

Septième édition des Journées scientifiques  
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton  
(RF)<sup>2</sup>B

---

Toulouse, France  
19-20 juin 2006

## **DURABILITE DES REPARATIONS DE BETON : ENTRE THEORIE ET PRATIQUE**

L. Courard

GEMME – Matériaux de Construction, Département de Géorressources, Géotechnologies et Matériaux de Construction, Université de Liège, Belgique.

**RÉSUMÉ** : Le béton est réputé durable. L'expérience de cette durabilité est toutefois fort limitée en termes d'échelle temporelle : nombreux sont les facteurs – internes et externes - qui peuvent amener une dégradation parfois très rapide du matériau. Fort heureusement, ces dégradations n'ont que très peu souvent d'effet irrémédiable sur le comportement structurel de l'ouvrage en béton.

Les réparations permettent en général de prolonger la durée de vie des structures, en réhabilitant le comportement du matériau : l'adhérence du système de protection ou de réparation constitue dans ce cas une condition nécessaire mais pas toujours suffisante. Définir les conditions d' « appétence » est la première étape du processus : quelles sont les conditions minimales à rencontrer pour que les matériaux « adhèrent », dans un environnement donné ? Ces conditions sont-elles suffisantes pour garantir la durabilité des réparations ? De plus, l'évaluation de l'adhérence pose problème en soi : traction, cisaillement, torsion sont autant de sollicitations censées représenter le comportement réel d'une interface : quel type d'essai employer ? Comment allier facilité et efficacité ? Laboratoire et chantier ?

### **1. ADHESION, ADHERENCE ET APPETENCE**

La rénovation des bâtiments ou ouvrages du génie civil est une science : de la même manière que le médecin pose son diagnostic pour prescrire les remèdes, l'ingénieur investigate le béton à réparer afin de sélectionner le produit de réparation le mieux adapté. Mieux encore, à côté de ces médications, il convient de tenir compte de l'environnement dans lequel la remédiation se passera. Plus que de l'imposer comme pourrait le faire un médecin, l'ingénieur devra l'intégrer dans ses critères de sélection : il subit l'environnement plus qu'il ne le maîtrise (Courard, 2000). L'opération passe par un premier stage fondamental : la connaissance du support sur lequel sera appliqué le produit de réparation. Deux étapes sont généralement désignées afin de mener à bien l'étape de l'auscultation: la première nécessite un rapide survol de l'ensemble de la structure, incluant un échantillonnage limité et permettant la définition de zones pour lesquelles des investigations plus détaillées sont nécessaires. La seconde requiert l'emploi

de méthodes destructives et non destructives, appliquées sur des parties limitées de la structure. Les méthodes non destructives (NDT en anglais) sont de plus en plus largement répandues, non seulement pour l'analyse des matériaux mais aussi pour le suivi en continu des structures (Garbacz et al., 1999). En complément des analyses physiques et chimiques plus classiques, elles permettent d'évaluer la résistance du béton et de détecter la présence de défauts à profondeurs plus ou moins importantes. Que ce soit l'état de carbonatation du béton ou sa cohésion superficielle, la présence de chlorures ou la détection de vides de compactage, la propreté ou la rugosité de la surface, il est important de maîtriser les techniques et d'être capable d'interpréter les résultats des analyses. Il va sans dire que la compétence reste, dans ce domaine comme dans bien d'autres, un gage de réussite et d'efficacité.

Ensuite, il convient de procéder à la sélection du système de réparation. C'est le sens commun que d'affirmer que, sans adhérence, la réparation des ouvrages en béton n'est pas possible (Cleland et al., 1986 et Silwerbrandt et al., 1998) . Que ce soit au niveau de l'injection de fissures, de la réparation de l'épaufrage et de la désagrégation ou encore du renforcement des structures par collage de plats métalliques, c'est l'adhésion qui va influencer la qualité du travail et la résistance des joints créés.

La théorie de l'adhésion (Figure 1) en tant que telle repose sur des piliers plus vastes, classés généralement en deux catégories principales (Kinloch, 1987), respectivement l'adhésion mécanique, liée principalement à la rugosité macroscopique et ce qu'il est convenu d'appeler l'adhésion spécifique, interprétée en termes de liaisons chimiques (quand elles existent), d'approche thermodynamique et de forces intermoléculaires (c'est dans cette catégorie que l'on retrouve les forces "électriques").

