deux à trois heures pour le béton, mais elle peut dans des circonstances exceptionnelles atteindre cinq à six heures. En vertu de la loi de gravitation, les matières solides ont tendance à s'enfoncer, tandis qu'une partie de l'eau de gâchage remonte à la surface de la masse de béton frais. Le risque de ségrégation est d'autant plus important que la teneur en eau du béton soit élevée. Le ressuage du béton s'accompagne d'un (tassement) du béton frais, le béton durci présentant alors un volume inférieur à celui du béton frais.

Retrait et gonflement

Le retrait et le gonflement sont des modifications lentes du volume de béton en durcissement qui dans le cas de béton à granulats denses sont liés à la modification de l'état d'humidité de la pâte de ciment. Le gonflement étant une augmentation du volume résultant de l'absorption de l'humidité. Le retrait constitue une diminution du volume consécutive à l'évacuation d'humidité, le volume des hydrates formés est inférieur au volume des composants initiaux eau et ciment [109].

CARACTÉRISTIQUES DE STRUCTURE POREUSE

La structure poreuse de la pâte de ciment hydraté et du béton durci peut être caractérisée à travers des paramètres tels que la porosité, la connectivité ou la tortuosité des pores. Ces paramètres influencent aussi bien les propriétés mécaniques que la durabilité du béton par l'intermédiaire des propriétés de transferts.

Porosité

Les pores sont des cavités vides ou remplies d'eau dans le béton durci. La porosité est le rapport entre le volume de vides V_V et le volume total V_T d'un corps. La porosité est une propriété volumétrique représentant le contenu des pores qui ne sont pas nécessairement interconnectés, alors que la perméabilité est une propriété d'écoulement qui caractérise la facilité avec laquelle un matériau poreux se laisse traverser par un fluide. Figure I.15.

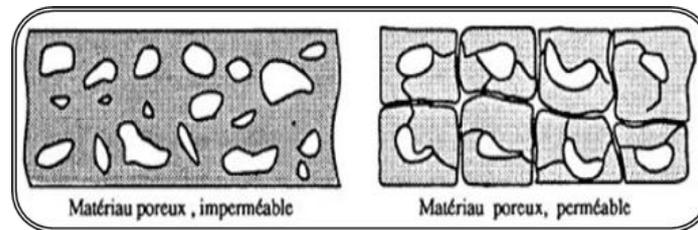


Figure I.15 : Illustration de la différence entre la porosité et la perméabilité [139]

La porosité est une caractéristique importante des matériaux cimentaires qui lui confère plusieurs caractéristiques telles que sa perméabilité, sa résistance, sa durabilité et son comportement rhéologique. Les bétons faiblement poreux sont en général plus durables puisque leur faible perméabilité retarde la pénétration de l'eau, et des autres agents potentiellement agressifs (Sulfates, CO_2 , Cl^- , etc...). La porosité totale d'un béton ordinaire durci est de l'ordre de 10%. Cette porosité résulte de celle de la pâte, des granulats (porosité de l'ordre de 2% pour certains granulats calcaires) voir [27] et de l'interface pâte/granat.

Les pores interconnectés permettent le transport de matières dans le matériau, contrairement aux pores aveugles ou aux pores isolés.

La variation de la résistance en compression à 28 jours en fonction de la porosité accessible à l'eau à la même échéance. Nous constatons que la résistance en compression diminue avec l'augmentation de la porosité [16]. Cette porosité gouverne de nombreuses propriétés du béton: Presque toutes les caractéristiques mécaniques, la perméabilité et par conséquent la durabilité. Ainsi, plus la porosité diminue, plus la résistance à la compression augmente et plus la perméabilité diminue. Le niveau de porosité influence de façon importante les caractéristiques mécaniques du matériau. L'effet déterminant de la réduction de la porosité sur la résistance mécanique du ciment a été démontré dans de nombreuses études en [84, 107, 130 et 155]. Figure I.16.

Une cure à température trop élevée ou avec un rapport E/C trop grand augmente la porosité et diminue les propriétés mécaniques, l'ajout de fumée de silice densifie le matériau [155]. La perméabilité du matériau est essentiellement dépendante du volume et de la taille de ces pores capillaires. Dans la suite de notre étude, on va essayer de vérifier cette définition. Bien que la perméabilité soit fort influencée par la porosité, elle dépend aussi d'autres paramètres qui régissent préférentiellement l'écoulement, parmi ces paramètres on peut citer: La connectivité et la tortuosité.

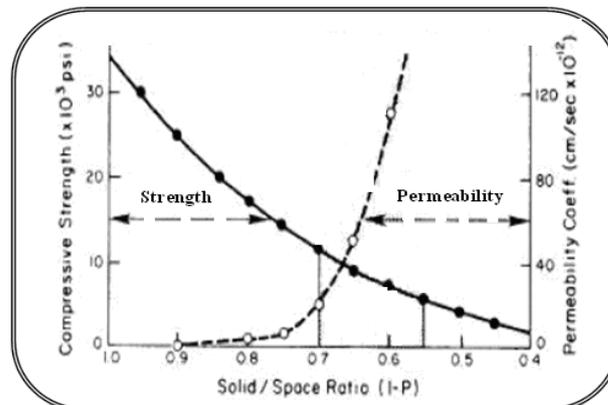


Figure I.16 : Relation entre la perméabilité, la résistance à la compression et le niveau de porosité du béton [116]

Influence de rapport E/C sur la porosité

Le rapport eau/ciment exerce une grande influence sur la porosité de la pâte de ciment hydraté car il gouverne directement l'espacement initial entre les grains de ciment en suspension dans l'eau de gâchage.

Sur la figure I.17, on voit nettement que plus le rapport E/C est faible, plus, les grains de ciment sont rapprochés initialement les uns des autres. Les espaces à combler entre les grains de ciment sont moins grands et il y a moins de chance d'avoir un grand vide ne pouvant pas être complètement rempli par les hydrates.

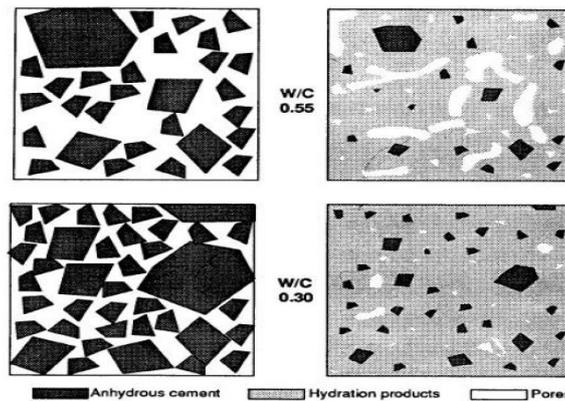


Figure I.17 : Représentation schématique de la pâte de ciment à l'état frais et à l'état durci [67]

Même une très faible quantité d'hydrates peut permettre de combler les espaces inter granulaires. C'est en partie ce qui explique que les bétons avec E/C faible développent très rapidement leur résistance.

L'influence du paramètre E/C sur l'avancement de l'hydratation est très complexe. D'après *Hearn et and Lok* [78], de faibles valeurs du rapport E/C entraînent un ralentissement des réactions d'hydratation au jeune âge. Une concentration élevée en C-S-H est obtenue plus rapidement quand la quantité d'eau interstitielle est faible. Au-delà de cette période, une baisse du E/C produit l'effet contraire.

Powers et al [149], explique ceci par le fait qu'à faible teneur en eau, la quantité d'eau disponible pour l'hydratation devient rapidement très rare une fois que l'eau contenue dans les pores capillaires est épuisée. Ce manque d'eau se traduit alors par un ralentissement des réactions d'hydratation.

Selon *Acker et Baroghel-Bouny* [11 et 27], cette théorie de *Powers* n'est pas justifiée étant donné que l'eau retenue entre les feuilletts de C-S-H (Eau zéolitique) reste encore disponible pour l'hydratation lorsque la totalité de l'eau capillaire est consommée. La porosité du matériau dépend de sa teneur en eau initiale. La taille des pores est d'autant plus petite que le rapport E/C est faible.

Selon *Baroghel-Bouny* [27], les pores des gels sont d'autant moins importants que le rapport eau/solide est faible. Or, plus les pores sont fins, plus les dépressions capillaires sont élevées et les pressions baissent beaucoup plus rapidement. A partir de mesures expérimentales de base, on peut calculer plus précisément la relation entre le E/C et le volume de la porosité capillaire (composition et hydratation du ciment Portland [152]).

Sachant que: l'eau combinée chimiquement représente 23% du poids du ciment non hydraté, le volume des produits d'hydratation est égal au volume du ciment non hydraté plus 0,746 fois le volume d'eau combiné chimiquement et la porosité de l'ensemble des hydrates est de 28% d'eau. D'un point de vue strictement chimique, en équilibrant les réactions d'hydratation du ciment, un rapport E/C = 0,22 suffit pour hydrater tout le ciment.

Toutefois, *Powers* a montré que pratiquement, et d'un point de vue physico-chimique, il faut un rapport E/C minimal de 0,42 (système scellé). En effet, pour que la réaction d'hydratation se poursuive, une certaine quantité d'eau doit être adsorbée par les hydrates (eau de pores de gel) sans que celle-ci soit liée chimiquement, sa présence dans les hydrates étant absolument nécessaire à leur formation.

La figure I.18 permet de résumer l'influence du E/C sur la porosité de la pâte de ciment hydraté. On y présente la fraction volumique des constituants de la pâte de ciment hydraté en fonction du E/C après 100% d'hydratation (conservation dans l'eau).

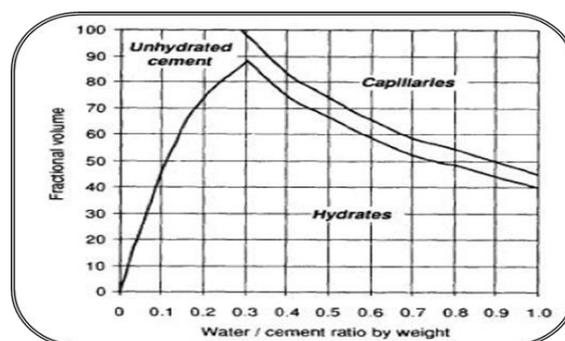


Figure I.18 : Proportion volumique des constituants de la pâte de ciment hydraté en fonction du E/C après 80% d'hydratation dans l'eau [82]

En pratique, l'hydratation n'est jamais complète car les plus gros grains de ciment ne s'hydratent jamais complètement. A un certain stade de leur hydratation, ils sont recouverts d'une coquille d'hydrates très dense qui empêche l'intérieur du grain de réagir avec l'eau environnante. C'est pour cette raison qu'en pratique, même dans les pâtes fabriquées avec un E/C très faible 0,25 il subsiste toujours une certaine porosité capillaire. La réduction du rapport E/C permet non seulement de diminuer le volume total des pores capillaires mais elle permet aussi de réduire leur diamètre. Pour un E/C plus faible la porosité capillaire est en fait constituée d'un réseau de pores plus fin et plus discontinu. Ce phénomène est illustré sur la figure I.19. En réduisant le E/C de 0,45 à 0,25, le volume total de la porosité passe de 40% à moins de 20% et, en même temps, le diamètre moyen des plus gros pores est diminué par un facteur de l'ordre 10.

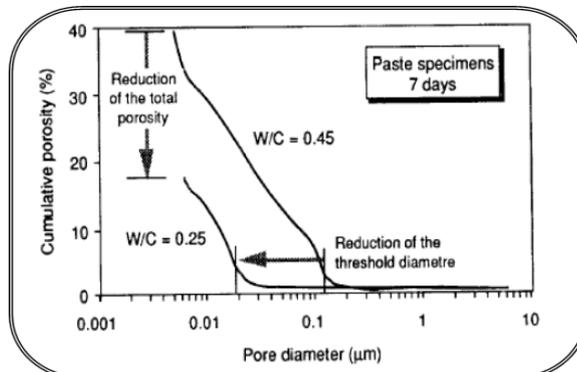


Figure I.19 : Courbe de porosimétrie au mercure de deux pâtes de ciment conservées pendant 7 jours dans l'eau [67]

Connectivité

La connectivité est un paramètre topologique qui mesure le degré d'interconnexion d'un milieu poreux, en général il est préférable que le réseau de pores capillaires soit constitué de pores les plus petits possibles car le degré d'interconnexion y est plus faible [59 et 159].

Pour un E/C plus faible la porosité capillaire est en fait constituée d'un réseau de pores plus fin et plus discontinu [66]. La perméabilité de la pâte s'en trouve alors considérablement diminuée car il y a moins de chemins préférentiels pour le passage des liquides, des gaz ou des ions potentiellement agressifs. Figure I.20.

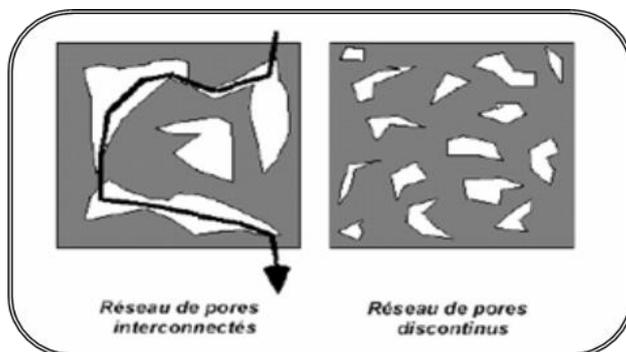


Figure I.20 : Influence du degré d'interconnectivité sur la perméabilité de la pâte [152]

Remarquons qu'un pore isolé, mais qui se connecte par exemple par microfissuration aux pores interconnectés, peut désormais participer aux écoulements à travers le matériau. On a alors une connectivité qui augmente par fissuration.

Tortuosité

La tortuosité τ , Caractérise le chemin d'écoulement d'un fluide à travers le réseau poreux. Selon d'autres auteurs, elle est définie par: $\tau = (L_e/L)^2$ [157].

Avec : L_e : Longueur effective du déplacement du fluide, c'est à dire la longueur moyenne des lignes de courant du fluide.

L : Distance parcourue par le fluide, c'est à dire la longueur de l'échantillon poreux dans la direction de l'écoulement.

DURABILITÉ

La durabilité définit la durée de la persistance de certaines caractéristiques et allure de leur évolution dans le temps sous l'effet des agents agressifs de l'environnement. La durabilité du béton peut être affectée non seulement par son environnement, mais aussi par les caractéristiques du matériau telles que la perméabilité, le type ciment, l'interface pâte/granulat et la nature des hydrates formés lors de l'hydratation du ciment.

PERMÉABILITÉ

Définition

La perméabilité du béton est un paramètre fondamental contrôlant la durabilité des structures. La perméabilité définit la capacité d'un milieu poreux à être traversé par des fluides sous un gradient de pression. Bien que la perméabilité d'un milieu poreux dépende fortement de sa porosité, d'autres paramètres du réseau poreux l'influencent également.

Parmi ceux-ci, nous pouvons citer: la connectivité, la tortuosité, ainsi que la constrictivité du réseau poreux liée à la taille des pores. L'effet de ces paramètres vis-à-vis de la résistance au flux est montré sur la figure I.23 [165]. Plusieurs études et relevés sur le terrain montrent que les causes principales de la mauvaise performance du béton sont plus ou moins liées à la facilité avec laquelle un fluide ou un ion pénètre dans la porosité du béton.

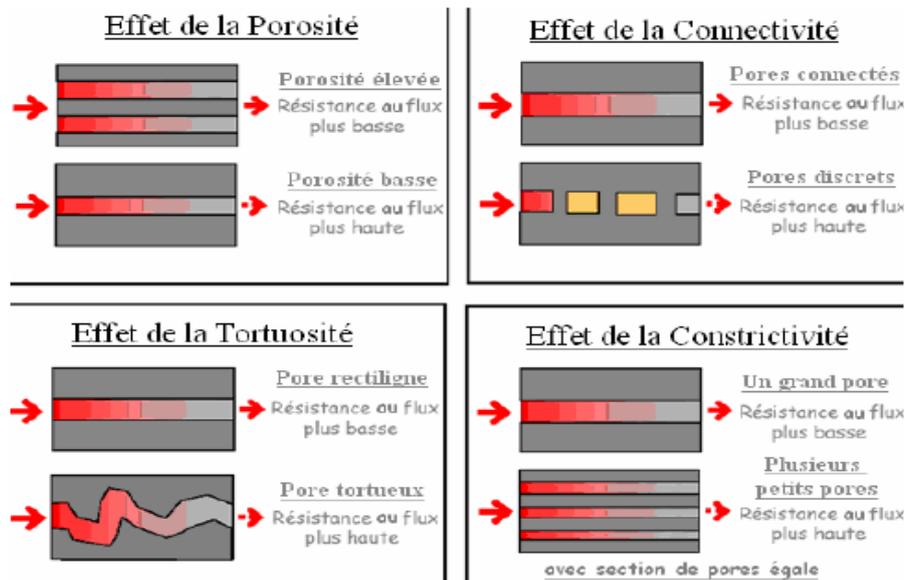


Figure I.23 : Effet des paramètres influençant la perméabilité [165]

Paramètres influençant les propriétés de transfert

Influence de rapport E/C

Le rapport E/C exerce une très grande influence sur la perméabilité à l'eau de la pâte de ciment hydraté. Plus E/C est faible, plus la perméabilité de la pâte diminue. La chute est très rapide entre 0,7 et 0,6 puisque c'est dans cette plage que le réseau de pores capillaires devient discontinu [149].

De nombreuses études conduites notamment sur des pâtes de ciment, ont confirmé que la porosité est directement liée au rapport E/C en raison de son influence sur la structure du réseau de pores capillaires [78].

Plus le rapport E/C est faible, plus le temps de segmentation du réseau capillaire des pâtes de ciment diminue et par conséquent plus la perméabilité à l'eau diminue [25].

La porosité capillaire d'une pâte de ciment totalement hydratée sans apport d'eau externe, diminue rapidement avec le rapport E/C, jusqu'à une valeur de 0,42 environ d'après Hansen [81]. Pour des rapports E/C inférieurs à 0,42, la perméabilité et la diffusivité diminuent moins rapidement.

Dans le cas où le béton en service serait exposé pendant une longue durée à une source d'eau non agressive et si l'on recherche à réduire la perméabilité, il paraît intéressant de réduire le rapport E/C en dessous de 0,36. Parce que dans ces conditions, l'apport d'eau externe permet une poursuite de l'hydratation jusqu'au remplissage de la porosité capillaire [25].

