

# EXPOSÉ SUR LES TRAVAUX CONCERNANT LA RÉSISTANCE DES BÉTONS A L'EAU DE MER EFFECTUÉS PAR VICAT ET A L'ÉPOQUE ACTUELLE

par M. Ferdinand CAMPUS,  
*pro-recteur de l'Université de Liège*

---

L'insigne honneur d'être invité à prendre la parole au cours de cette cérémonie commémorative en hommage à Vicat a été accompagné d'un avantage encore plus grand, celui d'apprendre à le connaître mieux.

Certes, je connaissais depuis un demi-siècle le nom de Vicat, l'aiguille et l'indice d'hydraulicité. Mais c'était là le moins possible et le dictionnaire encyclopédique ne lui réserve que peu de lignes et ne rend pas justice à son œuvre.

Des circonstances particulières m'avaient cependant fait connaître de lui un travail presque ignoré et étranger à sa grande œuvre : la découverte du fluage des fils d'acier sous l'effet de charges permanentes. Au cours de mes travaux des dernières années sur le fluage et la relaxation des armatures de précontrainte, j'avais remarqué dans une publication banale une allusion assez inquiétante à une expérience attribuée à Vicat, mais sans référence définie. Il s'agissait d'une rupture différée d'un fil d'acier sous une charge permanente, qui se serait produite au bout de trois années sous une tension considérablement inférieure à la tension de rupture instantanée.

Après de longues recherches, je trouvai dans les *Annales des Ponts et Chaussées* de 1834, une « Note sur l'allongement progressif du fil

de fer soumis à diverses tensions » par laquelle Vicat a fait connaître les résultats de ses expériences commencées en 1830 et qui sont probablement les premières de cette nature.

Vicat indique que la rupture en question avait été engendrée par une corrosion locale. Il s'agissait donc de ce que l'on appelle actuellement une rupture par corrosion sous tension. Cette observation accidentelle constituait aussi une anticipation. Quant aux ruptures différées, Vicat n'en citait aucune en dehors de celle due à cette corrosion progressive. Je n'avais dès lors aucune raison de douter des résultats de mes propres expériences, qui établissaient la possibilité de ruptures différées après une durée d'une heure environ au maximum, sous des tensions inférieures de moins de 3,5 % environ à la tension de rupture instantanée.

Toutes les recherches de Vicat ont été les fruits d'observations attentives et de réflexions sagaces. Ses découvertes ont répondu à des intentions bien définies et à des desseins précis.

La personnalité de Vicat n'est pas sans analogie avec celle de sir Alexander Fleming que Maurois a si minutieusement analysée dans une biographie récente. Il était comme Fleming remarquablement préparé à ses découvertes, mais les hasards heureux n'y ont occupé aucune place.

Dans son « Premier discours aux hommes de lettres belges », du 30 juin 1933, Paul Claudel disait : « L'interrogation est le don socratique de poser des questions justes. Nous n'avons pas seulement à connaître la vérité mais à la provoquer. Toute question correctement posée sollicite une réponse. Le savant est un homme qui pose des questions justes ».

Tout semble avoir été pour Vicat sujet à des questions justes. Ses expériences presque oubliées, sommaires certes, mais fondamentales, sur le fluage des fils de fer ont été entreprises après qu'il a eu à s'occuper du pont suspendu d'Argentat sur la Dordogne (1828).

Commencées en 1830, ces expériences sont terminées en 1834. Entretemps, Vicat a publié dans les *Annales* un mémoire très remarquable « sur les phénomènes physiques qui précèdent et accompagnent la rupture d'une certaine classe de solides ». J'extrait ces lignes de la très belle « Notice sur la vie et les travaux de Monsieur Vicat, inspecteur général des Ponts et Chaussées », publiée en 1862 dans les *Annales*, par Monsieur l'inspecteur général Mary.

Vicat commence en ces termes sa note de 1834 : « Il n'est personne qui n'ait remarqué qu'une boule de poix résine soumise à une pression

graduée s'aplatit insensiblement, tandis qu'au contraire elle se brise en éclats si on la jette contre un corps dur.

La flexion des bois présente quelque chose d'analogue, car on obtient sans rupture, une flèche plus considérable en courbant lentement une verge qu'en procédant brusquement.