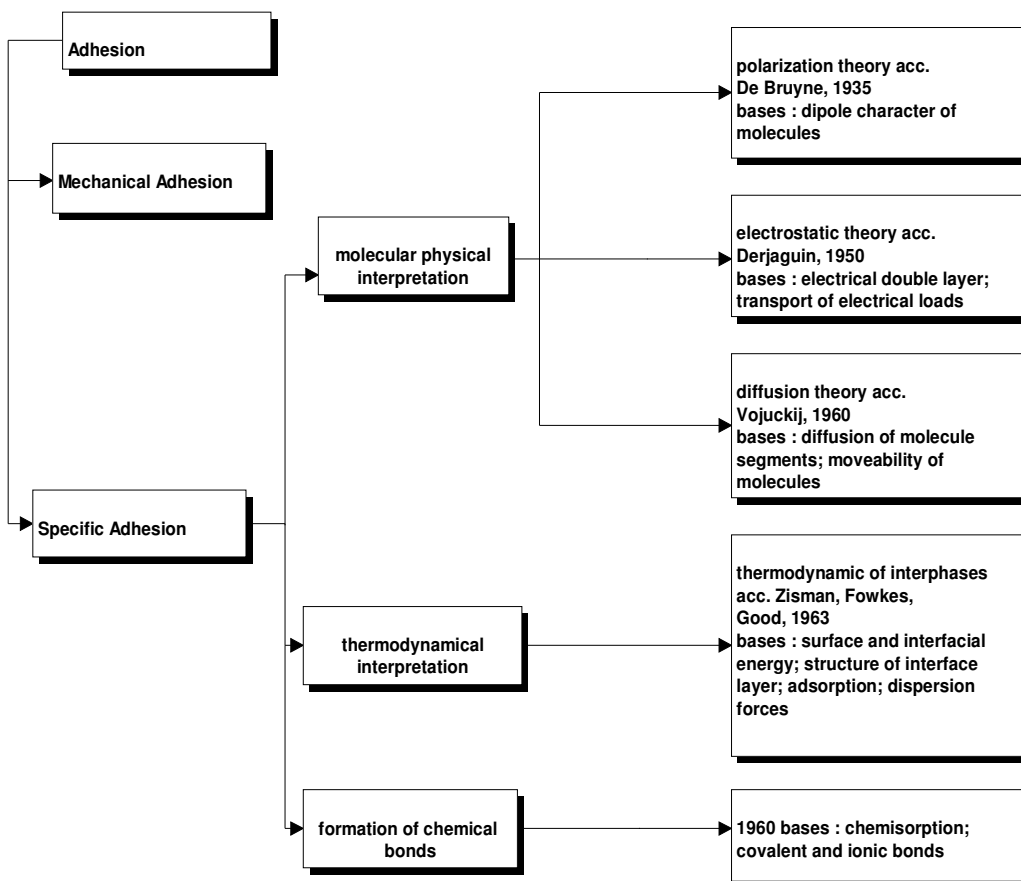


Figure 1 : théories et bases de l'adhésion

Dès à présent, il convient de mettre en évidence la dualité de l'approche du phénomène, que l'on retrouve par ailleurs dans la définition du terme adhésion (Derjaguin et al., 1978): *d'un côté, on comprend le mot comme étant un processus au travers duquel deux corps sont mis en présence et attachés (liés) l'un à l'autre, de telle sorte qu'une force extérieure ou un mouvement d'origine thermique est nécessaire pour rompre le lien. C'est cette acception qui est utilisée en théorie colloïdale lorsque l'on parle de phénomènes de coagulation. D'autre part, on peut examiner le processus de rupture d'un lien entre des corps qui sont déjà en contact : la force ou l'énergie nécessaire pour séparer les corps peut être interprétée comme une mesure quantitative de l'intensité de l'adhésion.*

L'adhésion présente donc deux aspects, suivant que l'on s'intéresse aux conditions et à la cinétique de formation du lien entre les corps en présence ou au processus de séparation. La première approche est évidemment la plus passionnante et intéressante même si, bien entendu, il est nécessaire de caractériser quantitativement le niveau d'adhésion par une mesure d'adhérence. Il est clair également que, chronologiquement, c'est le premier aspect qui préside à la création de l'interface.

Si deux corps, en l'occurrence un support en béton et une couche d'apport, sont capables de s'associer et de s'assembler, c'est parce que des liens se créent : au sens thermodynamique du terme, on peut dire que le travail d'adhésion est plus important que le travail de cohésion dans le matériau de réparation, c'est-à-dire que l'attraction est plus forte que la répulsion.

Si ces liens se créent, c'est qu'il y a une attirance potentielle et réciproque entre les deux corps. La transposition physiologique ou psychologique de ce phénomène pourrait nous faire dire que nous sommes ici devant un cas d'*appétence* (Courard et al., 1998).

L'*appétence*<sup>1</sup> est le désir instinctif ou la tendance qui porte<sup>2</sup> vers tout ce qui est propre à satisfaire un besoin ou un penchant naturels (LAROUSSE du XXe siècle, 1928 et ROBERT, 1977). Pour continuer dans le même ordre d'idées, l'appétence est donc la manifestation d'un ensemble de stimuli et de réponses qui influencent l'établissement des relations qui vont se créer.

Dans notre cas, ce terme englobe l'ensemble des propriétés physiques, chimiques et mécaniques du support, de la couche d'apport et de l'environnement, qui vont influencer une manifestation macroscopique de cette attirance, à savoir l'adhérence.