Puisque que la résistance à la compression est liée à la valeur du rapport E/C, il existe une relation très nette entre la résistance à la compression et la perméabilité à l'eau. Il a été observé que la perméabilité décroît lorsque la résistance mécanique des bétons croît [150].

Influence de la durée de cure humide

La durée de mûrissement influence fortement la perméabilité à l'eau. Une période de mûrissement plus longue diminue très significativement la perméabilité parce qu'elle favorise la formation d'une plus grande quantité d'hydrates qui viennent combler et fractionner davantage la porosité capillaire.

L'augmentation considérable de la résistance et de la durabilité des bétons contenant de la pouzzolane par rapport aux bétons sans ajout, s'explique généralement par une plus fine répartition des pores. Bien que la porosité globale ne soit pas relativement plus faible, la perméabilité des bétons contenant des pouzzolanes est fortement réduite, car il y a moins de gros pores dans la pâte de ciment durcie [77].

La perméabilité décroît au cours de l'hydratation du ciment en raison de la porosité capillaire, comme l'illustre la figure I.24. Une cure adéquate est donc très importante pour que l'hydratation soit la plus complète possible. Le temps minimum prescrit pour la cure des bétons ayant divers rapports E/C est indiqué à la figure I.25.

Figure I.24 : Evolution de la porosité capillaire en fonction de la durée de la cure [49]

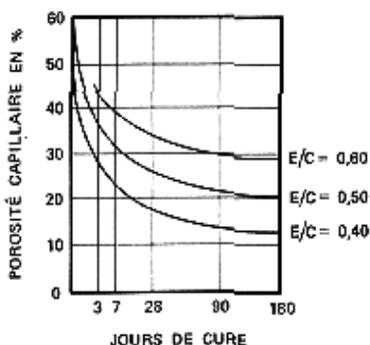
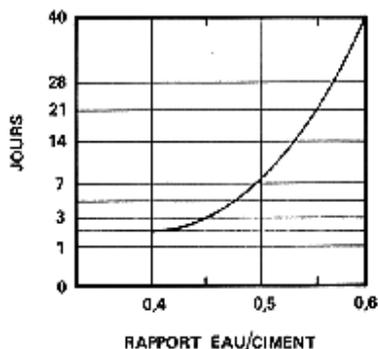


Figure I.25 : Nombre minimal de jours de cure pour le béton compact [49]



Influence des fumées de silice

Les fumées de silice, utilisées en remplacement du ciment permettent généralement de diminuer la perméabilité à l'eau. Cet effet s'explique par le raffinement et la segmentation de la porosité capillaire engendrée par l'hydratation des sphères de fumée de silice. Le taux optimal se situe aux environs de 10% [25].

La fumée de silice permet de réduire considérablement la perméabilité à l'eau du béton. Cet effet s'explique, une fois de plus, par le fractionnement de la porosité capillaire. Le remplacement de 10% du ciment par de la fumée de silice rend pratiquement imperméable à l'eau un béton avec un rapport E/L de 0,45.

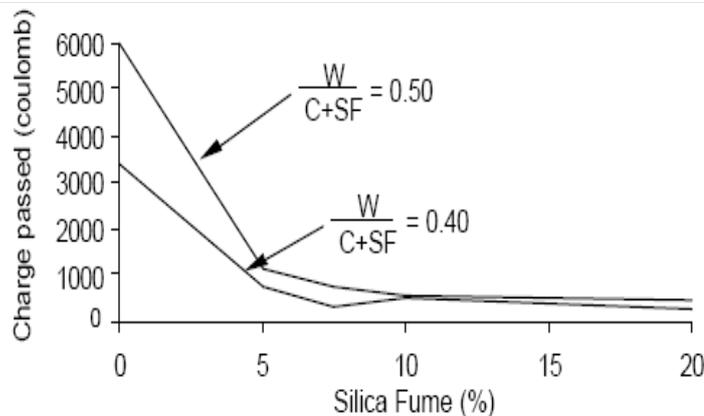


Figure I.26 : Influence du dosage en fumée de silice sur la charge totale mesurée après 6h [148]

La fumée de silice diminue très significativement la charge totale après 6h. (Figure I.26). Le taux de remplacement optimal est d'environ 10% puisque des taux de remplacement supérieurs ne produisent pas de réduction significative de la charge totale après 6h.

Influence du degré de saturation

La perméabilité au gaz diminue avec le degré de saturation du béton à la différence de la perméabilité à l'eau qui augmente lors d'une imbibition [150].

Un séchage modéré ne permet pas le drainage des pores les plus fins, et la perméabilité mesurée est sous évaluée. Un séchage trop poussé entraîne une dégradation de la microstructure du matériau conduisant à une perméabilité artificiellement accrue ou à une surévaluation de la perméabilité du béton en service. Un béton poreux avec une saturation d'eau élevée peut témoigner d'une perméabilité au gaz inférieure à un béton à haute résistance sec (peu poreux). C'est pourquoi les échantillons doivent autant que possible être séchés avant d'effectuer une mesure [76].

Le choix de la température de séchage est délicat. En effet, une température trop élevée peut engendrer une évaporation de l'eau liée et une modification des hydrates: l'ettringite puis le C-S-H [146 et 147]. Généralement, il

convient d'appliquer un séchage par paliers de température croissants, de manière à diminuer d'une part les gradients de température et d'autre part les gradients hydriques. Cependant, une comparaison entre un béton séché par paliers de température croissants, et un béton ayant subi un séchage appliqué directement à 105°C montre que la perméabilité au gaz n'augmente que légèrement [76 et 158].

Influence de la température

L'effet de la température sur la perméabilité à l'eau du béton a fait l'objectif d'une étude menée par *Jooss et Reinhard* [89]. Dans cette étude, en testant onze types différents de bétons, les auteurs ont trouvé que la température a une influence sur la perméabilité à l'eau. En effet, la perméabilité augmente entre 13-62% quand la température est augmentée de 20 à 50°C, puis de 3-55% additionnels quand la température atteint 80°C selon le type de béton. Cette variation du taux d'augmentation dépend du type de béton. Ces auteurs expliquent ces effets par la diminution de la viscosité de l'eau avec la température, ce qui provoque une augmentation de la conductivité hydraulique.

Interface pâte/granulat

Définition

Dans le béton durci, autour des granulats, une zone de pâte de ciment hydraté particulière, appelée auréole de transition [120], peut être présente en fonction de la forme et de la composition chimique des granulats. La liaison pâte/granulat est trouvée meilleure d'un point de vue mécanique avec des granulats concassés qu'avec des granulats roulés. C'est la partie la plus poreuse, la mieux cristallisée, et la moins résistante dans un béton [124]. Cette faible résistance mécanique au niveau de l'auréole est due en partie à l'eau piégée sous les granulats. Les études menées sur cette partie montrent que l'interface est constituée de fibres de C-S-H, d'aiguilles d'ettringite, et de plaquettes de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ orientées perpendiculairement à la surface du granulat. L'amélioration des bétons par la microsilice permet de réduire la porosité et l'épaisseur de cette zone ce qui conduit à une meilleure liaison entre la pâte et les granulats. L'interface pâte de ciment/granulat est souvent décrite comme une zone dont l'épaisseur, variable de 10 à 50 μm , dépend principalement de la granulométrie du ciment [126] du rapport E/C [12 et 50], des propriétés pouzzolaniques des additions minérales [72, 73, 112 et 144], des propriétés granulométriques et minéralogiques des granulats [12 et 36], et des conditions de malaxage du matériau [60].

Mécanisme de formation

L'existence de la zone de transition est attribuée à deux principaux phénomènes: d'une part, *l'effet de paroi* des granulats vis-à-vis des particules fines du mélange et, d'autre part, l'accumulation locale d'eau sous les granulats due à la vibration lors de la mise en place du béton (*micro-ressuage*). Le premier phénomène induit un gradient de rapport E/C dans la pâte entourant les granulats et le second phénomène peut entraîner une certaine hétérogénéité de ce gradient autour des granulats [144].

Facteurs d'influence

➤ *Effet des granulats*

Le type d'agrégat joue un rôle important. En effet, l'épaisseur de la zone de transition interfaciale augmente avec la taille des granulats pour les mortiers. Il a également été observé que des agrégats rugueux améliorent l'adhésion avec la pâte [125]. Dans certains cas, les agrégats réagissent avec la pâte de ciment. Pour les agrégats calcaires, après 60 jours, la force du lien est plus élevée que dans le cas d'un granulat non réactif [119]. Les petits grains permettent effectivement un arrangement plus compact près des interfaces pâte/granulat en remplissant les espaces entre les particules plus grosses.

Dans ses expériences *Ping et al* [154], ont montré que l'épaisseur de cette zone diminuait avec la taille des granulats, quelle que soit la nature de ceux-ci (quartz ou calcaire). Une zone de transition plus dense peut être obtenue avec les granulats de calcaire plus petits et grâce aux interactions chimiques possibles entre ciment et particules. Selon *Ollivier* [142], il existe des forces de type chimique qui s'ajoutent à celles de Van der Waals pour assurer la cohésion entre la pâte de ciment et les granulats calcaires. Ce qui explique l'augmentation de la résistance mécanique du béton en fonction du temps de conservation.

De même (*Farran ; Tasong et al*) [65 et 175], ont montré que les granulats calcaires, contrairement aux granulats basaltiques et siliceux, peuvent réagir avec la pâte de ciment en produisant un dégagement de CO_2 et une zone de transition très poreuse. Cette très forte porosité provoque une diminution de l'adhésion pâte de ciment/granulat au très jeune âge. Ces effets diminuent avec le remplissage progressif de la porosité par les hydrates qui se forment à plus long terme.

Tasong et al [175], ont montré, sur des échantillons constitués d'une couche de pâte de ciment entre deux tranches de granulats, que la nature pétrographique, la résistance mécanique et la rugosité des granulats et leurs interactions chimiques avec la pâte de ciment conditionnent la qualité de l'adhésion entre la pâte de ciment et les granulats. Selon *Guinea et al* [74], ont quantifié l'influence de l'état de surface des granulats sur l'adhésion entre la matrice liante et les inclusions granulaires de bétons en utilisant des granulats roulés et des granulats concassés traités en surface.

D'autre part *Basheer et al* [36], ont étudié l'effet de la taille des granulats et de leur distribution granulaire sur la microstructure de la zone d'interface de bétons matures soumis au séchage pendant 14 jours. Ils ont utilisé des granulats de taille 10 et 20 mm, en maintenant un rapport granulat/ciment constant et en faisant varier la quantité relative de grains de 10 et 20 mm de diamètre. Leurs résultats indiquent que l'augmentation du dosage en granulats de 20 mm provoque une augmentation significative de la porosité et de l'épaisseur de la zone d'interface.

➤ **Rapport eau/ciment**

Plusieurs chercheurs ont observé, que la diminution du rapport E/C conduit à un rétrécissement de la zone d'interface: Par exemple, pour *Cwirzen and Penttala* [50], l'épaisseur de la zone d'interface de bétons à hautes performances âgés de 28 jours passe de 40 μm à moins de 5 μm lorsque le rapport E/C diminue de 0,42 à 0,30. Dans ses expériences *Hoshino* [80], a démontré l'existence d'un rapport E/C et d'une porosité plus élevée près de la surface inférieure des agrégats par rapport à la surface supérieure.

Les cristaux de portlandite sont aussi plus nombreux et plus gros sous les granulats. De plus, la différence entre les deux interfaces augmente avec le rapport E/C.

➤ **L'âge**

Vivekanandam et Patnaikuni [168], ont aboutit à des conclusions différentes sur bétons à hautes performances. Selon eux, la zone de transition augmente de 8 μm à 13 μm entre 3 et 56 jours d'hydratation; par ailleurs, ils notent également une très faible variation de l'épaisseur au-delà de 14 jours d'hydratation.

Dans ses expériences *Diamond and Huang* [60], la différence de porosité entre la zone d'interface et le coeur de la pâte s'atténue progressivement à mesure que des cristaux de portlandite et des C-S-H remplissent la zone d'interface. Ils observent, qu'à âge mature, il n'existe qu'une faible différence entre la porosité de la zone d'interface et le cœur de la pâte.

➤ **Ressuage**

Le ressuage est un facteur important à ne pas négliger car il peut avoir des effets délétères sur la zone de transition interfaciale. En remontant vers la surface, l'eau libre peut rester coincée sous la surface inférieure des agrégats. Le ressuage interne ainsi produit augmente davantage le rapport E/C local déjà élevé près des interfaces pâte/granat.

➤ **Nature du ciment**

La nature du ciment utilisé constitue un de ces facteurs. Les propriétés mécaniques d'un béton contenant du ciment de type K sont de 25 à 40% supérieures à celles d'un béton contenant du ciment Portland [116]. La zone de transition interfaciale associée à ce type de ciment K contient des cristaux orientés de façon aléatoire.

➤ **Réaction pouzzolanique**

La réaction pouzzolanique permet d'augmenter la résistance à l'interface pâte de ciment/granat. En effet, la portlandite cristallise à la surface des granulats, la réaction avec la fumée de silice permet de consommer celle-ci et de créer des hydrates de type C-S-H bien liés aux granulats [102].

Fissuration

La fissuration n'est pas une maladie, mais le symptôme d'une maladie, symptôme qui, pour le béton n'est guère plus spécifique que la fièvre pour les humains. Aucun médecin praticien n'est spécialiste en fièvre, on élimine la fièvre en soignant les maladies les plus diverses [20].

Les fissures de différentes origines (mécanique, thermique et physico-chimique) offrent des chemins préférentiels pour la pénétration de différents agents potentiellement agressifs. De plus, dans le cas des structures de confinement, les fissures peuvent être à l'origine de fuite d'air ou de vapeur contaminée. De ce point de vue, on constate le rôle important des fissures sur la durabilité et les propriétés de transfert de béton. C'est pourquoi ce sujet a fait l'objet de nombreuses publications [63, 87 et 172].

Outre l'influence des fissures sur les propriétés de transfert, elles présentent des milieux favorables pour le développement des réactions chimiques qui augmentent le risque de détérioration du béton. [87]. Définissent la distinction entre micro et macrofissure essentiellement sur la base du volume de l'éprouvette considérée. Selon ces auteurs une microfissure est très petite par rapport au volume de l'éprouvette alors qu'une macrofissure à une taille non négligeable par rapport à ce volume. Une macrofissure est définie comme une discontinuité dans la structure du matériau [96]. Les microfissures sont parmi les premières causes de la formation de l'ettringite différée. La croissance des cristaux d'ettringite dans les fissures mène à l'augmentation de leurs ouvertures et par conséquent la détérioration des matériaux [63]. Dans la littérature, on peut distinguer plusieurs classes de microfissures. D'après *Blakey* [32], il existe trois types de microfissures: Des microfissures à l'interface pâte/granulats, dans la matrice cimentaire et dans les granulats. La croissance des fissures gouvernent la déformabilité à long terme du béton et donc son comportement en service et sa durabilité.

RÉSISTANCES AUX EAUX AGRESSIVES

Définition

Les altérations du béton, observées en présence d'agents agressifs, sont d'ordre chimique ou physique. Les altérations chimiques sont dues essentiellement aux acides, bases et aux solutions salines, elles entraînent presque toujours la dissolution de la chaux et le plus souvent, en associations avec cette dissolution la formation des composés nouveaux. Les altérations physiques sont dues à des surcharges, à des sollicitations excessives aux frottements, aux chocs thermiques et aux gonflements ou aux retraits, entraînant l'érosion et la fissuration du béton [161]. L'enquête *OCDE* [71], indique que les plus importantes causes de dégradation relevées sur 800000 ponts de par le monde, sont: contaminations par les chlorures et attaque par les sulfates. L'utilisation de ciments contenant des ajouts cimentaires semble être aujourd'hui une approche prometteuse. L'incorporation de ces ajouts nous permet d'augmenter la capacité des bétons à résister à l'attaque chimique de son environnement agressif, comme il a été mis en évidence par plusieurs chercheurs [167].

Eaux pures et eaux douces

Les eaux douces peuvent minéraliser de teneur en dioxyde de carbone agressive comprise entre 15 et 30 mg/l et de PH 5.5 à 6.5, sont classées dans la catégorie des environnements faiblement agressifs. Toutefois, des expériences récentes établissent que, même dans ce cas, on ne peut pas négliger l'action dissolvante de l'eau. Les silicates et les aluminates, moins solubles, sont attaqués plus tardivement lorsqu'une partie de la chaux a déjà été lessivée. La dissolution sélective de leur calcium provoque un accroissement de leur porosité, en même temps que le rapport molaire CaO/SiO_2 décroît. Les ions alcalins Na^+ et K^+ particulièrement mobile, sont également lessivés par les eaux [97]. Le processus d'attaque conduit à des pertes de masses et d'alcalinité due au lessivage de la portlandite, ce qui induit une augmentation de la porosité et la perméabilité. Il peut se traduire également par une diminution de la cohésion et une chute des résistances mécaniques. Corrélativement, on constate que les ciments sont d'autant plus résistants à l'attaque par les eaux douces qu'ils sont moins riches en hydroxyde de calcium et ont une plus grande stabilité chimique. C'est le cas des ciments avec additions minérales dont l'hydratation libère peu ou pas de portlandite, tout en générant des C-S-H de rapport CaO/SiO_2 faible [18]. L'attaque du béton par les eaux douces chargées en dioxyde de carbone se déroule conformément à un processus de dissolution/précipitation, selon le mécanisme suivant *Baron et Olivier* [18] ; l'eau amenée à percoler à travers le béton se sature progressivement en bicarbonate, par suite la dissolution de la portlandite et, à un degré moindre, des C-S-H, lorsque cette solution de bicarbonate vient en contact avec d'autres cristaux de portlandite, il y a précipitation de carbonate de calcium, très peu soluble, qui accroît momentanément la compacité du béton en diminuant la section de percolation. Comme dans le cas des bétons au contact d'eaux pures, on constate que la dégradation par eaux chargées en dioxyde de carbone est fonction de la teneur en portlandite, c'est à dire du type de ciments. Les bétons sont d'autant plus résistants que le ciment libère moins de portlandite.