Tout porte donc à croire que la plupart des corps solides peuvent se prêter sans rupture à des changements de forme d'autant plus prononcés que l'action à laquelle ils sont soumis dure plus longtemps. Cette conjecture nous a donné l'idée de tendre divers brins d'un même fil de fer non recuit au quart, au tiers, au demi et aux trois-quarts de la force tirante dont ils sont capables quand on les essaie par les procédés ordinaires, et d'observer ensuite pendant longtemps le progrès des allongements. »

Peut-on trouver un esprit d'observation plus lucide, une déduction, une conception et une induction plus sagaces, un propos plus ferme et plus précis, une expression plus sobre et plus parfaite?

Ces expériences aboutirent à des résultats concluants dont Vicat comprend toute la signification, en avance certes sur son temps. Après une allusion à son Mémoire sur la résistance des solides publié dans les *Annales* en 1833 et présenté à l'examen de l'Académie des Sciences, Vicat conclut à la sécurité que les fils de fer confèrent aux ponts suspendus, par ce que l'on appelle actuellement l'adaptation plastique, et à leur supériorité sur les chaînes.

L'œuvre maîtresse de Vicat, ses recherches capitales sur les chaux hydrauliques artificielles m'étaient presque inconnues. L'honorable invitation de Monsieur le président Pierre Renaud, l'aimable intervention de Monsieur Henri Lafuma m'ont incité à m'en informer davantage. Plus encore que la notice biographique de Monsieur Mary, que j'ai recherchée et trouvée dans les *Annales* de 1862, la lecture du mémoire fondamental de Vicat : « Résumé des connaissances positives actuelles sur les matériaux propres à la fabrication des mortiers et ciments calcaires », paru en 1828, a été une révélation. Je possède cet ouvrage dans ma bibliothèque en édition originale depuis quelques années, mais je ne l'avais pas lu. Ainsi, les bibliophiles font de leurs livres des objets de collection, non de lecture.

J'y ai trouvé la relation de la découverte incontestable des chaux hydrauliques artificielles. J'y ai aussi trouvé que l'explication de cette découverte réside dans les facultés exceptionnelles de Vicat. Les voies suivies par son esprit sont exactement les mêmes que pour les expériences sur le fil de fer. La construction du pont de Souillac, dont il

fut chargé en 1812, précisa ses intentions et ses buts bien définis de recherches sur les causes du durcissement sous eau des chaux hydrauliques naturelles et des chaux additionnées de pouzzolanes. Ce résultat atteint, presque d'emblée et à l'encontre de toutes les idées en cours, il en déduit immédiatement la possibilité de la preuve par la calcination d'un mélange de calcaire et d'argile et la réussit. Il confirme ainsi la justesse de sa théorie et découvre du même coup les chaux hydrauliques artificielles.

Des voix autorisées vous ont exposé la signification de cette découverte et ses conséquences. Je me permettrai seulement d'ajouter que j'ai trouvé dans le « Résumé » des anticipations de toutes les connaissances actuelles sur les mortiers et les bétons, qu'il appelle les « agrégats ». Il remarque qu'il existe une proportion définie du mélange de chaux et de sable qui correspond à la résistance maximum du mortier. Cette proportion correspond à celle que R. Feret devait indiquer en 1892. Il constate aussi les inconvénients d'un excès et d'une insuffisance de sable, que le sable fin convient le mieux aux chaux très fines, le gros sable aux chaux plus grossières, enfin l'avantage dans certains cas d'un mélange de sable gros et fin, bref les règles classiques de la granulométrie énoncées formellement plus tard. Il remarque l'influence de la compacité sur la résistance et les inconvénients d'un excès d'eau et d'une consistance trop molle, courante à son époque.

Il est ainsi un précurseur des connaissances actuellement précisées sur les effets divers de l'eau en ce qui concerne la résistance des conglomerats hydrauliques, nécessaire à l'hydratation du liant et nuisible en excès restant libre. Le « Résumé » est en réalité un ouvrage développé et approfondi et l'on peut y glaner abondamment les remarques ingénieuses.

Vicat remarque la différence entre la silice soluble et le quartz insoluble, la supériorité de la silice réactive sur l'alumine. Il étudie l'action des acides et des solutions salines sur les liants et les sables, ainsi que sur les pouzzolanes. Il étudie la durabilité des conglomerats et en déduit des remarques tout à fait pertinentes sur la gélivité des bétons, en relation avec leur structure, notamment avec leur porosité. En ce domaine encore, il est un précurseur.

Ses études sur la gélivité l'ont conduit à imprégner à chaud des mortiers d'une solution de sulfate de soude, d'après une méthode du minéralogiste Brard. Il constate qu'il se produit dans les mortiers des phénomènes tout différents de ceux que Brard observe dans les pierres gélives, notamment une différence de cristallisation. « Plus de

doute, alors, que la lessive alcaline n'eût attaqué la chaux du mortier » écrit-il. Il ne pousse pas plus loin pour lors cette découverte, mais il y revient près de vingt ans plus tard et dans plusieurs ouvrages, dont le dernier, qui relate ses « Recherches sur les causes chimiques de la destruction des composés hydrauliques par l'eau de mer et sur les moyens d'apprécier leur résistance à cette action » (1858).