De l'appétence à l'adhérence, il existerait donc une relation de cause à effet : c'est parce qu'il y a une réactivité potentielle des corps mis en présence que l'on va pouvoir mesurer une adhérence significative par un essai de traction ou de traction-cisaillement. Toutefois, si nous pouvons mettre en évidence la cause et l'effet, il y a encore une étape intermédiaire et fondamentale à investiguer : quels sont réellement les liens qui se créent au niveau atomique, moléculaire ? Quelles sont les forces d'attraction-répulsion qui entrent en jeu et quelle est leur intensité ? Quelle est la cinétique du phénomène de mise en contact et quelle est son influence sur l'adhésion ? La notion d'*adhésion* englobe ces phénomènes que nous pourrions qualifier de "microscopiques" : sans appétence, il n'y a pas d'adhésion; sans adhésion, il n'y a forcément pas d'adhérence.

L'adhésion est donc un reflet du travail qu'il faut fournir pour séparer le substrat de la couche d'apport et dépend des propriétés thermodynamiques des matériaux durcis; l'appétence étudie plutôt l'ensemble des propriétés pour que le joint se crée dans les meilleures conditions, et notamment, les propriétés thermodynamiques du liquide (adhésif) appliqué sur le support.

## 2. ASPECTS THERMODYNAMIQUES

La thermodynamique a pour buts l'étude et la discussion de systèmes physiques et chimiques contenant un très grand nombre de particules, atomes ou molécules. L'étude de tout phénomène doit commencer par la séparation dans notre esprit d'une certaine région de l'espace ou d'une portion de matière, constituant le système étudié, d'une part, et de tout ce qui l'entoure et forme son environnement, d'autre part (Michel et al., 2003). Ces considérations nous amènent à définir le système qui nous occupe, à savoir l'interface. L'interface est la frontière, la zone de transition entre deux phases  $\alpha$  et  $\beta$  homogènes

<sup>1</sup> du latin *appetentia*; de *appetere*, désirer

<sup>2</sup> l'appétence est donc bien un phénomène de transport

(Figure 2). Cette zone de transition est-elle un plan ou s'étend-elle sur une profondeur importante ? Plus qu'un plan, elle constitue en fait une zone où s'exercent des forces à très court rayon d'attraction.

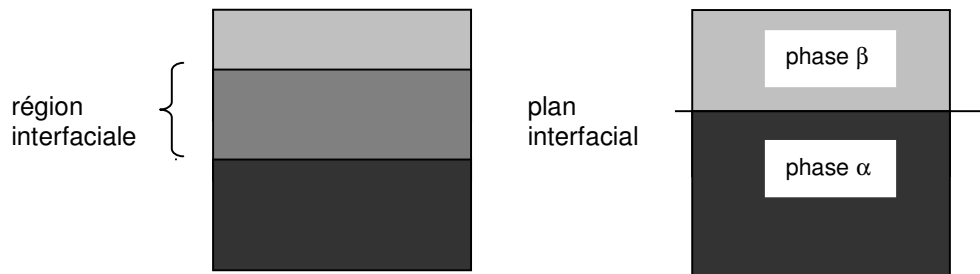


Figure 2 : interface entre un liquide ( $\alpha$ ) et sa vapeur ( $\beta$ ) ou un solide et un liquide.

Il « suffit » donc de sélectionner les couples de produits qui « s'attirent » : sachant qu'un des produits est le béton à réparer, il convient de sélectionner le deuxième de façon à maximiser le travail d'adhésion ou de minimiser l'énergie interfaciale. Ce calcul peut être réalisé sur base de la détermination des énergies libres de surface des solides et liquides qui interviennent dans la création de l'interface. Plusieurs facteurs conditionnent la qualité des informations qui peuvent en être retirées : la rugosité, l'hétérogénéité chimique et la porosité du support, la stabilité chimique et physique de la phase liquide, la température et le temps.

De plus, il arrive régulièrement que le nombre de phases en présence ne soit pas deux mais trois (Figure 3) : l'eau peut venir perturber le difficile équilibre créé et empêcher le contact entre support et système de réparation (Courard et al., 1995).

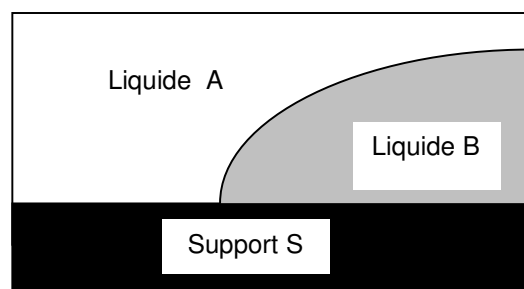


Figure 3 : mouillage d'un solide par deux liquides non miscibles (ici mouillage favorable au liquide B)

D'un point de vue strictement théorique, il s'agit d'une simple généralisation des lois de YOUNG et DUPRE, dans le cas d'une interface liquide-liquide et non plus liquide-air. L'angle de contact traduit, dans ce cas, la compétition entre les deux liquides pour la conquête de la surface solide. Que devient alors la condition d'étalement du liquide à la surface solide ? On peut montrer que le liquide qui a la plus forte tension d'adhésion a tendance à chasser l'autre de la surface (Courard, 2000).