L'hydroxyde de calcium fait plus de 20 à 25% en poids de la pâte de ciment et son enlèvement provoque une évidente augmentation dans la perméabilité du béton et la déstabilisation des phases hydratées. La quantité de la chaux lessivée dépend largement de la compacité du béton et de type de ciment. La résistance à la lixiviation des ions Ca^{2+} est d'autant plus grande que le ciment contient moins de chaux, les bétons à base de CPA, riche en chaux, sont plus sensibles à l'altération que les ciments au laitier, pouzzolane et les bétons de ciment alumineux [77]. Les ciments pouzzolanique se comportent mieux que les ciments Portland, puisque la pâte hydratée contient peu d'hydroxyde de calcium et donne naissance à une couche protectrice à la surface du béton riche en gel de silice et d'alumine [18].

Eaux contenant des sulfates

Quand le béton est attaqué par l'eau sulfatée, il se gonfle et se fissure. Les sulfates les plus agressifs, par ordre, sont les sulfates d'ammonium, magnésium, sodium et calcium. Le sulfate de calcium est le plus répandu, il n'est pas considéré comme un sulfate agressif. L'eau contenant de CaSO_4 attaque le béton à cause de la réaction entre CaSO_4 et l'aluminate de calcium hydraté du ciment durci avec la formation d'ettringite expansive. Ce sel est stable dans les solutions qui sont comparativement riches en CaSO_4 et Ca(OH)_2 , comme le cas des pâtes de ciment Portland.

Le sulfate de magnésium n'est pas heureusement répandu dans les eaux naturelles, son action est plus nocive que CaSO_4 puisqu'il réagit non seulement avec Ca(OH)_2 , mais aussi, il décompose les aluminates et les silicates hydratés en formant $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Ce dernier réagit avec l'aluminate hydraté et engendre l'ettringite expansive. L'importance de la détérioration due à l'eau sulfatique dépend de la perméabilité du béton et de la concentration des ions agressifs, aussi bien que sur la composition chimique du ciment [77]. Les additions de pouzzolanes naturelles et de fumées de silice améliorent la résistance des bétons aux sulfates. On peut estimer que l'amélioration est due à la modification de la texture des hydrates qui deviennent plus compact, au moins pour les bétons âgés.

Eaux contenant des chlorures

A l'exception de l'eau de mer ou l'eau se trouvant à proximité de la mer, la teneur de l'eau en chlorure est généralement très faible et par conséquent non nocive. L'action des agents de dégivrage à base de chlore est révélée par gonflement, fissuration et désagrégation du béton. Les chlorures, qui peuvent arriver en contact avec le béton, le plus souvent sont les chlorures de sodium et calcium, qui sont largement utilisés comme des sels de dégivrage, le chlorure de calcium est considéré comme le plus agressif.

Les mécanismes qui conduisent à la détérioration sont différents, et peuvent affecter le béton directement et indirectement. Pour ce qui est de l'attaque directe, on peut dire que quand le béton arrive en contact avec les solutions de chlorure, il se gonfle et perd sa résistance même si les solutions ne sont pas très concentrées. D'ailleurs, les chlorures contribuent au lessivage de la chaux à travers un mécanisme qui n'est pas encore complètement expliqué, et lequel dépend de nombreux facteurs d'environnement (pluie, température,...) mais aussi sur le type de ciment.

Le lessivage de CH est plus faible dans les ciments pouzzolaniques, ou les ciments contenant de la fumée de silice, que dans les ciments Portland. Dans ces derniers le CH qui peut seulement être lessivé est celui qui n'a pas été déjà combiné comme C-S-H avant l'exposition aux sels, comme conséquence, la porosité des mortiers exposés à l'action des sels augmente dans les ciments Portland et diminue dans ceux qui contiennent de la fumée de silice ou de la pouzzolane. Une solution concentrée de 30% CaCl_2 endommage les pâtes et les mortiers de ciment Portland, avec ramollissement de la surface, fissuration, non seulement après plusieurs cycles de séchage et mouillage, mais aussi, après une simple submersion. Les pâtes de ciment pouzzolanique montrent une meilleure résistance aux solutions concentrées de chlorure que celle obtenu par le ciment Portland. Ce comportement est attribué à la faible quantité ou à l'absence de CH dans les ciments pouzzolaniques hydratés [77].

Les chlorures pénètrent au sein du béton à travers des microfissures et par diffusion dans l'eau contenue dans la pâte de ciment et dans les pores d'agrégat. Supposant que le béton ne possède pas de microfissures, la pénétration se produit par diffusion. Les bétons à base des ciments pouzzolaniques s'opposent généralement à la pénétration d'ions de

chlorure, contrairement au ciment Portland. Ceci s'explique par le fait que les ciments contenant des matériaux pouzzolaniques sont capables d'immobiliser (dans les aluminates et les silicates) une quantité de Cl⁻ plus grande que celle dans le ciment Portland, ainsi que la diffusion de Cl⁻ dans les ciments pouzzolaniques est ralentie [118].

Eau de mer

L'eau de mer a une forte teneur en sel (3,5% environ) avec une prédominance de chlorure et sulfate. Le processus chimique d'attaque des bétons par l'eau de mer résulte de plusieurs réactions plus ou moins simultanées et interdépendantes faisant appel à différents mécanismes: dissolution, lixiviation, réaction d'échange de base, précipitation des composés insolubles, cristallisation des sels expansifs.

Les principales réactions mises en jeu peuvent se décomposer de la manière suivante:

➤ **Action des chlorures**

Indépendamment de leurs effets nocifs sur les aciers des bétons armés, les chlorures peuvent être à l'origine d'altération du liant lorsqu'ils sont en proportion élevés. Une partie des chlorures est fixée par les silicates de calcium hydratés, une autre partie se combine au C₃A sous forme de monochloroaluminate de calcium C₃A.CaCl₂.10H₂O.

Le chlorure de magnésium réagit également avec la portlandite suivant la réaction d'échange:



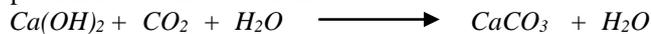
La brucite est insoluble et se dépose à la surface du béton, tandis que le CaCl₂ réagit avec les aluminates pour former de monochloroaluminate.

➤ **Action des sulfates de magnésium**

Cette réaction conduit à la formation d'ettringite expansive et à la substitution des ions Ca²⁺ par les ions Mg²⁺, soit dans les C-S-H, soit dans la portlandite (formation de brucite).

➤ **Action du dioxyde de carbone**

Il réagit sur la portlandite selon la réaction:



Le carbone de calcium se précipite à la surface du béton sous forme d'aragonite et de calcite qui colmatent les pores. Les actions de chacun des ions ne sont pas cumulatives. Le monochloroaluminate de calcium devient instable en présence de sulfates et se décompose pour former de l'ettringite. Elle-même, en présence de silice dissoute et de carbone, il se transforme partiellement en thaumasite: CaCO₃.CaSO₄.CaSiO₃.15H₂O. C'est l'interférence des différents ions qui explique que l'agressivité de l'eau de mer sera bien plus faible que celle des eaux sulfatées [18]. Selon *Mehta* [118], le remplacement des ions OH⁻ par des ions Cl⁻ réduit l'alcalinité de la solution interstitielle nécessaire pour former de l'ettringite expansive. Par ailleurs, du fait de leur coefficient de diffusion relativement élevé, les chlorures pénétrant rapidement dans le béton et consomment une partie des aluminates en formant du monochloroaluminate non expansif. Toutefois, les chloroaluminates instables en présence de sulfate, tendent à se transformer en ettringite expansive plus ou moins lessivée par l'eau de mer.

Locher [111], attribue l'agressivité relativement faible de l'eau de mer à l'action du dioxyde de carbone qui induit la formation d'une couche protectrice dense de carbonate de calcium à la surface du béton. Cependant la pénétration d'ions de chlorure est beaucoup plus faible quand les ciments aux pouzzolanes et aux laitiers sont utilisés à la place du CPA.

Les ciments aux pouzzolanes et aux laitiers, grâce à leur pâte plus compacte et à cause de leur faible teneur en aluminates de calcium hydratés et de CH, empêchent la pénétration d'ions de sulfate et résistent intrinsèquement mieux que les ciments Portland à l'attaque des sulfates [43].

Action des chlorures seuls

Les chlorures s'introduisent dans le béton, soit au gâchage à partir des constituants de base lors de la confection du béton, soit plus tardivement si l'ouvrage est exposé à des embruns marins ou des sels. Les chlorures liés se trouvent dans le béton sous deux formes:

- Physiquement adsorbés sur les parois solides dans les pores.
- Chimiquement fixés par réaction avec certains composés du ciment, dans ce dernier cas, les composés formés sont le monochloroaluminate hydraté ou sel de (*Friedel*), de formule C₃A.CaCl₂.10H₂O.

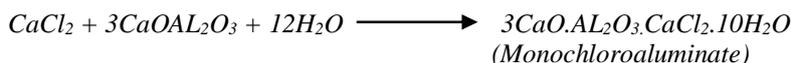
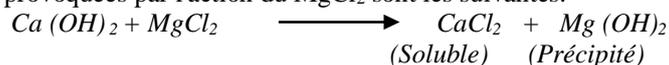
La capacité de fixation des ions Cl⁻ par le ciment dépend de la nature de ciment utilisé et principalement de la quantité d'aluminate C₃A présente dans le clinker. D'autres espèces ioniques peuvent intervenir sur la fixation chimique des chlorures. Ainsi les ions sulfates réagissent de préférence aux ions chlore sur le C₃A présent en formant des sulfoaluminates et en diminuant la capacité de fixation des chlorures. Le pourcentage des chlorures libres s'accroît avec le rapport E/C (alors que la quantité de chlorures liés reste sensiblement constante) et avec la concentration en sels du milieu environnant [152 et 156].

La diffusion d'ions de chlorure dans le béton est le résultat de mécanismes complexes où l'échange d'ions entre la solution agressive et la solution poreuse (interstitiel) dans le béton joue un rôle important. Le taux de diffusion des chlorures dans le béton est affecté principalement par le type de cation associé avec le chlorure [174].

La dissociation de MgCl₂, l'agent le plus actif dans l'attaque des ciments, libère Mg²⁺ qui substitue Ca²⁺ dans Ca(OH)₂ pour former Mg(OH)₂ et dans C-S-H pour former M-S-H sans propriétés liantes, son action se résume par sa dissociation en libérant ainsi les ions chlore qui réagissent avec les aluminates, pour former le monochloroaluminate ou sel de *Friedel* [35].

Ces mêmes ions chlores peuvent s'insérer dans le réseau cristallin de C-S-H et créer une structure alvéolaire, d'où la formation d'un treillis dont les mailles deviennent de plus en plus fragiles quand la qualité de la chaux dissoute augmente.

Les principales réactions provoquées par l'action du $MgCl_2$ sont les suivantes:



La formation du monochloroaluminat, instable donne en présence de sulfate l'ettringite $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ d'où le gonflement de l'ouvrage et sa dégradation. Il semble que la diffusion des chlorures combinés aux cations divalents (par exemple $CaCl_2$) soit plus rapide que celle correspondant aux cations monovalents comme $NaCl$ [152 et 163]. Par contre les chloroaluminates se forment en quantité plus importante à partir de $CaCl_2$ que de $NaCl$ [152]. On peut relever trois conséquences relatives à l'incorporation d'addition minérales dans les ciments sur la pénétration des chlorures.

- La capacité de fixation des chlorures est déterminée par la concentration en ($C_3A + C_4AF$) du liant. Or la teneur de ces composés diminue en présence de laitiers ou de cendres volantes puisque les aluminates proviennent de clinker.
- La quantité de chloroaluminates formée étant réduite, la teneur en chlorure libre devrait être plus élevée pour les ciments incorporant des additions minérales.
- Les additions minérales réduisent sensiblement le PH de la solution interstitielle. Cette diminution conduit à admettre une concentration admissible plus faible en chlorure au niveau de l'armature.

Action des sulfates seuls

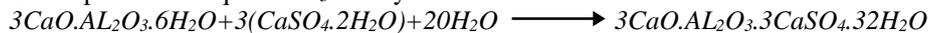
La dégradation des bétons par les sulfates est due principalement à des phénomènes d'expansion en relation avec la cristallisation d'ettringite, dite ettringite (secondaire). La formation de cette ettringite expansive est à distinguer de l'ettringite (primaire) obtenue aux premiers stades de l'hydratation des ciments Portland par réaction du gypse, car cette ettringite n'est jamais expansive [18]. Schématiquement, la formation de l'ettringite en deux étapes est résumée ci-après:

- a) Formation du gypse secondaire par opposition au gypse primaire ajouté au ciment comme régulateur de prise. La formation de gypse secondaire résulte d'une réaction de substitution entre la portlandite et le sulfate. Par exemple, avec le sulfate de sodium:



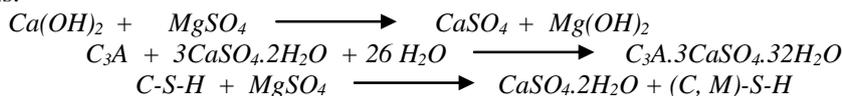
- b) Réaction entre le gypse secondaire et les aluminates de calcium du ciment formant l'ettringite.

- Soit à partir de reliquat de C_3A anhydre:



- Soit à partir de l'aluminat tétracalcique hydraté C_4AH_{13} ou de monosulfoaluminat de calcium $C_3A \cdot CaSO_4 \cdot H_{12}$.

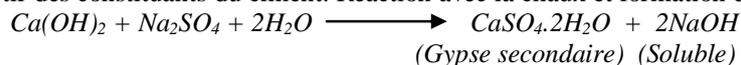
Suivant la composition de la phase liquide, en particulier de la teneur en chaux, la cristallisation de l'ettringite peut être expansive ou non. Dans les produits riches en chaux, où sa solubilité est réduite, l'ettringite se forme in situ au contact des aluminates de calcium, en présence d'une quantité très limitée de solution fortement sursaturée. Les sulfates les plus agressifs vis à vis des bétons sont les sulfates de magnésium, d'ammonium, de calcium et de sodium. Le sulfate de magnésium est très fortement agressif par la double action du cation Mg^{2+} qui s'échange avec Ca^{2+} et l'anion SO_4^{2-} suivant les réactions:



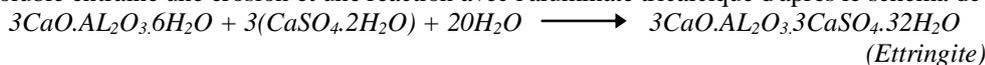
Les échanges de Mg^{2+} avec Ca^{2+} conduisent à la formation de brucite $Mg(OH)_2$ qui peut ralentir temporairement la pénétration des sulfates. Ils provoquent aussi la transformation progressive des C-S-H en un silicate de magnésium hydraté M-S-H sans propriétés liantes. De plus, la cristallisation d'ettringite, instable en présence de sulfate de magnésium, intensifie la réaction de formation du gypse [168].

Le sulfate de calcium, présent dans les sols sous forme de gypse et d'anhydrite, et dans les eaux souterraines séléniteuses, est agressif pour le béton malgré sa solubilité relativement faible. Le processus de dégradation, plus lent que dans le cas des sulfates de magnésium et d'ammonium, est dû essentiellement à la formation d'ettringite expansive.

Le sulfate de sodium, très soluble, entraîne une dégradation par formation de gypse et d'ettringite expansive dont les proportions relatives sont fonction à la fois de la concentration de SO_4^{2-} et de la teneur en aluminates tricalcique du ciment. L'action des eaux sulfatées offre le cas le plus simple d'une agression donnant naissance à des composés nouveaux expansifs à partir des constituants du ciment. Réaction avec la chaux et formation du gypse secondaire.



Une partie du gypse secondaire formé au cours de cette réaction précipite et provoque une expansion, l'autre partie soluble entraîne une érosion et une réaction avec l'aluminat tricalcique d'après le schéma de la réaction suivante:



L'ettringite ainsi formée provoque une expansion. Il est à noter que l'ettringite se forme normalement lors de la prise du ciment portland, mais elle se transforme rapidement dans les conditions habituelles de conservation en monosulfate.

En outre le gypse ajouté au clinker n'est plus à l'état libre dans la pâte durcie, comme les différents sulfates de calcium ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ et CaSO_4).

Les C-S-H, moins sensibles que la portlandite, ne sont pas affectés directement par le sulfate de sodium, mais, sont néanmoins, susceptibles de se décomposer dans un deuxième temps par lixiviation partielle de leur chaux et formation de gypse. Le sulfate de potassium, a une action voisine de celle du sulfate de sodium, mais la vitesse d'attaque est un peu plus lente. Les phases solides dans le ciment Portland bien hydraté, sont C-S-H, CH et les produits d'hydratation contenant l'alumine, ces deux derniers sont les plus vulnérables contre l'attaque des ions de sulfates.

Des essais ont montré que la percolation des sulfates peut, parfois, être responsable de la dégradation des mortiers. Si on considère le cas où les aluminates sont absents, comme dans le cas des mortiers manufacturés avec C_3S , l'action des sulfates sera beaucoup moins agressive que si on utilise le mélange $\text{C}_3\text{S} + 10\% \text{C}_3\text{A}$ [164].

Une pouzzolane naturelle de l'Italie riche en silice ($\text{SiO}_2 = 88,25\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 1,8\%$) a donné des résistances meilleures au mélange de ciment exposé à la solution de MgSO_4 en comparaison à la pouzzolane qui contient 17,58% Al_2O_3 .

Évidemment, par réduction de la quantité totale de l'alumine réactive dans le mélange de ciment, La pouzzolane riche en silice est capable de réduire la teneur en aluminate hydraté vulnérable aux sulfates dans la pâte de ciment [118]. Donc, on peut conclure que l'attaque sulfatique peut être réglée quand la présence d'aluminate hydraté dans la pâte de ciment est réduite ou même éliminée par la réduction de la teneur en C_3A ou par la substitution d'une partie de ciment par un matériau convenable.

Mehta [118], a constaté que la pâte de référence CPA et la pâte avec 10% de pouzzolane perdent plus de 50% de leur résistance à la compression, Tandis que pour le cas de 20 et 30% de pouzzolane la chute de résistance était inférieure à 20%. En général, la présence des ions de sulfate en faible quantité fait augmenter l'hydratation des ciments [43], ce qui explique l'augmentation de la résistance de la pâte de ciment aux jeunes âges.