Je dois à l'obligeance de Monsieur H. Lafuma d'avoir pu prendre connaissance de ce livre magistral qui couronne l'œuvre de Vicat. Deux publications importantes l'avaient précédé, en 1845 et 1856. Leur lecture fait découvrir, à travers l'inlassable continuité des méthodes, les progrès constants de la recherche et des résultats.

Après les chaux hydrauliques artificielles et les pouzzolanes artificielles, c'est la découverte des chaux limites et des ciments artificiels. Par cette progression, Vicat arrive au problème majeur : la résistance des composés hydrauliques à l'action de l'eau de mer. C'est vraiment le sommet de son œuvre, l'apothéose d'une vie de découvertes qui approche de son terme.

Les organisateurs de cette cérémonie ont souhaité que je développe quelque peu ce point en rapport avec les expériences sur les effets de l'immersion de composés hydrauliques (mortiers et béton) à mi-marée dans l'avant-port d'Ostende, auxquelles j'ai eu l'occasion de procéder. Entreprises en 1934, elles seront terminées en 1964.

Ma conclusion est simple. Compte tenu des perfectionnements des liants hydrauliques depuis Vicat et des nouveaux matériaux hydrauliques trouvés depuis Vicat, tels les laitiers de haut fourneau basiques granulés et le ciment alumineux, compte tenu aussi des progrès des connaissances chimiques et physiques intimes des liants hydrauliques et des phénomènes qui s'y passent, toutes les expériences faites après lui, y compris les miennes, ont confirmé ses vues pour l'essentiel.

Il les exprime comme suit :

« Arrivé au terme de ces études préliminaires, nous en résumerons les principaux résultats comme il suit, à savoir :

1<sup>o</sup> Que les hydrosilicates d'alumine et de chaux, connus dans l'art de bâtir sous les noms de chaux hydrauliques, de ciments et de gangues à pouzzolanes, sont des combinaisons très faibles;

2<sup>o</sup> Que tous ces silicates sans exception, quels qu'en soit l'âge et la dureté, étant réduits en poudre aussi fine que le comportent les moyens mécaniques, et sous cette forme noyés dans une suffisante quantité

d'eau pure, y abandonnent, lorsqu'ils n'ont subi en aucune manière ou du moins, que très incomplètement l'action de l'acide carbonique, une notable quantité de chaux;

3<sup>o</sup> Que dans les mêmes circonstances, si l'on substitue à l'eau pure une dissolution de quatre parties de sulfate de magnésie anhydre dans mille parties d'eau pure, la plus grande partie et souvent la totalité de la chaux de ces silicates passe à l'état sulfaté, à moins qu'il ne s'y soit introduit de l'acide carbonique, dans lequel cas il reste en chaux carbonatée tout juste ce que cet acide est capable de neutraliser;

4<sup>o</sup> Que toutes les pouzzolanes volcaniques et artificielles connues et employées jusqu'à ce jour ont une capacité propre et différente pour la chaux, capacité bien moindre que ne le supposent les dosages habituels; que certaines pouzzolanes artificielles non encore employées en grand, peuvent faire exception à cette règle;

5<sup>o</sup> Qu'enfin, l'affinité de l'acide carbonique pour la chaux de ces divers silicates est si puissante, qu'à l'aide d'un certain degré d'humidité et lorsque son accès est possible, il finit toujours par la neutraliser en totalité, en laissant en dehors tous les autres principes qui, combinés entre eux, ne se trouvent plus alors qu'à l'état de mélange dans le tissu de la masse transformée. »

Ailleurs : « Si nous faisons remarquer . . . que les mortiers à la chaux de l'Ardèche, bien qu'attaquables parfois . . . , après deux ans d'immersion dans les dissolutions magnésiques du laboratoire, résistent néanmoins depuis plus de dix ans en mer libre de la Méditerranée;

Il suit de là qu'il n'y a pas nécessité d'une résistance indéfinie aux essais tels que nous les pratiquons dans le laboratoire, pour que les mortiers hydrauliques qui y sont soumis soient jugés capables de stabilité en mer libre;