Tableau 1 : détermination du travail d'adhésion  $W_A$  et du travail d'adhésion en présence d'eau  $W_{AL}$

Interface	$W_A$	$W_{AL}$
Mortier / béton	87,8	sans objet
Résine acrylique / béton	74,1	22,7
Résine acrylique / résine acrylique	80,4	53,66
Résine époxy / béton	79,6	21,80
Résine époxy / époxy	92,4	53,00

Nous avons à comparer ici la tension d'adhésion de l'eau et celle de mortiers hydrauliques ou de produits synthétiques qui modifient les pâtes de ciment : c'est dans ce dernier cas en particulier que se posent des

problèmes, dans la mesure où les résines synthétiques couramment utilisées (époxy, métacrylates, acryliques, ...etc) présentent de faibles tensions de surface. Le tableau 1 illustre le calcul du travail d'adhésion à partir des valeurs sur matériaux divers (résine époxy, résine polyméthylméthacrylate) sur un support en béton. On observe que le travail d'adhésion chute fortement dans le cas de la présence d'eau pour les résines acrylique et époxy, alors qu'il ne change pas dans le cas des mortiers hydrauliques, ce qui est bien entendu logique mais fort important à mentionner.

### 3. EFFETS D'INTERPENETRATION MECANIQUE

La préparation de surface a pour buts essentiels d'éliminer les parties de béton contaminées ou peu cohésives, et de promouvoir l'accrochage du nouveau béton, par effet d'interpénétration mécanique (Cleland et al., 1992 et Fiebrich et al., 1994)). Le choix de la méthode de préparation a des conséquences directes sur la forme du profil obtenu (Courard et al., 2003) et, conséquemment, sur la facilité d'accrochage de la couche rapportée (Figure 4).

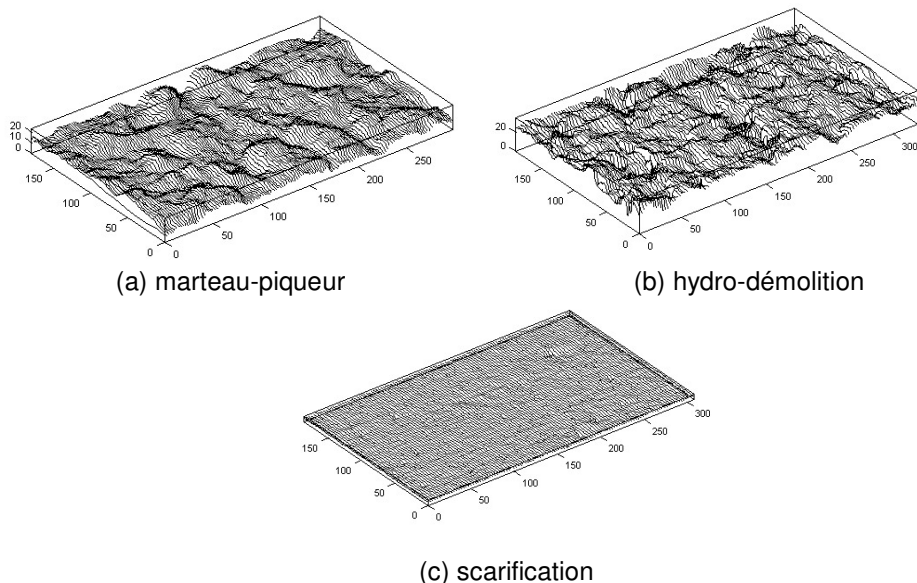


Figure 4 : vue 3D du support en béton après (a) marteau-piqueur, (b) hydro-démolition et (c) scarification

Des recherches sont actuellement en cours afin de définir exactement l'impact de la forme du profil sur la qualité de l'adhérence, mais aussi d'autres conséquences induites comme la cohésion de la couche superficielle. En effet, certaines techniques, outre le fait qu'elles augmentent la rugosité de surface, peuvent dégrader la couche superficielle en engendrant un réseau de fissures parallèles à la surface. Les figures 5 et 6 illustrent, par rapport à un support non traité (V), l'effet d'un traitement par polissage (P), sablage (SA), scarification (SC), hydro-démolition (H) et marteau piquage suivi d'un sablage (MPS) ; ce dernier traitement a été réalisé avec des marteaux de différentes masses, respectivement 7, 14 et 21 kg (Courard et al., 2005).