Costa and Massaza [43], ont confectionné des ciments composés de ciment Portland avec ajout de 10, 30 ou 40% de pouzzolane naturelle de l'Italie. Les mesures d'expansion sur des mortiers exposés à une solution de 1% de MgSO_4 pour une période de 5 ans, prouvent que l'expansion engendrée par les sulfates est légèrement réduite par l'addition de 10% de pouzzolane, mais elle est considérablement réduite quand la proportion ajoutée est de 30 ou 40%. Les auteurs ont attribué ces résultats à la haute imperméabilité et à la faible teneur en CH du mortier à base de ciment avec 30 ou 40% de pouzzolane. Ils ont observé que dans l'hydratation de la pâte de ciment à la pouzzolane, le CH est présent non seulement en petite quantité mais encore entouré par les produits imperméables de réactions pouzzolaniques. La réduction de la perméabilité est assurée par l'utilisation des ajouts pouzzolaniques, qui devient un facteur majeur dans l'amélioration de la durabilité du béton exposé aux solutions sulfatiques.

Restauration : les travaux de restauration visent à remettre un bâtiment ou un ouvrage dans son état originel du fait de son intérêt architectural ou historique.

Réhabilitation : des travaux de réhabilitation visent à la fois à conforter un bâtiment et à le remettre en état en le dotant des éléments de confort moderne :

Apport d'isolation thermique,

Modernisation des installations intérieures (réseaux : électricité, chauffage, fluides, sanitaire).

La prévention des désordres

La prévention c'est tout ce que l'on peut faire avant qu'un problème n'arrive, pour l'empêcher justement d'arriver.

Il s'agit donc d'alerter, d'attirer l'attention, de signaler, d'informer, de sensibiliser, de prévenir.

La prévention c'est le contraire de l'improvisation, il s'agit en fait de réfléchir avant d'agir. De repérer les sources d'ennuis, non pour renoncer à l'action mais pour la maîtriser et la réussir ainsi du premier coup

Éléments de la prévention active coordonnée

CONCEPTION

- Intégrant sol de fondation
- Choix des matériaux et des techniques
- Calculs corrects

MATERIAUX

- Bonne qualité
- Fabrications fiables et contrôlées (Autocontrôle)

MISE EN OEUVRE

- Conforme aux règles de l'art (DTU, DTR, etc.)
- Correcte (personnel qualifié)
- Autocontrôle de l'entreprise
- Contrôle technique

USAGE
NORMAL

DURABILITE

ENTRETIEN
PERIODIQUE

Les matériaux subissent l'environnement : les actions mécaniques de la pesanteur et du vent, les actions hygro-thermiques et chimiques de l'air environnant ainsi que des matières agressives.

Chap. 2. Pathologie des terrassements

Toute exploration souterraine a un caractère fondamentalement incomplet et approximatif: on ne peut réduire le sol à une série de coefficients. Nous savons par exemple, que **la simple variation de la teneur en eau** peut changer son comportement du tout au tout, et du jour au lendemain.

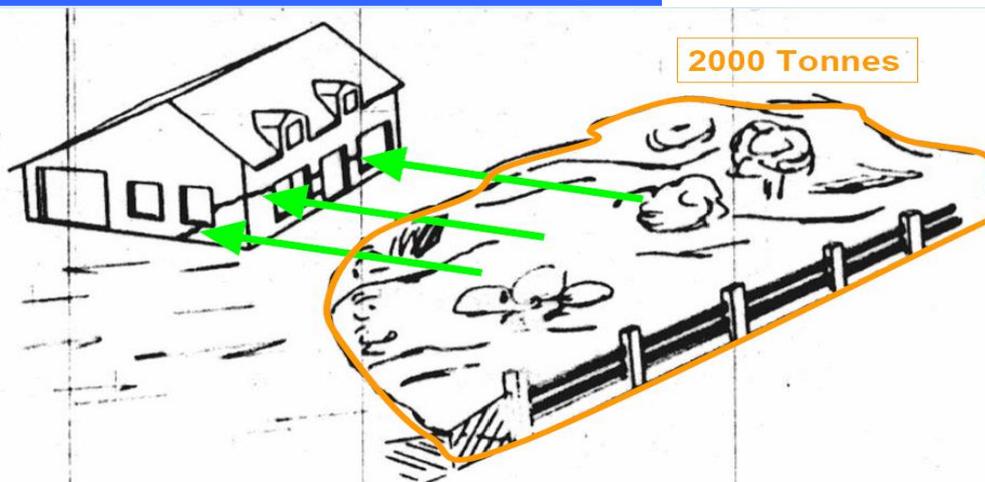
Glissement de terrain,

Effondrement de murs de soutènement.

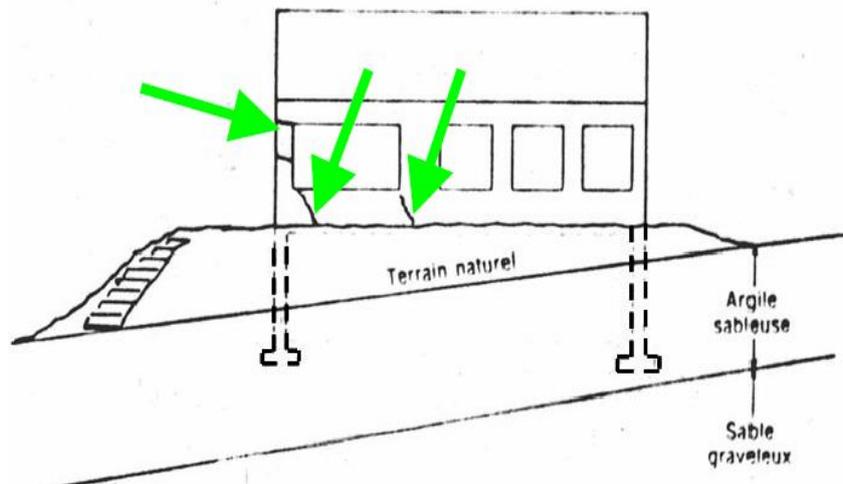
Poussée des terres, poussée hydrostatique, gonflement de certains sols argileux, erreurs de dimensionnement ou d'exécution.

Nous allons examiner au travers d'exemples concrets, les conséquences dommageables des remblais et des fouilles.

Remblais et autres surcharges

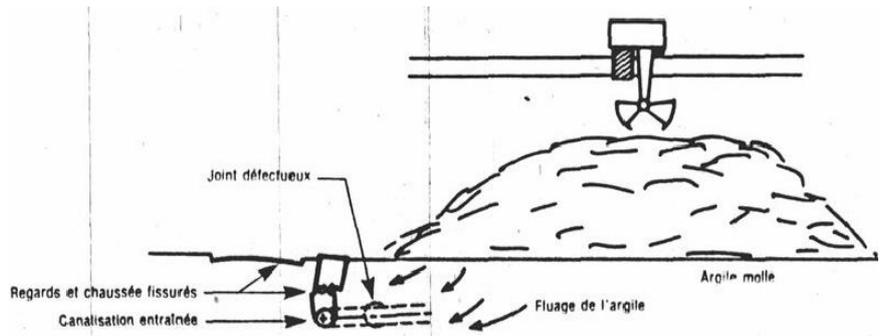


Tassements différentiels ----- fissures ----- état d'équilibre



Réalisé sur un terrain en pente se fissure gravement peu après son achèvement

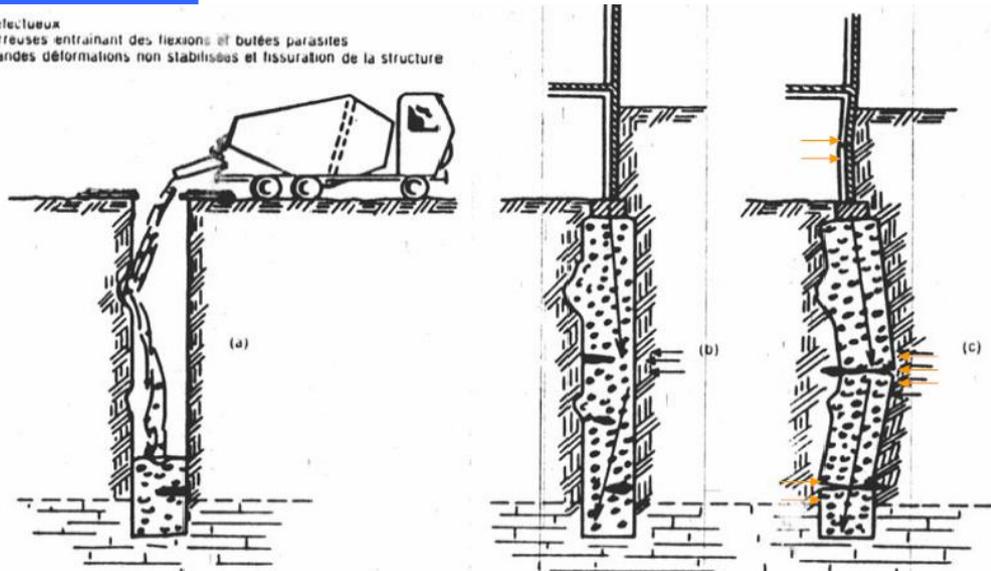
Une voie de circulation voisine revêtue en asphalte, comportait des fissures longitudinales et quelques effondrements.



Canalisation d'égout ----- argile molle ----- La pose de drains périphériques

Petites fouilles

- (a) Bétonnage défectueux
- (b) Inclusions terreuses entraînant des flexions et butées parasites
- (c) Ruptures, grandes déformations non stabilisées et fissuration de la structure

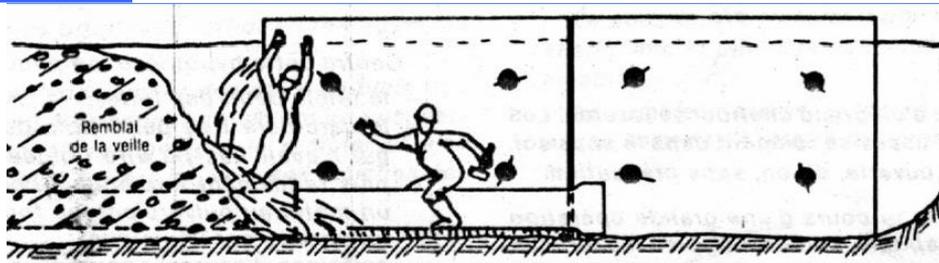


La fissuration des poteaux s'accompagnait d'autres fissures fines, horizontales dans les murs et cloisons.

La fondation sur puits avait été choisie pour asseoir le bâtiment sur un bon calcaire, situé sous 6 à 8 mètres d'une argile tourbeuse de très mauvaise qualité.

Les trous creusés n'avaient pas été blindés

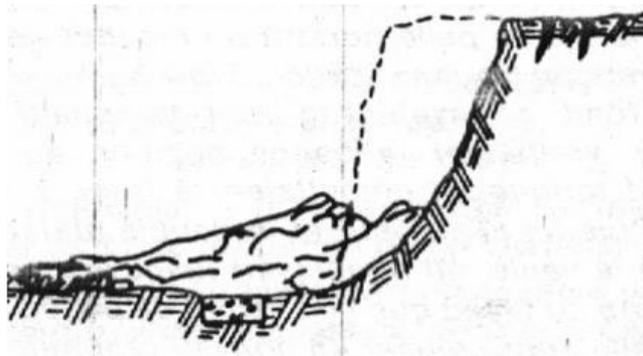
Tranchées



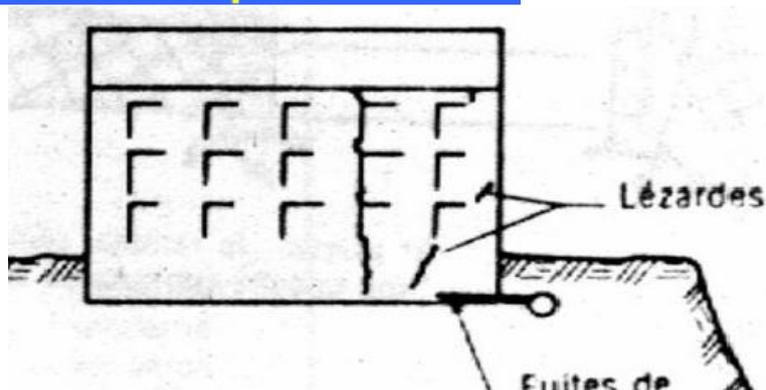
La terre gorgée d'eau

Fouilles larges

La cohésion des sables humides est un phénomène fugace.

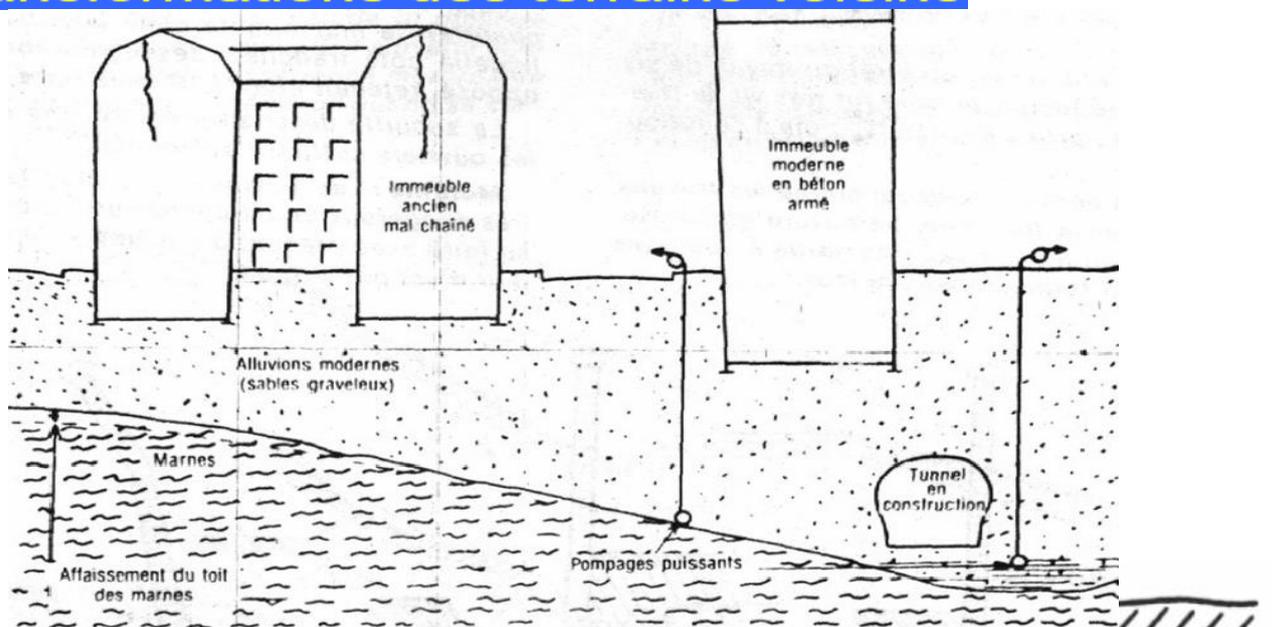


Grandes fouilles profondes



Un bâtiment voisin d'un grand chantier ----- Fuites des canalisations en sous-sol.

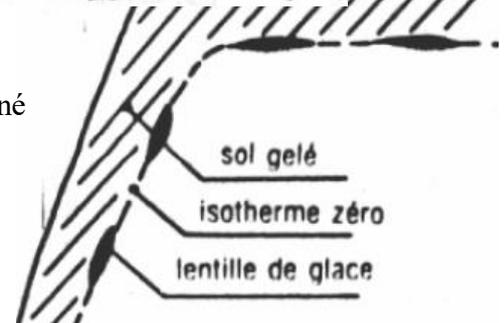
Transformations des terrains voisins



Gel et dégel

L'eau se transforme en glace. Ce changement d'état est accompagné par un accroissement de volume d'environ 9%.

L'eau à l'état liquide disparaît, ce qui modifie l'équilibre hygrométrique du milieu.

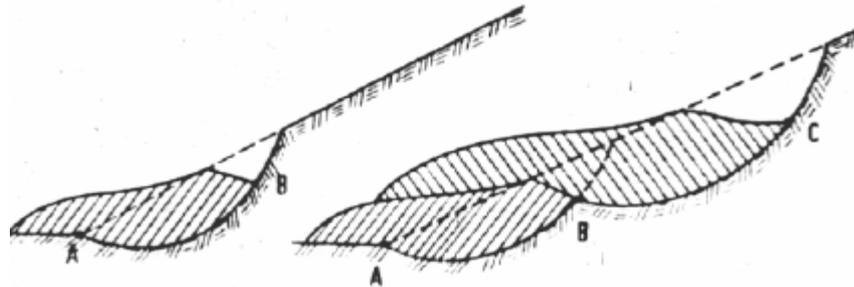


Terrain en pente

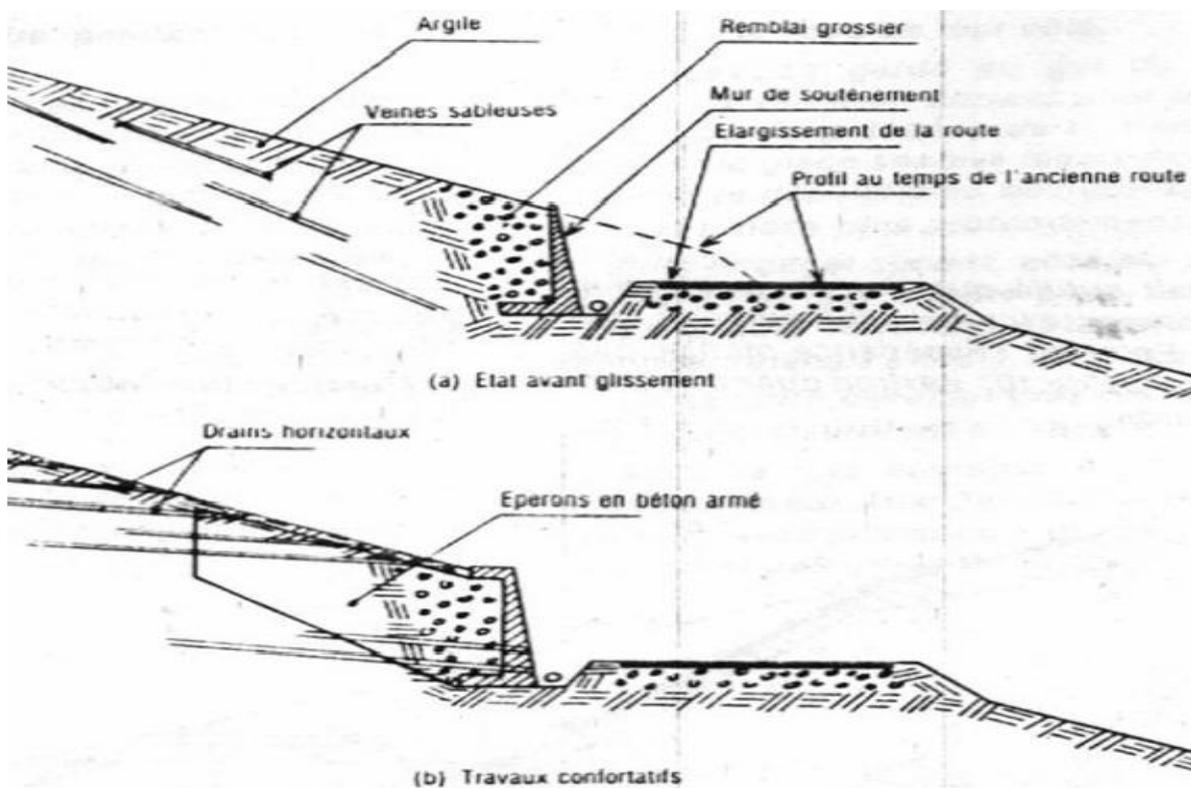
Une étude de sol est comme une prime d'assurance, elle n'est chère qu'avant l'accident.