Il est entendu cependant que l'on doit regarder comme une cause certaine d'insuffisance, pour une mer quelconque, en premier lieu, d'abord, un trop faible indice d'hydraulicité dans les chaux employées, et secondement, une proportion d'alumine excédant le cinquième de la totalité de l'argile hydraulique dans ces mêmes chaux. »

En 1856, il écrivait : « Les rapprochements que nous avons faits pour reconnaître s'il serait possible de conclure quelque chose de la composition en chaux et argile des diverses variétés de ciment du

commerce relativement à leur dureté finale comparée à leur stabilité en eau de mer, semblent indiquer :

1<sup>o</sup> Qu'il n'existe aucun rapport entre cette stabilité et la dureté;

2<sup>o</sup> Qu'indépendamment de la composition de l'argile en silice, alumine et magnésie, s'il y en a, la chance de stabilité est d'autant plus grande que la quantité de ces trois principes est plus près d'égaliser celle de la chaux dans le ciment, et qu'en prenant celle-ci pour l'unité, 0,80 devient la limite au-dessous de laquelle la dose d'argile (fer non compris) ne doit jamais se trouver. Il suit de là que les ciments chargés en chaux, quel qu'en soit le degré de cuisson, ne conviennent pas aux travaux à la mer. »

Vicat ne connaissait pas le sulfo-aluminate de calcium, découvert plus tard par Candlot, mais il écrit : « La transformation d'une partie de la chaux des bétons en gypse . . . », ce qui est exact dans l'action des sulfates de la mer sur les ciments.

On peut conclure avec lui : « Il résulte de l'exposé qui précède que tous les ciments actuellement dans le commerce sont loin d'offrir aux travaux sous-marins les mêmes garanties de durée, et que, si le laboratoire ne peut faire connaître ceux que la mer respecterait, grâce à ses incrustations conservatrices, quoique périssant dans les dissolutions magnésiques, il désigne toujours au contraire, sans équivoque et dans un temps très court, ceux qui n'ont pas besoin de ces moyens pour rester indestructibles. »

Au sujet de l'effet considérable de la compacité des composés hydrauliques sur leur résistance à la mer, Vicat écrit : « Si donc la cohésion qui résulte de la structure solide ou massive de ces composés ne pouvait atténuer ou paralyser d'aucune manière l'action des sels magnésiens, il faudrait désespérer à jamais de la stabilité ou durée en mer . . . de nos mortiers, ciments et gangues à pouzzolanes; heureusement qu'il n'en est pas toujours ainsi . . . ».

Plus loin : « On remarquera aussi . . . le fâcheux effet de l'introduction du sable dans les ciments gâchés . . . La ruine des échantillons à sable et ciment Portland a, en effet, devancé de beaucoup l'époque de l'apparition des premiers symptômes d'attaque sur le même ciment employé pur, et ces échantillons ont péri d'autant plus rapidement que le sable s'y est trouvé en plus forte dose. Or, le sable ne dénature pas le ciment, mais il oblige à y mettre plus d'eau, ce qui augmente la porosité et rend l'agrégat plus accessible à l'eau salée dans son tissu. . . »

Toujours est-il que la consistance du gâchage donnée à un ciment joue un rôle important dans sa tenue en eau de mer, et à ce point, que tel ciment qui y périt en quelques mois lorsqu'on l'emploie à consistance de coulis, peut résister très longtemps, et peut-être indéfiniment lorsqu'on le gâche avec le moins d'eau possible. »

Vicat comprend que la résistance des composés hydrauliques à l'eau de mer est conditionnée par la rapidité réciproque du durcissement et de la décomposition marine. Il écrit : « L'espèce d'engourdissement dans lequel les bétons nouvellement immergés paraissent plongés en hiver, en d'autres termes, la lenteur des progrès de la cohésion, à cette époque de l'année, semble devoir favoriser l'action saline, si cette action elle-même n'est pas proportionnellement affaiblie dans les basses températures... D'après cela, l'époque des grandes chaleurs serait très favorable aux bétonnements à la mer, et, jusqu'à un certain point, capable de modérer l'action saline en hâtant le jeu des affinités dans les gangues. »