Les principaux enseignements tirés de ces observations indiquent clairement que le nombre (Figure 6) de fissures est de 2 à 4 fois plus grand pour la préparation au marteau-piqueur que pour les autres, tandis que la longueur totale (Figure 5) des fissures est beaucoup plus importante (4 à 25 fois). La masse de percussion utilisée est également significative : les dégâts sont plus conséquents pour la masse de 21 kg que pour les deux autres.

La scarification et le sablage ne semblent pas induire de dégradation majeure, tandis que l'hydro-démolition provoque une fissuration superficielle, moindre toutefois qu'avec le marteau-piqueur.

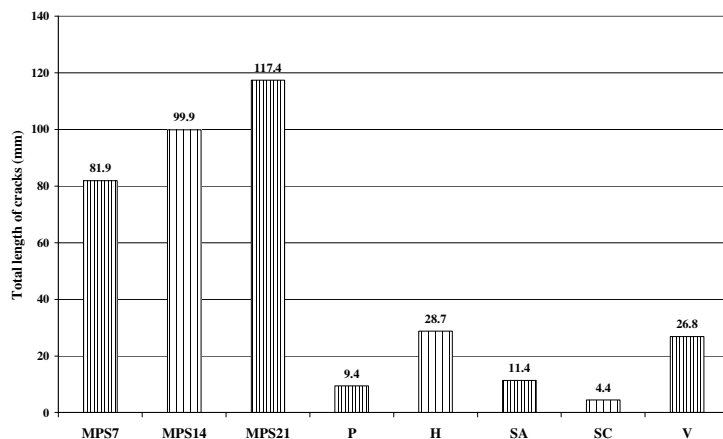


Figure 5 : longueur totale des fissures en fonction du type de préparation de surface

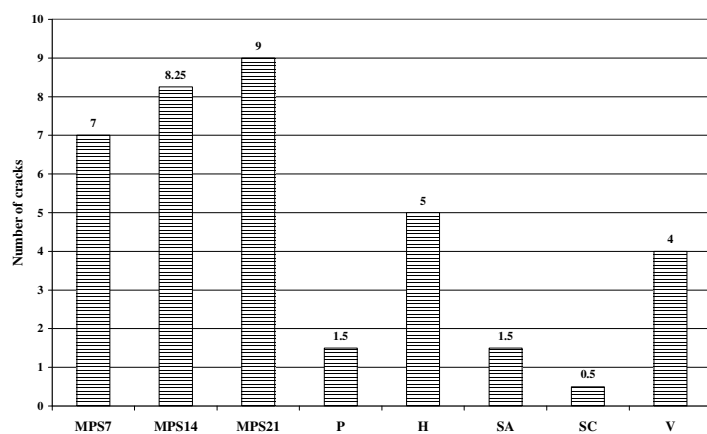


Figure 6 : nombre de fissures en fonction du type de préparation de surface

#### 4. ADHERENCE ET REALITE

Il est parfois difficile de déterminer avec exactitude la cause des dégradations et, a fortiori, les causes des dégradations des réparations. Une étude a été réalisée dans le cadre de REHABCON (Tilly, 2004) et a montré que plus de 75% des dégâts étaient causés par une conception incorrecte (32%), un mauvais diagnostic (12%), une mauvaise mise en oeuvre (16%) et le choix inadéquat du matériau de réparation (32%) (Figure 7).

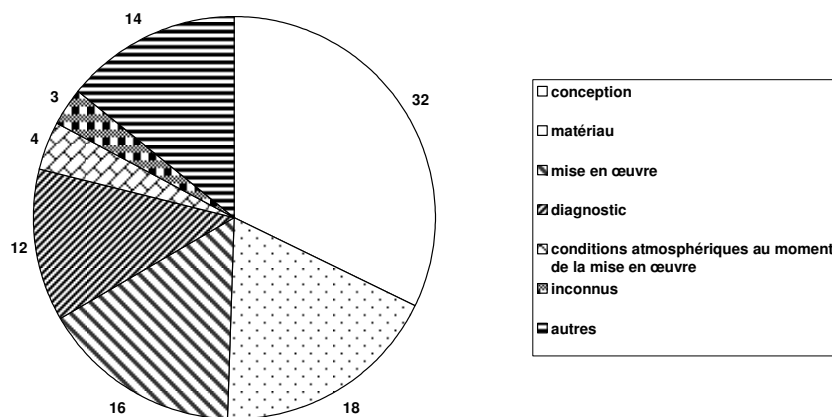


Figure 7 : causes des dégradations des réparations

La réalité de l'adhérence se mesure généralement sur base d'un essai d'adhérence en traction, parfois en torsion. C'est un essai par nature destructif, qui permet de mettre en évidence dans quelle mesure l'appétence entre produits s'est « transformée » ou non en adhérence. D'autre part, il est intéressant d'investiguer au microscope ce qui se passe réellement à l'interface : des observations systématiques ont été réalisées sur des interfaces béton/barbotines de ciment.