Terrain meuble

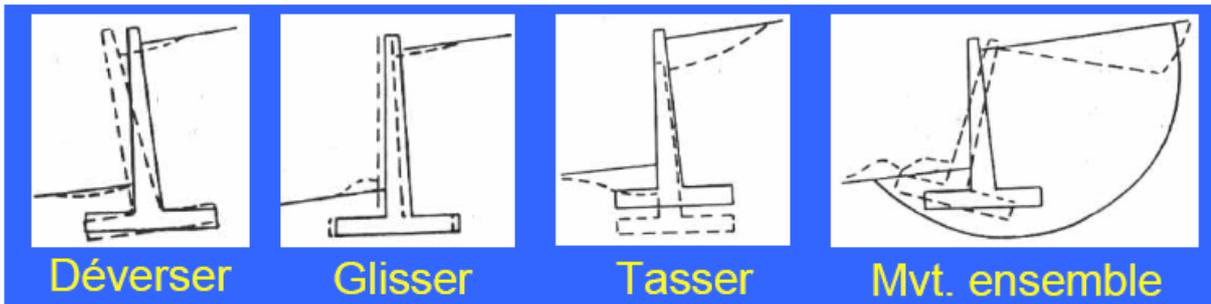
Glissement



La stabilité d'un terrain en pente



Chap. 3. Pathologie des murs de soutènements



A l'équilibre, les forces en présence dans un mur de soutènement doivent concourir et l'on a :

$$\vec{T} + \vec{P} + \vec{S} = 0$$

T : action des terres à soutenir,

P : poids du mur,

S : réaction du sol d'assise.

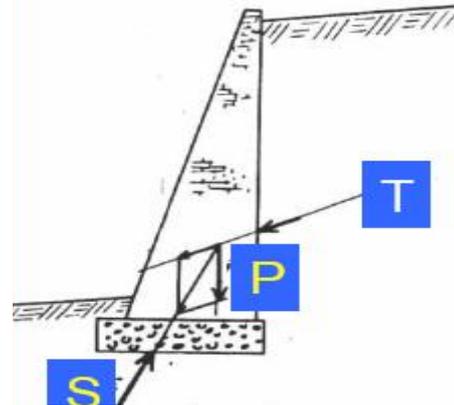
1/- Une mauvaise évacuation des eaux. Le plus souvent, une absence de drainage.

2/- Un mauvais dimensionnement.

3/- Fautes de conception ou d'exécution du mur.

4/- Eaux agressives. L'humidité. Détérioration des joints de dilatation. Fissurations.

5/- Les vibrations ----- un tassement.



La présence de l'eau provoque la dégradation des qualités mécaniques du sol (c et ϕ) d'où il résulte une aggravation de la poussée T.

Chap. 4. Pathologie des fondations

Le comportement du sol dépend à la fois de sa nature et de son état de compacité. Il se traduira suivant les cas par des tassements faibles ou importants, égaux ou inégaux qui seront plus ou moins acceptés par l'ouvrage.

Les argiles ont la propriété de pouvoir renfermer des quantités d'eau appréciables qui ont pour effet de modifier leur force portante, mais aussi pour certaines de les faire gonfler. La dessiccation produit l'effet inverse et peuvent conduire à des tassements.

Les fondations sont en contact de milieux pouvant être agressif.

Erreurs d'exécution (un mauvais positionnement des armatures soit en les posant sans cale sur le béton de propreté qui est un béton médiocre et poreux. L'acier se trouve ainsi sans protection contre l'humidité plus ou moins agressive du sol ; soit en inversant le ferrailage).

Chap. 5. Pathologie du béton armé

1. Erreurs de conception

Instabilité statique
Instabilité mécanique
Chocs et vibrations
Variations dimensionnelles incompatibles

2. Dimensionnement défectueux

Mauvaise prise en compte des données
N'oublier aucune charge
Ne pas ajouter de charges sans vérifier les calculs

3. Déficiences des plans

Ferraillage défectueux
Armatures de flexion
Armatures d'effort tranchant
Dispositions impossibles à réaliser (*Densité d'armatures*)
Dispositions dangereuses (*Poussé au vide des barres comprimées*)

4. Insuffisance ou absence d'indications claires

Plans trop schématiques
Absence de plans

5. Fautes d'exécution

Fautes portant sur le coffrage et l'étaielement
Défauts de coffrage
Support trop faible

6. Fautes portant sur le ferraillage

Armatures mal positionnées
Défauts de calage

7. Constitution, Fabrication et Coulage du béton

Choix des constituants et composition
Malaxage, transport, coulage et vibration
Cure du béton
Décoffrage

8. Vieillessement

Action de l'eau sur le béton durci
Action de l'eau sur les armatures
Action des produits chimiques sur le béton armé
Corrosion de l'acier

Chap. 6. Pathologie des maçonneries et des enduits

I. Pathologie des maçonneries

Une maçonnerie est un empilage de blocs (pierre, terre cuite, béton, etc.), bien liés entre eux par du mortier.

Erreurs de conception et de choix des matériaux

1/- Résistance insuffisante aux efforts :

- Charges verticales
- Charges horizontales
- Liaisons dangereuses

2/- Mauvaise qualité des matériaux : les qualités exigées des matériaux à mettre en œuvre dans une maçonnerie sont :

- Une bonne stabilité dimensionnelle (retrait),
- Une résistance en fonction des efforts supportés,
- Une bonne qualité d'isolation thermique et phonique quand de besoin.

3/- Défauts de mise en œuvre :

- L'homogénéité des constituants du mortier est exigée.
- les blocs doivent être mouillés au moment de la pose.

4/- Action de l'eau : dissolution lente de la chaux présente dans les blocs de ciment et le mortier de jointement et la perte de résistance qui en découle.

5/- Fissures et déformations : une vibration, un choc peut être l'action supplémentaire qui le déclenche.

II. Pathologie des enduits

Les causes principales des sinistres des enduits sont dues :

- ✓ soit aux fautes de conception dues à la méconnaissance du produit
- ✓ soit aux fautes d'exécution dues à la méconnaissance volontaire ou non des conditions d'application des produits et leurs limites.

Vieillessement des enduits :

- ✓ L'eau de pluie ;
- ✓ L'eau capillaire montant du sol ;
- ✓ Le soleil et le vent activent le phénomène ;
- ✓ L'eau provenant du sol ou de la pluie amène des sels.

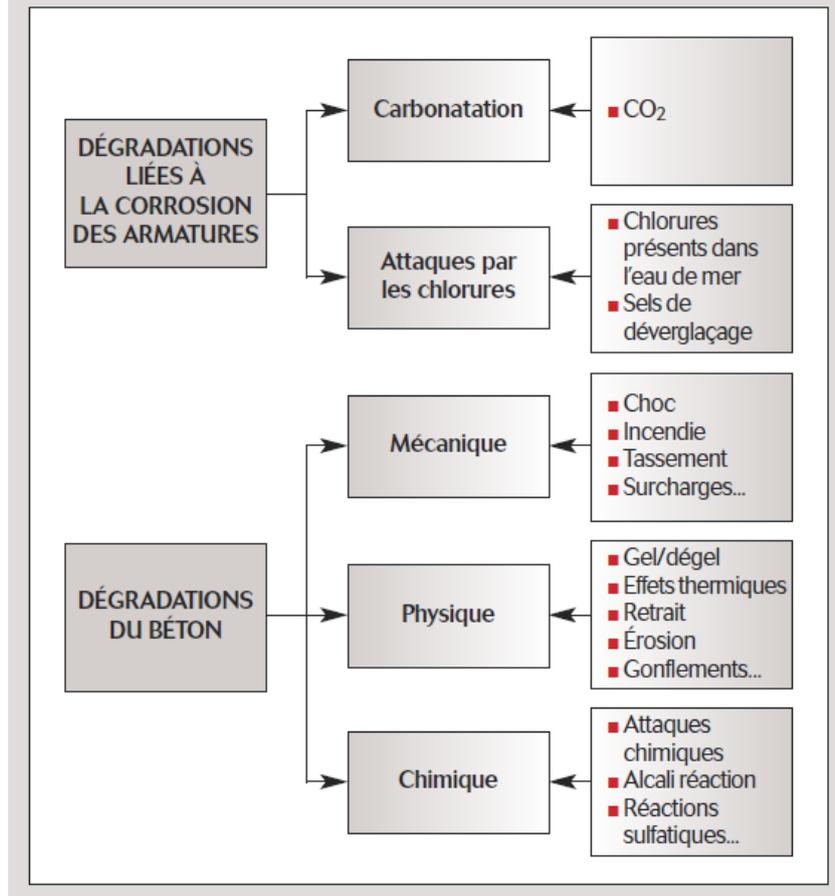
Acier

- **corrosion**
- **arrachement lamellaire**
- **fatigue**
- **rupture fragile**

Béton

- **fissuration**
- **corrosion des armatures**
- **éclatements**
- **dégradations physico-chimiques**

Principales causes de dégradations des bétons armés ou précontraints



Chap. 8. Les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages en béton armé

La durabilité d'un ouvrage dépend de nombreux paramètres dont la qualité de sa conception, des matériaux utilisés, de sa réalisation ainsi que des diverses conditions d'usage, d'exploitation et de maintenance. Le béton résiste au temps qu'il fait et au temps qui passe. Mais les ouvrages en béton peuvent nécessiter des opérations de réparation ou de renforcement pour augmenter leur durée d'utilisation ou offrir de nouvelles fonctionnalités.

- 1 : Les facteurs liés à la nature des matériaux.
- 2 : Les facteurs liés à la mise en œuvre.
- 3 : Les facteurs liés à la conception.
- 4 : Les facteurs liés à l'environnement (l'agressivité du sol et les conditions climatiques).
- 5 : Les facteurs liés aux conditions d'exploitation.
- 6 : Les facteurs liés au manque d'entretien.

Chap. 9. Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion

Les ouvrages et éléments concernés par la corrosion des armatures sont les suivants :

- **Bâtiments** : acrotères et balcons, dans toutes les atmosphères, éléments verticaux et terrasses, en milieux industriel et maritime. Ce sont bien sûr les éléments les plus sensibles des bâtiments, du fait soit de leur minceur, soit de la difficulté à maintenir des enrobages suffisants.
- **Bâtiments industriels** : poteaux et dalles. Ces éléments sont en effet soumis assez souvent à des expositions d'agents chimiques. Les poutres sont également des éléments particulièrement sensibles des constructions industrielles, car supportant parfois les dalles de plancher. Certaines d'entre elles sont parfois dans des états assez surprenants.
- **Parkings** : poutres et dalles, en milieu maritime ou montagneux. Cela est lié dans les deux cas à la présence des chlorures (provenant respectivement de l'eau de mer et des sels de déverglaçage).
- **Composants de structures préfabriquées** : il ne semble pas que des problèmes importants soient à signaler dans cette rubrique, du fait probablement que les bétons sont mieux soignés et mieux mis en œuvre. Toutefois, les poteaux de lignes électriques par exemple semblent être un objet de préoccupation. Il existe également une importante pathologie touchant divers éléments de construction, due à l'utilisation dans les années 60-80 d'accélérateurs de prise à base de chlorures de calcium. Cela concerne des panneaux de façade, des acrotères, jardinières, etc.
- **Ponts et ouvrages d'art** : dans cette catégorie d'ouvrages, il apparaît que les zones les plus sensibles soient les tabliers, les appuis en superstructures, et les équipements de tablier où l'influence des sels de déverglaçage est importante.
- **Réservoirs (enterrés, au sol, aériens)** : le principal problème de ces structures est lié aux circulations d'eau dues soit à la présence de fissures d'origines diverses (thermiques, mécaniques,...) ou de défauts d'enrobages des armatures, notamment si le milieu contient des sels agressifs (chlorures notamment). Sur les structures existantes souffrant de fissures, ou de fuites diffuses, les réparations consistent à colmater les défauts ou à installer une étanchéité.
- **Silos** : les silos pour le stockage des matériaux granuleux ou poudreux (céréales, ciments,...) sont soumis à de fortes contraintes, notamment pendant les périodes de chargement et de déchargement. Ces contraintes induisent des fissures, verticales ou horizontales. Celles-ci peuvent être à l'origine de pénétration d'eau, engendrant une corrosion des armatures.
- **Aéroréfrigérants industriels, de centrale nucléaire** : ces structures sont soumises à un environnement sévère (brouillard d'eau sous forme de vapeur ou de gouttelettes entraînées à l'intérieur, soleil, pluie ou gel à l'extérieur) engendrant des contraintes amorçant des fissures. Par ailleurs le fort gradient hydrique est à l'origine d'un transfert de vapeur d'eau pouvant être la source d'altération du béton.
- **Cheminées** : les cheminées (industrielles notamment) sont soumises à un environnement très sévère, acide particulièrement (acide sulfurique et acide chlorhydrique).

- **Structures portuaires** : celles situées en bord de mer souffrent de l'agression due aux chlorures. L'intensité de la corrosion est liée à l'agressivité du milieu (zone de marnage, d'éclaboussures, d'embruns). Des défauts d'enrobage ou de qualité du béton sont alors immédiatement mis en évidence.
- **Canalisations en béton armé et précontraint** : la plupart sont enterrées, et des ruptures surviennent lorsque la protection du béton n'est plus suffisante (défauts locaux d'enrobage, présence de chlorures).

Les dégradations dues à la corrosion des armatures

Les corps dissous dans le milieu qui environne l'ouvrage, peuvent pénétrer progressivement dans le béton. Certains d'entre eux sont agressifs, par exemple le dioxyde de carbone (CO₂), les acides (engrais, etc.) et les chlorures.

Un acier mis au contact d'un béton qui a une forte basicité (pH de l'ordre de 12) et qui n'est pas pollué par des chlorures, se recouvre d'oxydes protecteurs. Si son enrobage est chimiquement modifié, cet acier se recouvre de produits "intermédiaires" qui ne sont pas stables en présence d'oxygène dissous dans le béton. Ils se transforment en des produits "finaux" non protecteurs, ce qui conduit à la dissolution et à l'enrouillement continu de l'acier.

C'est pourquoi, les dégradations par corrosion des armatures produisent des défauts qui ne deviennent visibles qu'après un certain délai. Les défauts invisibles sont des modifications chimiques et parfois physiques (liés à la microstructure) de l'enrobage de béton. Il s'agit aussi du début d'un éclatement (délaminage) de cet enrobage ou de la formation d'une fine couche de rouille sur l'acier. Dans certains cas, la dissolution des armatures se produit, sans aucune trace visible sur le parement.

Les dégradations mises en évidence sont des éclatements, des épaufrures et des fissures du béton d'enrobage. D'autres mécanismes peuvent également être à l'origine de ce type de désordres. Lorsque la corrosion est très avancée, des traces de rouille sont visibles, les armatures peuvent être mises à nu et leur dissolution (perte de section) constatée.

Les étapes de réparation du béton armé dégradé par la corrosion :

1. Elimination des zones dégradées ;
2. Traiter les armatures corrodées (sablage, brossage et soufflage) ;
3. Remplacement des armatures fortement corrodées ;
4. Protection des armatures ;
5. Renforcer les armatures dont la section à diminuer par le rajout de nouvelles barres ;
6. Coffrage, Reconstitution de l'enrobage et une bonne cure après le décoffrage de la réparation.



Traitement des armatures corrodées

Chap. 10. L'humidité dans les bâtiments

Les sources d'humidité :

Les sources d'humidité dans les bâtiments se répartissent en trois grandes familles :

- 1) **Les sources extérieures au bâtiment** : elles sont principalement constituées de la pluie (pénétration par la façade ou par la toiture) et des remontées capillaires (par les fondations ou les murs enterrés).
- 2) **Les sources provenant du bâtiment lui-même** : que ce soit en neuf ou en rénovation, les matériaux possèdent une certaine humidité qu'ils vont dans certains cas devoir évacuer. C'est le cas du séchage du béton ou des enduits par exemple.
- 3) **Les sources liées aux usagers** : une personne émet de la vapeur d'eau par respiration et par sudation. La cuisine et la toilette sont aussi des sources d'humidité liées à l'utilisation du bâtiment.

Chap. 11. Le diagnostic des pathologies des constructions

1. Généralités

Le diagnostic est l'ensemble des investigations nécessaires pour définir l'origine et l'étendue des désordres constatés et il doit, en premier lieu, déterminer *si la sécurité structurale et l'aptitude au service sont assurées* et *si elles le resteront dans le futur*.

Un autre but de l'auscultation est *l'établissement d'un document répertoriant les dégâts constatés*.

Ce document devrait être établi sur la base de *visites régulières*. Connaissant l'évolution des dégâts entre deux auscultations, il devient plus aisé d'évaluer l'état et de faire une projection dans le futur. Un relevé systématique représente également une base importante pour la recherche et le développement.