Vicat se rend exactement compte que les essais de laboratoire n'ont qu'une signification relative. Il écrit : « ... on ne peut assimiler les effets de la mer libre à ceux qu'elle produit lorsqu'on l'enferme dans les cuves d'un laboratoire. En mer libre, les matériaux qui ont une tendance prononcée à incruster, à tapisser en quelque sorte les corps immergés, sont fournis à ces corps d'une manière continue et toujours avec la même abondance. Dans le laboratoire, l'eau de mer y fût-elle renouvelée tous les jours, n'apporte chaque fois qu'une très petite quantité de ces matériaux conservateurs, et dans cet intervalle les composés hydrauliques en expérience restent sous l'influence prépondérante des sels destructeurs... Quant aux composés ..., les essais du laboratoire ne peuvent que les classer par ordre de stabilité, attendu que l'eau de mer naturelle ou artificielle qu'on y emploie ne possède plus ..., cette espèce de vitalité qui produit les végétations sous-marines et les sécrétions d'origine animale dont elle enveloppe les corps immergés, quand elle agit dans toute sa liberté avec ses courants, son agitation et tous ses éléments hétérogènes, constants ou accidentels. La mer libre, seule, peut donc répondre aux questions de stabilité ou de non stabilité des composés dont il s'agit... »

Vicat n'ignore pas les effets des intempéries et du marnage, il écrit : « Des objections plus sérieuses naîtraient de considérations relatives aux effets fâcheux que pourraient produire ..., les gelées, les dessiccations et imbibitions alternatives à intervalles éloignés, et pouvant donner lieu à la décomposition physique des masses soumises à ces



changements de milieu. A cela nous répondrons que nous n'avons en vue, dans nos études, que le cas d'une immersion continue, ou seulement interrompue par le court intervalle de temps qui sépare deux marées consécutives ordinaires; car, pour tous les autres cas d'immersion et d'émergence à longs intervalles, nous ne voyons pas qu'on ait à s'en préoccuper, attendu que les maçonneries qui y sont exposées sont toujours ou peuvent toujours être défendues du contact de l'eau salée par des revêtements imperméables. »

Sauf sur ces derniers points, après vingt années, les résultats très nets des expériences d'immersion à mi-marée à Ostende confirment les conclusions principales de Vicat. En voici un très bref résumé. Les éprouvettes avaient toutes un mois d'âge lors de l'immersion. Les ciments portland, riches en chaux, même additionnés de trass, ne résistent pas à la mer sous forme de mortier. Les bétons très compacts confectionnés au moyen de ces ciments peuvent être lentement attaqués en surface, surtout aux arêtes et aux coins; ils résistent dans la masse. Les ciments à base de laitier de haut fourneau basique granulé, contenant le moins possible de chaux, et le ciment alumineux résistent en mortiers à 450 kilos de ciment et de préférence 600 kilos de ciment par mètre cube de sable. La compacité et l'imperméabilité superficielle des conglomérats sont essentielles : il faut éviter la pénétration de l'eau marine. L'étanchéité superficielle peut augmenter au cours des temps par carbonatation et par action biologique, pour autant que la surface ne soit pas attaquée. Le marnage, l'action des lames, les intempéries, notamment le gel, exercent certes des effets, d'autant plus que le ciment est plus vulnérable à la décomposition saline. L'immersion permanente est beaucoup moins sévère.

Si Vicat a posé des questions justes au sens de Paul Claudel, il a fait mieux encore : il a trouvé des réponses justes. L'on n'a pas cessé de bâtir sur ces fondations. Il ne disposait cependant ni des connaissances qui ont été accumulées depuis, ni des techniques perfectionnées si nombreuses actuellement. Mais toutes ses expériences étaient véritablement scientifiques. Car leurs résultats étaient toujours exprimés sous forme de mesures. Il avait aussi la grande aptitude à la patience du génie et il a été un savant totalement désintéressé, jusqu'à sacrifier ses intérêts matériels à ses recherches, dont il n'a tiré aucun profit.

Lors de la remise du prix de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale, qui récompensait ses travaux sur la résistance des composés hydrauliques à l'action de l'eau de mer dont j'ai donné un bref aperçu, l'illustre chimiste Dumas disait de Vicat : « La Société a cru,

en lui décernant le prix qu'elle accorde pour la première fois, en faire la récompense de ce rare assemblage du génie, de la vigueur morale, du désintéressement et de la vertu, qui font de Monsieur Vicat, un homme des temps antiques ».

Le baron Thenard, à la Chambre des pairs, disait : « Ce n'est pas seulement la France, c'est le monde entier qui doit être reconnaissant envers Monsieur Vicat ».

J'ai été prié de m'associer ce soir à l'hommage rendu à Vicat afin de lui conférer un caractère international.

Ma voix n'est pourtant pas assez puissante pour exprimer la reconnaissance du monde. Mais permettez-moi cependant de vouer à l'Europe le grand Français que vous commémorez ce soir. Il a commencé sa carrière d'ingénieur des Ponts et Chaussées dans le département des Apennins. Sa grande découverte est de 1812. En ce temps, la France était l'Europe et l'Europe était le monde.