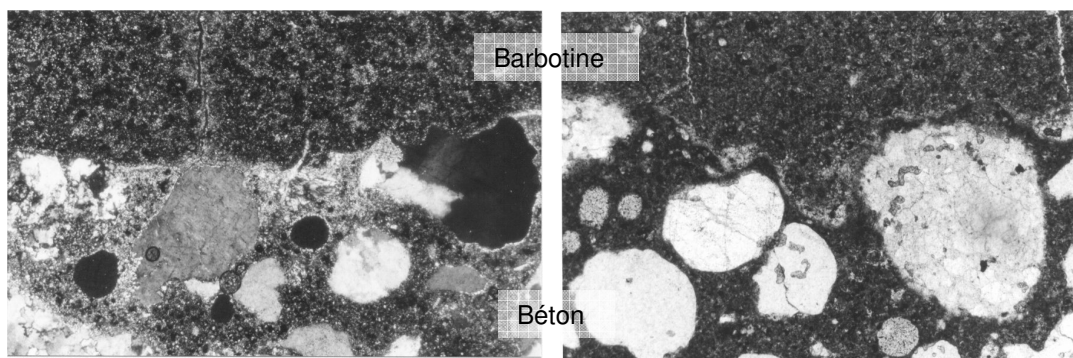


Photo 1 : support béton sablé saturé/barbotine

Photo 2 : support béton poli sec/barbotine

Des analyses sur lames minces au microscope, où la lumière blanche est remplacée par une source U.V., permettent de juger de la capillarité de la pâte de ciment du support, ainsi que de la barbotine. Une observation intéressante est relative à la présence sur un certain nombre de lames, d'un liseré de calcite  $\text{CaCO}_3$  à l'interface entre barbotine et pâte de ciment (Photos 1 et 2). L'observation de ce phénomène n'est pas systématique mais semble plutôt affecter les dalles de béton saturées que les dalles sèches. Un autre élément intéressant ressortant des observations sur lames minces est la présence à l'interface d'une zone de plus grande porosité, dans la barbotine et dont l'épaisseur peut varier de 10 et 100  $\mu\text{m}$  (Photo 3).

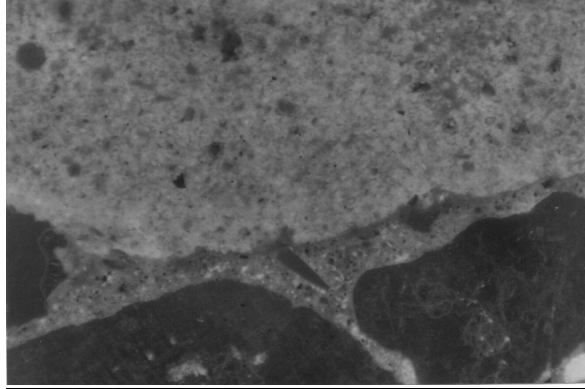


Photo 3 : zone interfaciale béton support poli sec/barbotine de ciment

La présence de cette zone résulte de mouvements d'eau à l'interface, qui peuvent être multiples :

- en cas de sursaturation du support en eau, il peut rester à la surface du béton un mince film d'eau qui, lorsque la barbotine est appliquée sur le support, provoque une augmentation du rapport E/C dans la zone de contact entre la barbotine et le film d'eau et, par voie de conséquence, amène une augmentation de la porosité interfaciale. Il est possible d'éviter ce phénomène en travaillant sur des supports saturés secs (SSS) mais l'eau peut rester bloquée dans les anfractuosités, ce qui est particulièrement vrai sur les dalles sablées;
- en cas de support sec, l'eau de la barbotine peut être absorbée rapidement (d'autant plus rapidement que l'on a affaire à un support poli) et provoquer une chute du rapport E/C. Ceci peut amener un manque d'eau à l'interface et une mauvaise hydratation du ciment.

Toutefois, l'observation des barbotines de ciment dans le cas des supports secs et saturés ne montre pas un degré d'hydratation différent et permet de conclure à une répartition homogène des grains de clinker non hydratés.

Si on compare les résultats mesurés en adhérence-traction avec ceux obtenus par support et par préparation de surface, on constate qu'il n'existe pas de règle générale quant à l'effet de cette zone interfaciale: tantôt les résultats sont supérieurs à la moyenne, tantôt ils sont inférieurs. Le type de rupture est variable, avec une prédominance de ruptures dans le béton (5 cas sur 6) dans le cas des supports polis secs. Cette zone interfaciale ne semble donc pas constituer une faiblesse dans le développement des capacités de résistance du composite. De plus, si on y regarde de plus près, on peut constater que cette zone se développe plutôt au droit de la pâte de ciment du support que de la partie granulats du support en béton, dans le cas où le support est sec tandis que la porosité de la zone interfaciale semble accentuée au droit des granulats lorsque le support est saturé. Ces observations sont bien entendu liées directement au pouvoir absorbant des deux éléments du composite.