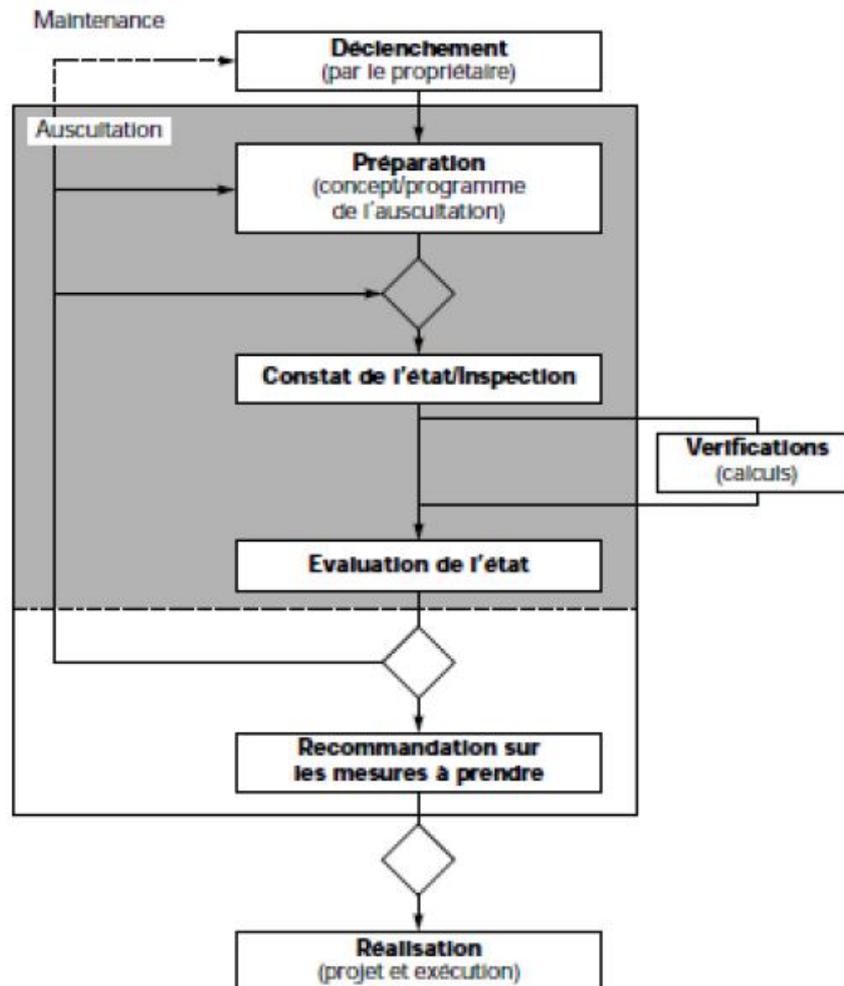
Ces données permettent en effet de tirer des conclusions sur le comportement général des ouvrages. Ces données peuvent servir de base pour l'élaboration de prescriptions techniques traitant de constructions nouvelles ou de l'entretien.

Les objectifs du diagnostic

- identification de l'origine des désordres ;
- évaluation de leur étendue dans l'espace ;
- prédiction de leur évolution probable, dans l'espace et dans le temps en cas de non intervention ;
- estimation des conséquences des désordres sur la portance et la sécurité de l'ouvrage et des personnes ;
- détection de produits nocifs éventuellement présents dans l'ouvrage : amiante, plomb...
- définition des suites à donner et des solutions de réparation ou de renforcement envisageables.

2. Phases d'une auscultation

La **figure** définit les phases de *l'auscultation d'un ouvrage*. L'auscultation comprend les phases « Préparation », « Constat de l'état » et « Evaluation de l'état ».



Phases successives de diagnostic d'un ouvrage existant

Le premier pas d'un diagnostic consiste à planifier en détail des opérations. Cela comprend un planning précis des interventions, les appareils, les moyens accessoires nécessaires, la gestion du personnel, la planification des mesures de circulation, etc. A la suite. On collecte ensuite les informations nécessaires sur site. Pour ce faire, on peut avoir recours, selon les besoins, à des mesures allant de la simple auscultation visuelle avec bien sûr l'utilisation d'outils simples tels que marteau à des campagnes complexes d'essais de charges comprenant un réseau de capteur de déplacements liés à un ordinateur permettant la saisie et le traitement des données in situ.

Lors de la collecte des données, il faut prêter une attention particulière à l'enregistrement et au classement des informations. En négligeant ce point, la valeur des conclusions que l'on peut tirer des mesures décroît rapidement. Ce point est important en prévision de l'exploitation des données pour l'évaluation de l'état qui se fait au bureau ainsi qu'en prévision, d'auscultations futures du même ouvrage permettant de constater l'évolution des dégâts.

2.1. Evaluation de l'état

Dans l'évaluation de l'état, on fournit, sur la base des données et des informations collectées, des réponses aux questions posés par le maitre d'ouvrage, relatives à l'état ainsi qu'à son évolution

2.2. Recommandations sur les mesures à prendre

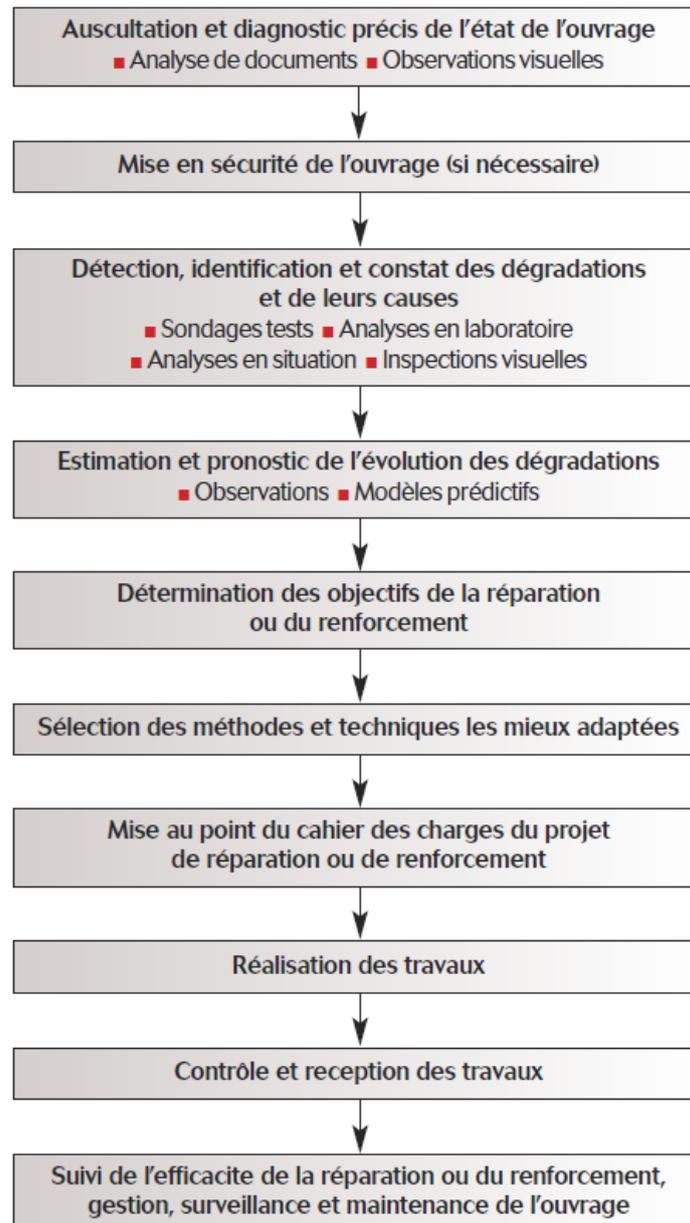
Le maître d'ouvrage demande à l'ingénieur de faire, en fonction de l'évaluation de l'état, des propositions sur le déroulement futur des opérations. Les mesures à prendre se résument comme suit :

- ✓ Les mesures proposées doivent permettre d'assurer la sécurité de l'ouvrage
- ✓ L'ouvrage doit être préservé à long terme.
- ✓ Les mesures proposées doivent être économiques à long terme » ;
- ✓ L'aspect esthétique de l'ouvrage doit répondre aux exigences réglementaires.

2.3. Réalisation

Sur la base des prescriptions de l'ingénieur et des décisions du maître d'ouvrage, il est possible de débiter la planification et procéder à l'exécution des travaux de réparation. En vue d'auscultations futures, il est important que les mesures exécutées soient richement documentées et que ces pièces soient jointes au dossier de l'ouvrage.

3. Synoptique des étapes clés pour la réparation et le renforcement d'ouvrages en béton



Les différents essais de diagnostic

Essais physiques non destructifs

- contrôle visuel : recherche des fissures, taches de rouille...
- essais au marteau et sondages sonores ;
- essais au phacomètre : emplacement de l'enrobage de l'armature et détermination de sa valeur ;
- cartographie du potentiel : prévision relative à l'état de l'armature ;
- mesure du courant de corrosion ;
- jauges de fissures : mesure de l'état et de la stabilité des fissures.

Essais chimiques

- analyse de la profondeur de carbonatation ;
- mesure du taux d'ions chlorures ;
- analyse au microscope : détermination de l'activité de la réaction alcali-agrégats.

Essais destructifs

- carottage permettant d'identifier la résistance du béton.

I. Introduction

Les *méthodes expérimentales* scientifiques consistent à *tester par des expériences répétées* la validité d'une hypothèse. L'obtention de données nouvelles, *qualitatives* ou *quantitatives*, confirme ou infirme l'hypothèse initiale.

Les *essais mécaniques* (compression, traction, ...etc.) sont des expériences dont le but est de caractériser les lois de comportement des matériaux (*caractérisation et certification des bétons*). La *loi de comportement* établit une relation entre les contraintes et les déformations. La *résistance mécanique* est exprimée par le pouvoir du béton à résister à la destruction sous l'action des contraintes dues aux différentes charges de compression ou de traction. Dans cette partie, il s'agit des essais de compression et de traction par fendage sur des éprouvettes cubiques (15×15×15 cm) et cylindriques (16×32 cm), respectivement.

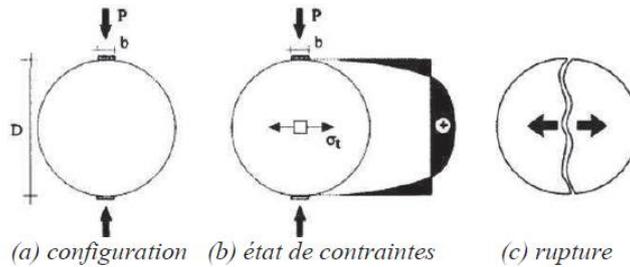
Généralement les bétons sont classés selon leurs résistances en compression à 28 jours. La *résistance à la compression* à 28 jours est souvent considérée comme le seul critère pour l'approbation d'un mélange de béton par l'industrie de la construction. La résistance en compression à 28 jours est désignée par R_{c28j} . *La résistance à la compression en (Mpa) est le rapport de la charge de rupture (Newton) par la section transversale de l'échantillon (mm²).*



Presse hydraulique

L'essai de *traction par fendage* connu aussi sous le nom d'essai brésilien est utilisé pour mesurer la résistance à la traction du béton. L'avantage principal de l'essai de fendage est qu'il est facile à réaliser où une seule charge de compression est nécessaire.

En appliquant une compression sur le plan médian d'un cylindre, une traction est générée perpendiculairement à l'effort appliqué selon le principe de poisson. La résistance du béton mesurée lors de l'essai de fendage assez voisine (10% près) de la résistance par traction directe.



Essai brésilien

La rupture est caractérisée par le fendage de l'éprouvette en deux moitiés à travers le plan diamétral. La mise en charge s'effectue avec une vitesse constante de 0,05 Mpa/s. La contrainte maximale de traction par fendage (f_{tf}) en (Mpa), perpendiculaire au diamètre sollicité, est évaluée selon l'équation :

$$f_{tf} = \frac{2P}{\pi DL}$$

P : charge appliquée (Newton) ; D, L : diamètre et longueur de l'éprouvette (mm).

II. Contrôles (essais) non destructifs du béton

La méthode normalisée utilisée pour évaluer **la qualité du béton** dans les bâtiments ou les ouvrages comprend les essais destructifs de résistance à la compression, à la flexion et à la traction effectués sur des éprouvettes coulées au même moment. Néanmoins cette méthode présente quelques **inconvénients** dont les principaux sont : **le béton des éprouvettes peut être différent de celui de l'ouvrage car la cure ou le compactage peuvent être différents; les propriétés de résistance d'une éprouvette de béton dépendent de sa géométrie et de ses dimensions; prélèvements pas toujours réalisables (accessibilité, sensibilité des ouvrages, esthétique); et coûteux.** Pour répondre à ces problèmes, on a développé une gamme d'essais in situ appelés « **essais non destructifs** » venant compléter les essais destructifs. Les essais non destructifs consistent à prendre des mesures qui n'endommagent pas les constructions, Ils représentent des méthodes de reconnaissance couramment appliquées aux structures de bâtiments. Les essais non destructifs peuvent jouer un rôle exceptionnel dans la garantie de la qualité du béton et dans le développement ultérieur de la technologie de construction. Une importante caractéristique des essais non destructifs est qu'ils peuvent être refaits au même endroit ou presque, ce qui permet de suivre les changements des propriétés du béton dans le temps.

II.1. But d'utilisation

Ces essais sont **rapides et faciles** à mettre en œuvre, et apportent de surcroît une réponse globale à l'échelle d'une structure ou d'un ouvrage, dans le cadre de **contrôles d'ouvrages neufs** ou en construction comme de **diagnostics d'état d'ouvrages anciens**.

II.2. Principaux domaines d'application

Les essais non destructifs permettent de contrôler la qualité de la construction et mesurer de façon indirecte les caractéristiques des matériaux à savoir : La résistance ; L'homogénéité ; La durabilité (*Coefficient de qualité $A=R_{solu}/R_{l'eau}$, Absorption d'eau par capillarité, Porosité volumique, Perméabilité au gaz, etc.*).

II.3. Avantages des ces méthodes

Les méthodes non destructives présentent les avantages suivants : la performance ou l'apparence de la structure n'est pas modifiée; la possibilité de suivre le changement des propriétés du béton dans le temps; une plus grande sécurité, et une meilleure planification de la construction; et une progression plus rapide et plus économique.

II.4. Méthodes d'essais

Essai au scléromètre ; essai d'auscultation dynamique ; et la méthode combinée.

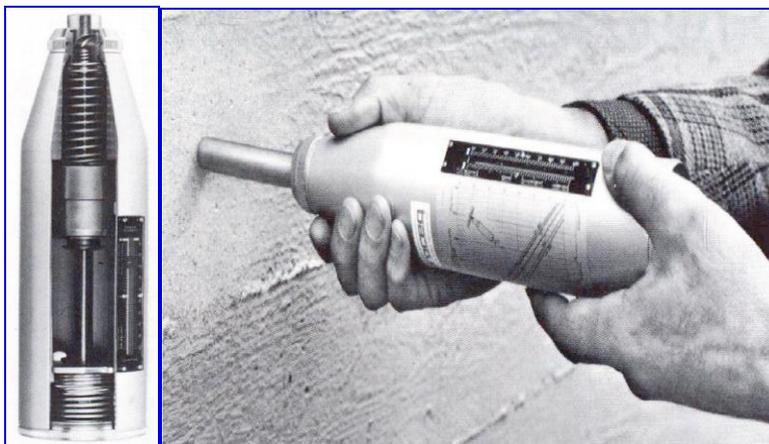
II.4.1. Essai au scléromètre

L'essai au scléromètre est destiné à mesurer la dureté superficielle du béton, et il existe une corrélation empirique entre la résistance à la compression et l'indice sclérométrique. Il convient aux essais au laboratoire comme aux essais sur chantier. Le but de l'essai est de permettre l'obtention rapide de la résistance à la compression du béton, sans procéder à des **prélèvements du béton durci par carottage**.

L'essai au scléromètre consiste à projeter une masse sur la surface du béton avec une énergie initiale constante. Suite au choc, une partie de l'énergie est absorbée par le béton, l'autre partie provoque le rebondissement de la masse. L'énergie d'impact est produite par un système de ressorts dont l'amplitude du mouvement de recul est fonction de :

- L'énergie de recul ;
- Caractéristiques des systèmes de ressorts.

La mesure de la dureté au choc permet d'évaluer la résistance d'un béton de manière non destructive. Cette méthode est intéressante en raison de sa simplicité ; elle permet de faire rapidement des contrôles de régularité des bétons d'un ouvrage.



Scléromètre

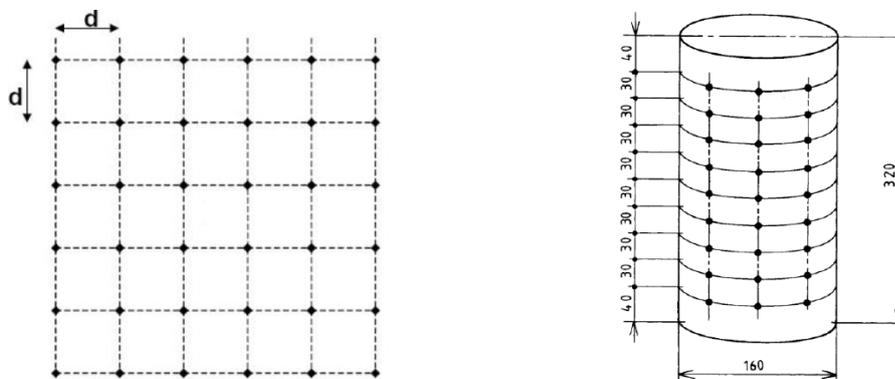
Dans l'essai au scléromètre une masse approximative de 1.8 kg montée sur un ressort a une quantité potentielle fixe d'énergie qui lui est transmise par un ressort tendu a partir d'une position fixe, ce que l'on obtient en pressant la tête du marteau contre la surface du béton mis à l'essai. Lors de son relâchement, la masse rebondit depuis la tête, toujours en contact avec la surface du béton et la distance qu'elle parcourt, exprimée en pourcentage de l'extension initiale du ressort est appelée **l'indice de rebondissement**. Cet indice est indiqué par un curseur qui se déplace le long d'une règle graduée.

II.4.1.1. Préparation de la surface

Les mesures doivent être effectuées sur des **surfaces nettes** ne présentant pas de nids de gravier, des écaillages, de texture grossière, de porosité élevée ou d'armatures affleurant. La préparation de la surface consiste à éliminer tout enduit ou peinture adhérent. Toute trace d'eau sur la surface doit être séchée.

II.4.1.2. Points de mesures

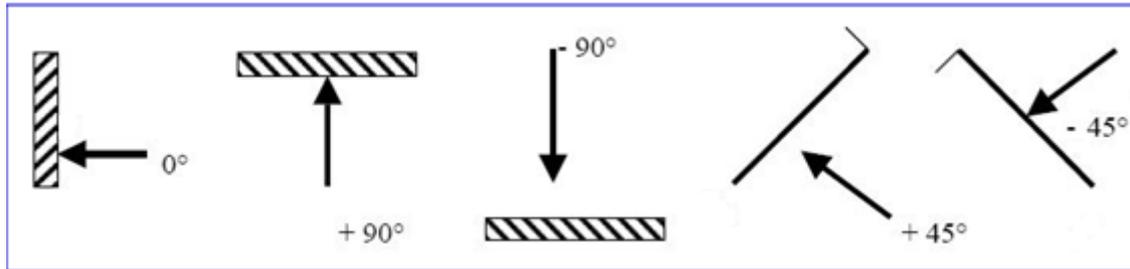
Une grille de points de mesures ayant pour espacement $d = 30 \div 50$ mm. Les points de mesures extrêmes doivent être au moins à 40 mm des bords de la surface testée.



Grille de mesure

II.4.1.3. Méthodes de mesure de l'indice de rebondissement

L'indice de rebondissement est la mesure enregistrée sur une échelle graduée fixe par rapport au bâti de l'appareil de scléromètre, après la projection d'une masselotte chargée par ressort sur une tige métallique en contact avec la surface du béton. Cette mesure est fonction de l'angle d'inclinaison de l'appareil par rapport à l'horizontal.



Inclinaisons possibles

II.4.1.4. Étalonnage de l'appareil

Le scléromètre doit être contrôlé par des essais d'étalonnage, car les constantes des ressorts changent après plusieurs utilisations. *Deux méthodes sont utilisées :*

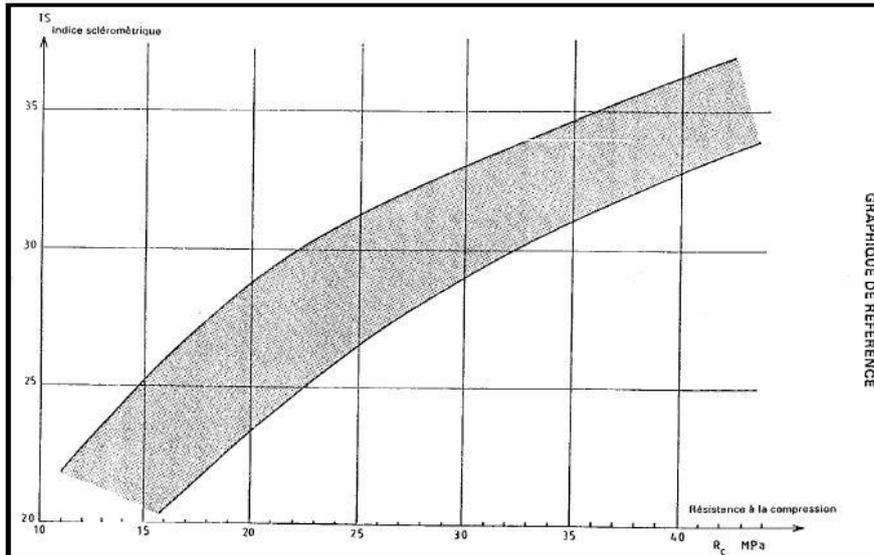
a. Sur bloc en néoprène armé

Effectuer sur le bloc en néoprène, posé sur une assise rigide et plane, deux séries de 27 mesures espacées de 5 s et calculer la moyenne de l'indice sclérométrique (I) de la 2^{ème} série. La position de l'appareil doit être verticale. *Deux cas peuvent se présenter :*

- ✚ (28 ≤ I ≤ 32) le fonctionnement de l'appareil est satisfaisant;
- ✚ (I < 28 ou I > 32) l'appareil est défectueux; il sera procédé au nettoyage de l'appareil pour refaire une nouvelle fois la mesure de (I).

b. Sur éprouvettes de béton

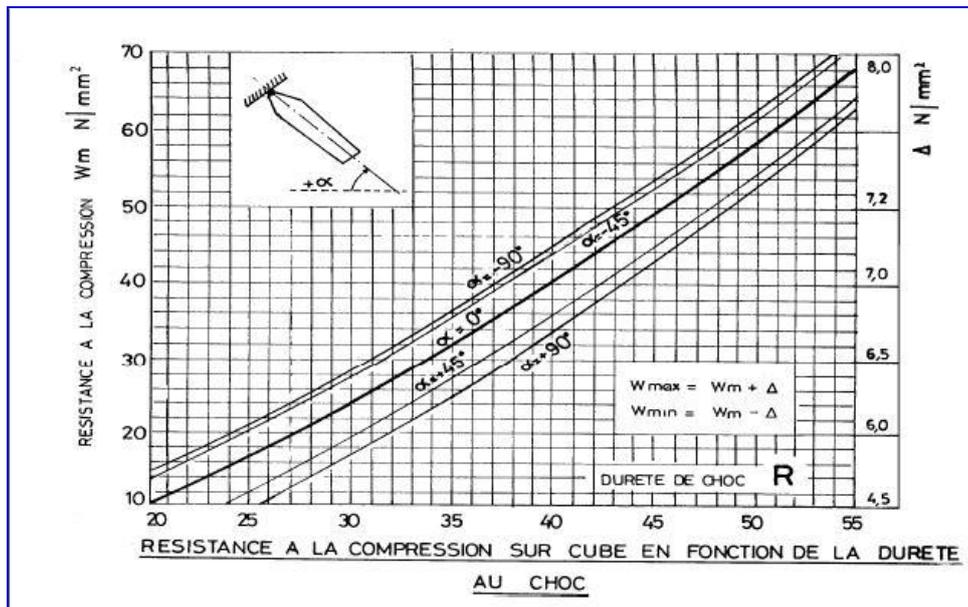
Cette méthode consiste à déterminer la moyenne de l'indice sclérométrique (I) par des mesures effectuées sur trois séries de trois éprouvettes du béton, correspondant aux trois classes de résistances à la compression 15, 25 et 35 Mpa. Les mesures de l'indice I_s sont suivies d'un essai d'écrasement des éprouvettes. Les trois couples de valeurs sont reportés sur le graphique de la figure. Dans le cas où les trois points représentatifs se retrouveraient à l'intérieur du fuseau, donc le fonctionnement de l'appareil est *satisfaisant*. Dans le cas contraire, le fonctionnement de l'appareil est défectueux. Une révision est nécessaire avec un certificat d'étalonnage.



Graphique de contrôle du fonctionnement de l'appareil

II.4.1.5. Interprétation des résultats de contrôle du béton au scléromètre

Dans la plupart des cas, la composition du béton ainsi que les conditions de conservation affectant la *corrélation* « *Indice sclérométrique - Résistance du béton* ». On utilise alors une *courbe de transformation unique* figurant sur l'appareil fourni par le fabricant.



Courbe de transformation unique

La résistance à la compression du béton peut aussi être obtenue à partir de la formule :

$$R_C = I^2 / 32$$

Avec: R_C : Résistance à la compression ; I : Indice sclérométrique.

- L'expression proposée par (D. Boukhelkhal & S. Kenai, 2015) à cette corrélation est une relation de forme puissance présentée par l'équation :

$$R = 0,013 I^{2,112}$$

Avec : **R** en MPa

Avec : un coefficient de corrélation $r^2 = 0,957$ et une erreur type $s = 3,121$ Mpa.

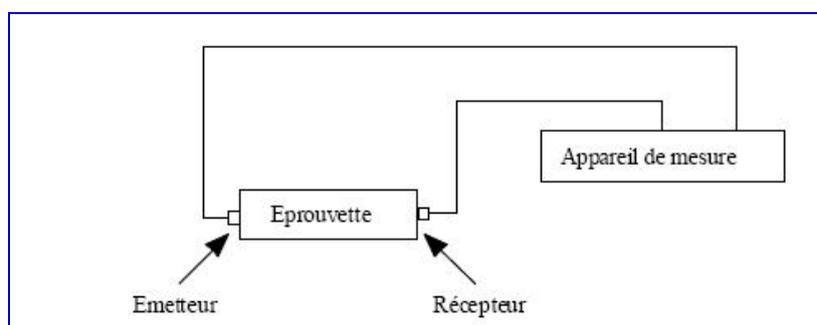
II.4.1.6. Avantages

- ✚ C'est une méthode peu coûteuse, simple et rapide ;
- ✚ L'essai au scléromètre est comparatif, il est utile pour évaluer l'homogénéité du béton dans une structure ou lors de la fabrication d'éléments semblables des éléments préfabriqués ;
- ✚ L'essai peut aussi être utilisé pour vérifier si la valeur de l'indice de rebondissement a atteint la valeur désirée correspondant à la résistance du béton, ce qui peut aider à décider du moment où l'on peut mettre la structure en service ;
- ✚ Une utilisation de cet essai est de pouvoir vérifier si le développement de la résistance d'un béton a été affecté par le gel au jeune âge. (Selon la norme ASTM C 805-85 un béton encore gelé peut donner un indice de rebondissement très élevé) ;
- ✚ Une application particulière de l'essai au scléromètre consiste à évaluer la résistance à l'abrasion des planchers de béton, qui dépend largement de la dureté de surface.

II.4.2. Essai d'auscultation dynamique

La méthode consiste à mesurer la **vitesse de propagation** des ultrasons traversant le béton à l'aide d'un **générateur** et d'un **récepteur**. Les essais peuvent être effectués sur des éprouvettes au laboratoire ou sur des ouvrages. De nombreux facteurs influent sur les résultats ; la surface, la maturité du béton, la distance de parcours de l'onde et la présence d'armatures.

Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance donnée.



Principe de la méthode

Les essais consistant à mesurer la vitesse de propagation peuvent être effectués sur des éprouvettes de laboratoire comme sur des ouvrages en béton terminés. **Certains facteurs influent toutefois sur la prise de mesures :**

1- Les ondes se déplacent plus vite à travers un vide rempli d'eau qu'à travers un vide rempli d'air. Par conséquent les conditions d'humidité du béton influencent la vitesse des ondes sonores.

2- La surface sur laquelle l'essai est effectué doit épouser parfaitement la forme de l'appareil qui lui est appliqué, il est recommandé *d'employer un matériau intermédiaire* entre le béton et les transducteurs. Les matériaux d'interposition sont *la vaseline de commerce, un savon liquide* ou *une pâte constituée de Kaolin et de Glycérol*. Lorsque la surface de béton est très rugueuse, il est nécessaire de poncer et d'égaliser la partie de la surface où le transducteur sera fixé.

3- La présence d'acier dans le béton en particulier l'armature qui suit le trajet de l'onde entraîne une augmentation de la vitesse. Il est par conséquent souhaitable et souvent indispensable de *choisir des parcours qui ne sont pas influencés par la présence d'acier d'armature* ou d'effectuer des corrections si de l'acier se trouve sur le parcours.



La vitesse est calculée par la formule: $V \text{ (m/s)} = \frac{d}{t}$

Appareil d'auscultation sonore

II.4.2.1. Travaux préparatoires

- Poncer et égaliser la partie de la surface de l'élément à ausculter où le transducteur sera fixé;
- Employer un matériau intermédiaire entre les deux et en prenant soin de vérifier que l'appareil est bien appliqué contre la surface à tester à l'aide d'un matériaux d'interposition comme la vaseline, un savon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de Glycérol.

II.4.2.2. Points de mesures

Le nombre de points de mesures dépend des dimensions de l'ouvrage à tester. Pour un grand panneau (dalle, voile, radier, ...etc.) les points de mesures sont situés aux intersections d'un quadrillage d'une maille de 0.5 m. Le cas des petits éléments (poteaux, poutres, ...etc.), les mesures se font en six points.

On recommande une distance minimale de parcours de 400 mm pour les mesures en surface.

II.4.2.3. Étalonnage de l'appareil

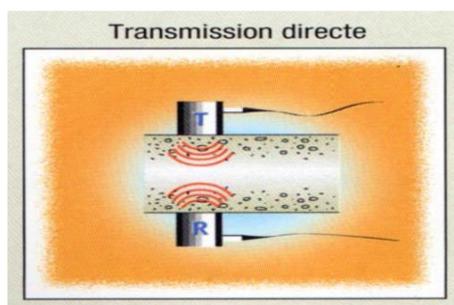
L'ultrason doit toujours être contrôlé par des essais d'étalonnage avant chaque utilisation. L'étalonnage consiste à vérifier le temps de propagation à travers ***la tige étalon*** dont le temps est connu à l'avance. Il faut ajuster l'ultrason dans le cas où le temps mesuré ne correspond pas à celui marqué sur la tige étalon.

II.4.2.4. Manières de mesure

La détermination de la vitesse de propagation des ultrasons *se fait de trois manières*, suivant le type de l'élément à tester :

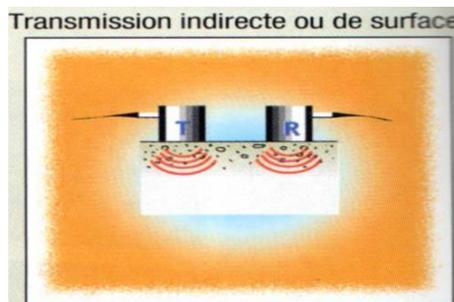
a - Mesures en directe

Les mesures en directe sont utilisées dans le cas des éprouvettes, des poteaux ou de certaines poutres. Les transducteurs sont appliqués sur les deux faces de l'élément à tester.



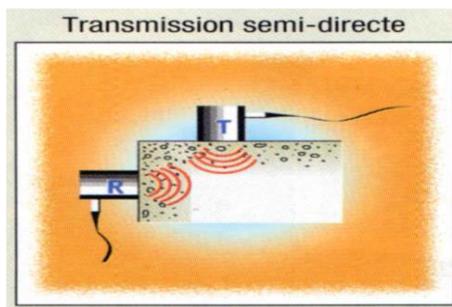
b - Mesures en surface (indirecte)

Elles sont utilisées sur tous les éléments de structure et sur les éprouvettes, mais plus particulièrement sur les dalles et éléments en longueur. L'émetteur est maintenu en un point fixe, le récepteur est déplacé successivement à des distances marquées à l'avance. Après avoir relevé le temps correspondant à un point considéré, on passe au point suivant.



c - Mesures semi directe

Elles sont utilisées sur tous les éléments de structure et sur les éprouvettes, mais plus particulièrement sur les éléments de structure où on ne peut pas utiliser les deux autres manières.



II.4.2.5. Interprétation des résultats de mesure aux ultrasons

Dans un milieu homogène et isotrope, la vitesse des ondes longitudinales des ultrasons est reliée au **module d'élasticité dynamique** et à la **masse volumique**. Cette vitesse est d'autant plus élevée que le béton a un module d'élasticité plus important, donc à priori une résistance plus importante. **Le module d'élasticité dynamique (E) a été estimé à partir de coefficient de poisson (ν) et des mesures de la vitesse de l'onde longitudinale (V_L) et de la densité volumique (ρ) à partir de la relation :**

$$v_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

$$\nu = 0,2 \text{ (coefficient de Poisson)}$$

V_T : vitesse de l'onde transversale ; V_R : vitesse de l'onde de surface.

$$\frac{v_T}{v_L} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}}$$

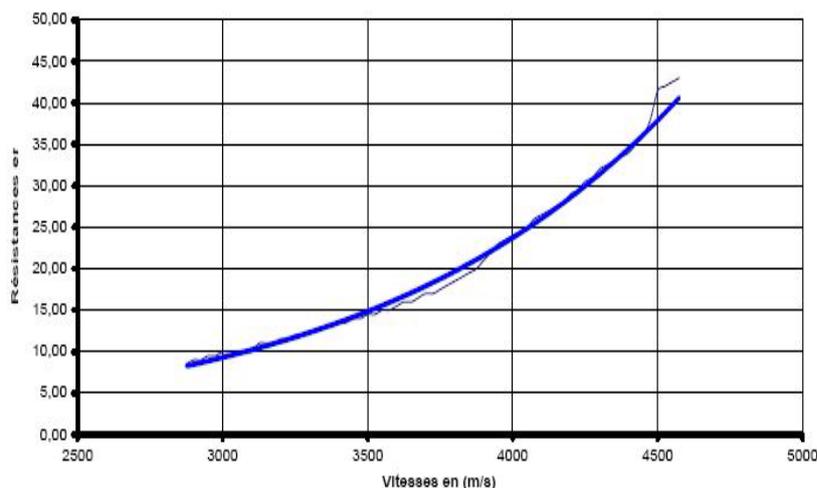
$$v_R = \sqrt{\frac{0.87 + 1.12\nu}{1+\nu}} v_T$$

Cette relation donne une base logique pour utiliser des mesures de vitesse des ondes pour estimer la résistance à la compression du béton. ***Mais il faut mentionner qu'il n'y a pas de relation physique unique entre les deux paramètres*** compte tenu de l'influence des différents constituants entrant dans la composition du béton.

Les résultats obtenus en appliquant la courbe de la **RILEM** (voir figure) sont donnés dans le cas où le béton testé est considéré connue. Les résistances ne correspondent pas toujours à la résistance réelle du béton in situ. C'est pour cette raison que par exemple dans les procès verbaux du CNERIB, seuls les appréciations suivantes sont données :

- Classements qualitatifs

- ✓ $2500 \text{ m/s} \leq V < 3200 \text{ m/s}$ béton de faible résistance ;
- ✓ $3200 \text{ m/s} \leq V < 3700 \text{ m/s}$ béton de moyenne résistance ;
- ✓ $3700 \text{ m/s} \leq V < 4200 \text{ m/s}$ béton à haute résistance ;
- ✓ $V \geq 4200 \text{ m/s}$ béton à très haute résistance.



Estimation de la résistance du béton selon RILEM

- L'expression proposée par (D. Boukhelkhal & S. Kenai, 2015) à cette corrélation est une relation de forme exponentielle présentée par l'équation :

$$R = 0,342 \exp(1,004 V)$$

Avec R en MPa et V en km/s.