Une analyse réalisée au microscope électronique à balayage a permis de mettre en évidence quelques différences entre supports saturés et secs. En effet, nous avons observé des échantillons de barbotine, côté face en contact avec le support : lorsque ce dernier est réputé sec, nous observons beaucoup plus de bulles d'air, essentiellement au niveau du contact barbotine/pâte de ciment (Photo 4). On distingue de ce fait assez nettement la limite des zones où la barbotine était en contact avec les granulats et avec la pâte de ciment.



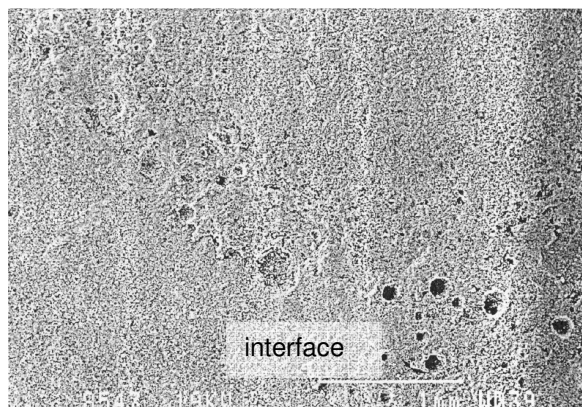


Photo 4 : vue de la barbotine de ciment – face inférieure en contact avec la dalle polie sèche

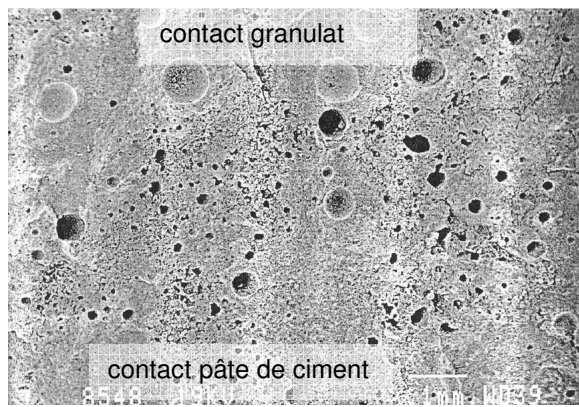


Photo 5 : vue de la barbotine de ciment – face inférieure en contact avec dalle sablée sèche

Cette observation est également valable pour les dalles polies et pour les dalles sablées. Néanmoins, on observe des bulles d'air aussi au niveau du contact granulat/barbotine dans le cas des dalles sablées, ce qui semble indiquer que les bulles sont piégées dans la rugosité (ondulation) du support. Ces bulles semblent être de dimensions importantes ( $\sim 500 \mu\text{m}$ ) et de profondeur plus faible que dans le cas des dalles polies.

Une vue plus rapprochée de la surface de la barbotine en contact avec les granulats nous a révélé que ces derniers étaient, dans 80 % des cas, recouverts de pellicule plus ou moins fine (Photo 7). Cette observation est particulièrement nette sur le granulat présent sur la Photo 5 : on distingue en effet des zones plus sombres où le granulat est presque à nu et des zones plus claires où il est recouvert d'un voile provenant de la barbotine. Une vue rapprochée (Photo 6) permet de distinguer clairement les deux zones, et en particulier le voile présent sur le granulat, invisible à l'œil nu.

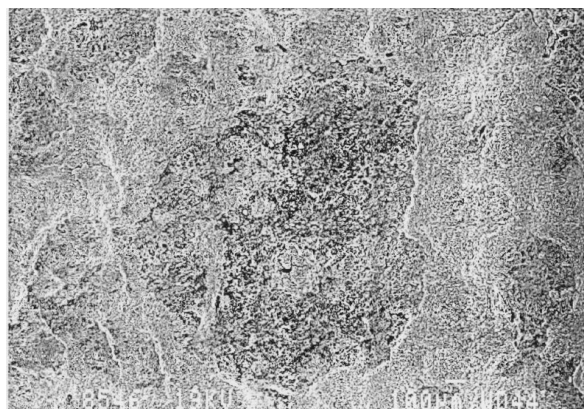


Photo 6 : vue d'une plage de la surface d'une dalle polie saturée recouverte de barbotine de ciment

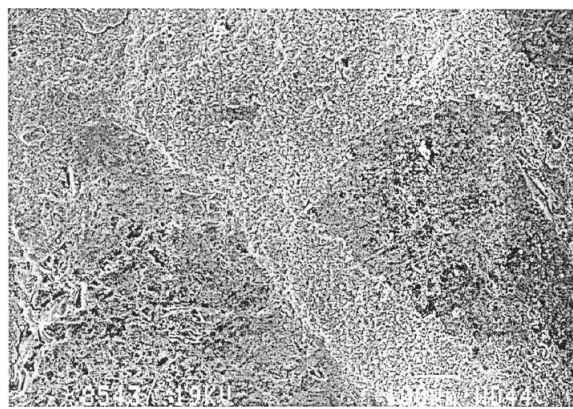


Photo 7 : vue d'un granulat à la surface d'une dalle polie saturée recouverte de barbotine de ciment

## 5. CONCLUSIONS

Les phénomènes se déroulant à l'interface entre le béton support et le nouveau béton sont complexes et dépendent d'un grand nombre de paramètres caractéristiques du support, de la couche d'apport mais aussi de l'environnement climatique, chimique ou humain. Se baser sur la notion d'appétence est un concept attrayant car il permet de formaliser un phénomène complexe d'interactions mécaniques et physico-chimiques entre solides et liquides : énergie libre de surface, rugosité, porosité, résistances, interpénétration mécanique et chimique, ..., tous ces facteurs agissent à un moment ou l'autre pour créer et assurer la stabilité de l'interface. Mais ces interactions solides/liquides se transforment peu à peu en

interactions solides/solides, à cause des réactions de prise et de durcissement des liants hydrauliques ou polymériques. Il est alors en quelque sorte trop tard pour améliorer les performances du nouveau composite ; c'est « avant » qu'il faut agir et, en ce sens, la compatibilité entre produits assemblés est une condition fondamentale de réussite, tout autant que les conditions dans lesquelles le « lien » sera créé.

Si la réparation des bétons peut être considérée comme une science, elle est loin d'être une science exacte : le nombre de facteurs qui interagissent est tel qu'il est encore difficile aujourd'hui de garantir la durabilité de la réparation. D'autant qu'un autre facteur tout à fait subjectif vient aussi interférer dans le process : le facteur humain.

## REFERENCES

- Cleland, D. J., Yeoh, K.M. and Long, A.E. (1992) The influence of surface Preparation Method on the Adhesion Strength of Patch Repairs for Concrete, *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Colloquium on Materials Science and Restoration*, Esslingen, Germany, pp 858-871.
- Cleland, D.J. and all. (1986) Bond strength of patch repair mortars for concrete, in *Proceedings ISAP 86 Adhesion between polymers and concrete*, (ed. H.R. Sasse), Chapman and Hall, London, pp. 235-244.
- Courard, L., Degeimbre, R., Darimont, A. and Wiertz, J. (1995) Influence of the operating conditions and humidity on adherence of repair mortars.. In: ICPIC, VIIIth International Congress on Polymers in Concrete (Ed. D. van Gemert, KULeuven en KVIV), Oostende, 585-590.
- Courard, L. and Darimont, A. (1998) Appetency and adhesion: analysis of the kinetics of contact between concrete and repairing mortars.. in: RILEM International Conference, Interfacial Transition Zone in Cementitious Composites (Eds A. Katz, A. Bentur, M. Alexander and G. Arliguie, E&FN Spon), Haïfa, Israël, 185-194.
- Courard, L. (2000) Parametric study for the creation of the interface between concrete and repair products", *Materials and Structures*, **33**, N° 225, pp. 65-72.
- Courard, L. and Nélis, M. (2003) Surface analysis of mineral substrates for repair works: roughness evaluation by profilometry and surfometry analysis, *Magazine of Concrete Research*, **55**(4) 355-366.
- Courard, L., Bissonnette, B. and Belair, N. (2005) Effect of surface preparation techniques on the cohesion of superficial concrete: comparison between jack-hammering and water-jetting. In: ICCRRR 2005 International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (Eds. H. Beushausen, F. Dehn and M.G. Alexander, 2006 Taylor & Francis Group, London), Cape Town, South Africa (21-23 Novembre 2005), 1027-1031.
- Derjagin, B.V., Krotova, N.A. and Smilga, V.P. (1978) "Adhesion of solids. Studies in soviet cience: physical sciences", Plenum Publishing Corporation, New York, 455 p.
- Fiebrich, M.H. (1994) "Influence of the surface roughness on the adhesion between concrete and gunite mortars overlays", *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Bolomey Workshop, Adherence of young and old Concrete*, Unterengstringen, Switzerland (Aedification Verlag ,Ed. F.Wittmann) 107-114.
- Garbacz, A., Czarnecki, L. and Clifton, J.R. (1999) "Non-destructive methods to assess adhesion between polymer composites and Portland cement concrete", *Proceedings of the Second International Rilem Symposium on Adhesion between Polymers and Concrete*, Dresden, Germany (ISAP'99,Ed. M. Puterman and Y. Ohama, Rilem Publications) 467-474.
- Kinloch, A.J. (1987). "Adhesion and adhesives: science and technology", (Chapman and Hall, London) 441 p.
- Michel, F. et Courard, L. (2003) Energies libres de surface des solides et liquides : une approche pour la compréhension des phénomènes interfaciaux. Journées scientifiques du Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation dans le domaine du béton, Sherbrooke (Québec), Canada (25-26 août 2003), 10p.
- Silfwerbrand, J. and Paulsson, J. (1998) "Better bonding of bridge deck overlays". *Concrete International* **20** (10) 56-61.