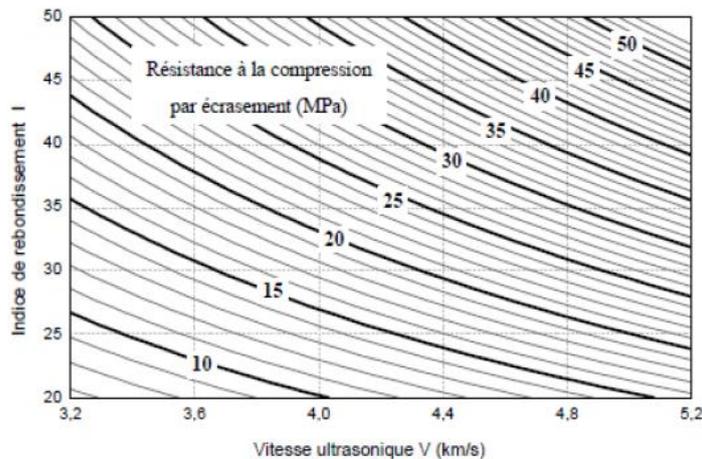
Avec : un coefficient de corrélation $r^2 = 0,926$ et une erreur type $s = 4,063 \text{ Mpa}$.

II.4.2.6. Avantages

- ✚ Les ultrasons sont une méthode simple et relativement peu coûteuse pour déterminer l'homogénéité d'un béton.
- ✚ L'essai peut être utilisé également sur les ouvrages complétés que sur ceux en construction.
- ✚ La mesure des ondes sonores présente l'énorme avantage de donner des informations sur l'intérieur d'un élément de béton. L'essai de propagation des ultrasons peut être utilisé pour détecter la fissuration (*mais les fissures parallèles au déplacement de l'onde*), les vides détériorations dues au gel ou de feu et l'uniformité du béton dans des éléments semblables. L'essai de propagation des ultrasons peut être utilisé pour suivre les changements *microstructuraux* dans un élément par exemple à la suite de cycles répétés de gel dégel.
- ✚ L'essai peut aussi être utilisé pour évaluer la résistance du béton à très jeune âge, à partir de *trois heures et plus*, ce qui peut être intéressant dans le domaine de la préfabrication du béton ou comme outil de décision pour déterminer le moment adéquat des opérations de décoffrage.

II.4.3. Méthode combinée

La combinaison du scléromètre et d'auscultation dynamique résulte dans *l'amélioration de la précision* de l'estimation de la résistance à la compression du béton. Le principe de cette méthode consiste à déterminer la résistance en compression du béton à partir d'*abaque* donnant la résistance à la compression (R_C) du béton en fonction de la vitesse des ultrasons (V) et de l'indice sclérométrique (I). *Cette résistance est corrigée par des valeurs des coefficients d'influences des différents constituants et de leur nature. Ou bien à partir des formules d'estimation d'après les résultats des essais au laboratoire.*



Abaque permettant d'évaluer la résistance en compression d'un béton en combinant l'indice sclérométrique et la vitesse ultrasonique

L'expression analytique proposée par (*D. Boukhelkhal & S. Kenai, 2015*) à cette corrélation, en utilisant la régression multiple, est une fonction de forme puissance présentée par l'équation :

$$\mathbf{R = 0,013 \times V^{1,756} \times I^{1,401}} \quad \text{Avec : } \mathbf{R} \text{ en MPa et } \mathbf{V} \text{ en km/s.}$$

Avec : un coefficient de corrélation $r^2 = 0,970$ et une erreur type $s = 2,620$ Mpa.

II.4.3.1. Avantages

- ✚ L'utilisation combinée d'essais non destructifs garantit au résultat final obtenu une précision supérieure. Elle permet d'annuler des effets parasites. *Par exemple, lorsque des variations des propriétés du béton conduisent à des résultats contradictoires.*
- ✚ Cette technique est utilisée afin d'essayer d'augmenter la fiabilité des essais non destructifs en détectant la résistance du béton.
- ✚ Évaluer la qualité du béton in situ, avec un minimum de connaissance antérieure au sujet du béton examiner.
- ✚ Cette solution est particulièrement avantageuse lorsque la résistance en compression du béton conduit à des résultats contradictoires. *Par exemple, l'augmentation du taux d'humidité augmente la vitesse de son, mais diminue l'indice sclérométrique.*

Chap. 13. Réparation des structures en béton armé

1. Introduction

Les procédés de réparation d'un ouvrage ne viennent pas seulement ramener les sections d'origine de l'acier et du béton, mais aussi rétablir les caractéristiques mécaniques des différents éléments concernés. C'est-à-dire remettre la possibilité à la structure de reprendre au mieux les efforts qui lui sont appliqués.

2. Réparation des surfaces

2.1. Dégagement des armatures

La préparation des surfaces à réparer est très importante pour la longueur de vie des réparations. Il convient dans un premier temps de dégager toutes les zones de faible cohésion.

S'il y a corrosion des armatures, il est important de dégager les aciers corrodés pour arriver à une zone saine apparaisse ; plusieurs techniques sont valables pour vérifier qu'on atteint des zones sous corrosion (burinage, repiquage, bouchardage, jet d'eau, sablage).

Il faut ensuite nettoyer la surface du béton afin d'enlever toute trace de poussière et souillure. Si la perte de section de l'acier est très élevée, il est alors nécessaire de remplacer l'armature ; par scellement ou soudure.

Il est important qu'après cette opération, de respecter la section d'armatures (au moins égale à la section initiale), les longueurs d'ancrage et de recouvrement, et les armatures de couture.

Pour limiter les risques d'apparition de la corrosion, une protection immédiate des armatures, par un produit convenablement choisi, est nécessaire surtout si l'enrobage final ne pourra pas être de la même valeur prévue dans les règlements.

Il est possible, après cette étape, de commencer la réparation.

2.2. Le ragréage

Le ragréage est une méthode de réparation locale, *qui consiste à rétablir manuellement l'enrobage des armatures à l'aide d'un mortier de réparation* possédant des propriétés qu'on verra plus loin.

Afin de limiter la réapparition de corrosion dans les zones réparées on choisit de mélanger des inhibiteurs de corrosion dans la formulation de ce mortier.

a. Mode opératoire Selon « Weber » (une entreprise de solutions pour la construction et la rénovation)

- ✓ Humidifier abondamment les parties à réparer. Laisser ressuyer, le béton doit être humide mais non ruisselant
- ✓ Pour une bonne adhérence, appliquer le mortier en le serrant fortement sur tout le pourtour de la zone à réparer.
- ✓ L'application se fait par passes de couches successives qui varient d'épaisseurs selon les propriétés du produits choisit entre 2 et 100 mm (indiqués par le fournisseur)
- ✓ Dès raidissement du mortier, réaliser la finition à l'aide d'une taloche polystyrène ou d'une taloche éponge

b. Caractéristiques des matériaux

Le mortier utilisé doit avoir les caractéristiques suivantes :

- ✓ Tenue verticale sans coffrage
- ✓ Montée en résistance rapide et de résistance mécanique supérieure au béton support
- ✓ Adhérence supérieure ou égale à la cohésion du support
- ✓ Imperméabilité à l'eau et aux agents agressifs
- ✓ Coefficient de dilatation thermique et de module d'élasticité équivalente au béton support
- ✓ Bonne protection des aciers

Les produits doivent être conformes à la norme NF P 18-840 ou être admis à la marque « NF Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique ».

2.3. Tissus de fibres de carbone

Les matériaux composites constitués de fibres dans une résine polymère, également connu sous le nom de polymères renforcés de fibres (PRF), ont apparue comme une alternative aux matériaux et techniques traditionnelles.

Les PRF sont légers, non corrosif, et présentent une résistance élevée à la traction. L'intérêt de leur utilisation se trouve dans :

- ✓ Leur faible densité.
- ✓ Leurs propriétés mécaniques longitudinales.
- ✓ L'absence de corrosion.
- ✓ Leur bonne tenue à la fatigue.
- ✓ Leur facilité de manipulation, en outre, ces matériaux sont facilement disponibles sous plusieurs formes.

Les principaux inconvénients des PRF sont les suivants :

- ✓ Une anisotropie marquée.
- ✓ Un comportement fragile à la rupture.
- ✓ Un prix élevé comparé à l'acier.

Cette technique est intéressante dans le cas de perte de section d'acier importante, et quand la structure subit un ajout de charges par rapport à ce qu'elle peut supporter.

Cette méthode consiste à coller des bandes de toile de fibres de carbone aux surfaces déficientes.



Feuille de polymère renforcé de fibre de carbone.

2.4. D'autres types de réparation

- **Ancrage des armatures complémentaires :** Ancrage par recouvrement avec les armatures existantes.
- **Armatures supplémentaires en surépaisseur de poutre.**
- **Armatures complémentaires dans des poteaux ou voiles.**

Références bibliographiques

- Ahmed Merah « Pathologies des structures en génie civil » Département de génie civil, Faculté de génie civil et d'architecture, Université Amar Telidji Laghouat. Année universitaire 2017-2018. p. 88.
- Belazougui, M., Farsi, M.N. et Remas, A., "Zemmouri earthquake of 21st of May, 2003. Building damage assessment and causes", Colloque international, Risque, Vulnérabilité et Fiabilité dans la Construction, 11-12 Octobre 2003, Alger, Algérie.
- [Ministère de l'Habitat, "Règles parasismiques Algériennes RPA 99", document technique réglementaire D.T.R.–B.C.–2.48, Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique.
- Afra, H., "Performance parasismique des systèmes structurels durant le séisme de Zemmouri", Colloque international, Risque, Vulnérabilité et Fiabilité dans la Construction, 11-12 Octobre 2003, Alger, Algérie.
- AFPS, "Le séisme du 21 Mai 2003 en Algérie, Rapport préliminaire de la mission AFPS", Association Française de Génie Parasismique.
- Yelles-Chaouche, A.K., et Djellit, H., "Le séisme de Boumerdes (21 Mai 2003, Mw :6.8) ", Colloque international, Risque, Vulnérabilité et Fiabilité dans la Construction, 11-12 Octobre 2003, Alger, Algérie.
- Le diagnostic des ouvrages en génie civil ; Manuel pour ingénieurs civils, Programme d'impulsions PI-BAT – Entretien et rénovation des constructions Office fédéral des questions, Copyright © 1992 Office fédéral des questions conjoncturelles, 3003 Berne. «Construction et Energie», EPFL-LESO, Case postale 12 1015 Lausanne (N° de commande 724.431 f) conjoncturelles.
- BADREDDINE, DALAL. "Réhabilitation et Restauration Des Constructions Du Site Volubilis: Patrimoine Bâti, Diagnostic Des Pathologies Des Structures, Matériaux, Durabilité," 2016.
- "Réhabilitation et Restauration Des Constructions Du Site Volubilis: Patrimoine Bâti, Diagnostic Des Pathologies Des Structures, Matériaux, Durabilité," 2016.
- Bahar, R., and S. Kenai. "Désordres Dus À L'infiltration Des Eaux Cas de La Ville d'El-Affroun." *Revue Française de Géotechnique*, no. 101 (2002): 91–103.
- Barkat, Loubna. "La Pathologie Des Constructions Cause et Conséquence," n.d.
- Bartoli, Rémi. "Pathologie et Reprise En Sous-Oeuvre Par Puits Des Constructions Individuelles," 1999.
- BENDADOUCHE, H., and S. LAZIZI. "PATHOLOGIE DE DESORDRES EN INFRASTRUCTURE," n.d.
- "PATHOLOGIE DES GLISSEMENTS DE TERRAIN," n.d.
- BENHAMOU, Youcef, Mohammed AMEUR, Belkacem MEKERTA, Fatiha KAZI-AOUAL, Abdélaziz SEMCHA, and Abdelfeteh SADOK. "PATHOLOGIE DES SOLS DANS LA REGION DE SAIDA," n.d.
- Berger, Julien, Sihem Tasca-Guernouti, Monika Woloszyn, and Catherine Buhe. "L'HUMIDITÉ DANS LES BÂTIMENTS: PATHOLOGIES ET PARAMÈTRES GOUVERNANTS." In *Annales Du Bâtiment et Des Travaux Publics*, 55. Editions ESKA, 2012.
- BOUALLAGA, Ishak. "Pathologie et Qualité Du Béton Dans Des Régions de Blida." *Université Saad Dahlab de Blida 1*, n.d.
- Bouzabata, H., and H. Houari. "Pathologie Des Constructions Due À l'Alcali-Réaction En Algérie," n.d.
- Calgaro, Jean-Armand, and Roger Lacroix. "Pathologie et Évaluation Des Ponts Existants." *Les Techniques de L'ingénieur C 4* (1999): 502.
- Courard, Luc. "Constructions: Matériaux et Pathologies," 2011.
- "Pathologies Des Bétons: Causes et Effets." *Evaluation Des Structures En Béton*, 2014.
- DAHAN, Paul. "Pathologie de L'humidité. Paroi Simple : Phénomène de Condensation." *Techniques de L'ingénieur. Construction*, no. C7130 (2008).
- "Pathologie de L'humidité. Parois Revêtues En Bâtiment : Isolation Thermique." *Techniques de L'ingénieur. Construction*, no. C7142 (2008).
- DEMAGH, K., and H. CHABIL. "QUELQUES CAS DE PATHOLOGIE RELEVES LORS DU SEISME DU 21 MAI 2003 A BOUMERDES," n.d.
- Ducreux, Georges Henri. "Effets de La Sécheresse 1989-1990 Sur Les Bâtiments Dans Les Alpes de Haute-Provence." *Science et Changements Planétaires/Sécheresse 2*, no. 4 (1991): 265–270.

- DUPLAN, Julian. "Étude de La Distribution Du Renforcement Des Structures En Maçonnerie Par Fibres de Carbone, En Utilisant L'optimisation Topologique." INSA de Strasbourg, 2010.
- Grimal, Etienne. "Caractérisation Des Effets Du Gonflement Provoqué Par La Réaction Alkali-Silice Sur Le Comportement Mécanique D'une Structure En Béton." Toulouse 3, 2007.
- Hammadouche, Selma. "Considérations Occlusales Des Constructions Prothétiques En L'absence de Pathologie Neuro-Musculo-Articulaire," 2013.
- Hocine, CHABIL. "Pathologie Du Batiment Des Constructions Sous Les Effets Du Séisme : Remèdes et Préventions." Université Frères Mentouri de Constantine 1, n.d.
- Jacquard, C. "Pathologie Des Fondations Superficielles Sur Sols Argileux Retour D'expérience En Midi-Pyrénées." *Revue Française de Géotechnique*, no. 120–121 (2007): 155–164.
- Lossier, Henry. *La Pathologie Du Béton Armé*. Dunod, 1952.
- Mamillan, Marc. "Pathologie et Restauration Des Constructions En Pierre: I Généralités Sur Les Roches et Leur Emploi, II Pathologie Des Constructions En Pierre," 1972.
- "Pathologie et Restauration Des Constructions En Pierre: I Généralités Sur Les Roches et Leur Emploi, II Pathologie Des Constructions En Pierre," 1972.
- MANI, Moussa. "LES PATHOLOGIES DES CONSTRUCTIONS CAUSES ET CONCEQUENSES," n.d.
- MAYÈRE, Jacques. *Constructions Matérielles: Pathologie Des Structures Métalliques*. Ed. Techniques Ingénieur, 1992.
- Mommer, P., E. Dondonne, and P. Demars. "Dégradation Des Dalles de Tablier de Ponts En Région Wallonne. Etude D'une Pathologie Complexe." *Revue Scientifique Des ISILF* 18 (2004).
- Pasquier, jy. "sols expansifs-pathologie des fondations." in *symposium international de mecanique des sols de tiaret du 03 au 07 juin 1989*, vol. 2, 1989.
- Plumier, André. "Pathologies et Réparations Structurales Des Constructions," 2011.
- Varum, Humberto, A. Costa, D. Silveira, H. Pereira, J. Almeida, and Tiago Martins. "Structural Behaviour Assessment and Material Characterization of Traditional Adobe Constructions," 2007.
- Zoubir, DERRADJ. "Pathologie Des Constructions: Entre Diagnostic et Traitement," n.d. "chap6_maconnerie.pdf." Accessed September 30, 2017. https://ft.univ-tlemcen.dz/assets/uploads/pdf/departement/gc/chap6_maconnerie.pdf.
- "Diagnosis of Deterioration in Concrete Structures - Recherche Google." Accessed September 30, 2017. <https://www.google.dz/search?q=diagnosis+of+deterioration+in+concrete+structures&oq=d&aqs=chrome..69i57j35i39j69i60j69i61j35i39j0.2453j0j8&sourceid=chrome&ie=UTF-8>.
- "Le Diagnostic Des Ouvrages En Génie Civil - Recherche Google." Accessed September 30, 2017. <https://www.google.dz/search?q=le+diagnostic+des+ouvrages+en+g%C3%A9nie+civil&oq=le+diagnostic+des+ouvrages+en+g%C3%A9nie+civil&aqs=chrome..69i57.3461j0j8&sourceid=chrome&ie=UTF-8>.
- "Les Differentes Origines Des Pathologies Du Bâtiment - Recherche Google." Accessed September 30, 2017. <https://www.google.dz/search?q=les+differentes+origines+des+pathologies+du+b%C3%A2timent&sa=X&ved=0ahUKEwj1orx0M3WAhUFPhQKHUMfDKQQ1QIIZigE&biw=1366&bih=662>.
- "Methodes de Réparation et de Protection Des Ouvrages En Béton - Recherche Google." Accessed October 7, 2017. https://www.google.dz/search?q=methodes+de+r%C3%A9paration+et+de+protection+des+ouvrages+en+b%C3%A9ton&oq=methodes+de+reparation+et+de+protectio&gs_l=psy-ab..1.0.33i22i29i30k112.16626.72471.0.75512.66.58.8.0.0.0.311.10522.0j52j5j1.58.0....0...1.1.64.psy-ab..0.55.9612...0j0i67k1j0i131k1j35i39k1j0i10i67k1j0i10k1j0i22i30k1j33i160k1j33i21k1.0.T-mUVq-xjgQ.
- "Pathologie Du Béton Armé Pdf - Recherche Google." Accessed September 30, 2017. https://www.google.dz/search?q=pathologie+du+b%C3%A9ton+arm%C3%A9+pdf&oq=pa&gs_l=psy-ab..1.0.35i39k112j0i67k112j0i131k112j0i131k1.261356.261943.0.265252.2.2.0.0.0.298.446.0j1j1.2.0.dummy_ma_ps_web_fallback...0...1.1.64.psy-ab..0.2.446...0.hjr8rfEG78c.
- "Sécurité Incendie et Constructions En Béton, Ir Jean-François Denoël.