

**Zeitschrift:** Bulletin du ciment  
**Herausgeber:** Service de Recherches et Conseils Techniques de l'Industrie Suisse du Ciment (TFB AG)  
**Band:** 60-61 (1992-1993)  
**Heft:** 21

**Artikel:** Réalcalinisation et extraction des chlorures électrochimiques  
**Autor:** Hermann, Kurt  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-146316>

### **Nutzungsbedingungen**

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

### **Conditions d'utilisation**

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

### **Terms of use**

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

**Download PDF:** 29.09.2025

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

# BULLETIN DU CIMENT

SEPTEMBRE 1993

61e ANNEE

NUMERO 21

---

## Réalcalinisation et extraction des chlorures électrochimiques

**Remise en état par procédés électrochimiques de constructions en béton armé carbonatées ou infestées par des chlorures.**

Les ouvrages en béton armé fortement chargés de ions de chlorure, mais ne présentant pas encore de gros dégâts (corrosion perforante et éclatements), peuvent être protégés durablement contre la corrosion par la protection cathodique [1, 2]. Il s'agit d'un procédé fondé sur des réactions électrochimiques, comme le sont aussi les deux procédés NCT mis au point par Norwegian Concrete Technologies A/S, d'Oslo. Ces procédés permettent respectivement l'extraction des ions de chlorure et la réalcalinisation du béton carbonaté. Depuis environ deux ans, ils sont également utilisés en Suisse. La réalcalinisation a été essayée en pratique pour la première fois en 1987, à Tromsø (Norvège).

### **Carbonatation et corrosion**

Le béton comprend toujours des pores, dans lesquels pénètrent des gaz et des liquides. Le bioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ , «gaz carbonique») contenu dans l'air réagit avec les produits d'hydratation du ciment des parois des pores, ainsi qu'avec l'hydroxyde de calcium fortement alcalin dissous dans l'eau des pores. Il se forme dans les deux cas du carbonate de calcium (calcaire), qui se dépose sur les parois des pores. Il en résulte généralement une augmentation de la résistance à la compression et une diminution du volume des pores du béton, deux effets tout à fait souhaitables. Mais en même temps, la valeur pH, initialement supérieure à 12,5, descend au-dessous de 9,5 (en cas de carbonatation totale).

2 Dans le béton, une mince couche d'oxydes de fer se forme spontanément à la surface de l'armature, qui protège contre la corrosion. Si par suite de carbonatation, la valeur pH descend au-dessous de 9,5 autour de l'armature, cette couche protectrice est détruite et, s'il y a suffisamment d'oxygène et d'humidité, la corrosion peut commencer son œuvre [1].

La formation de rouille s'accompagnant d'une importante augmentation de volume, il peut arriver que le béton éclate. Ces éclatements sont le plus souvent dus à un trop faible recouvrement de l'armature, car on n'observe que très rarement des profondeurs de carbonatation de plus de 30 mm [3].

### Réalcalinisation électrochimique

Pour la réalcalinisation électrochimique [4, 5] du béton carbonaté, on insère un treillis métallique dans une couche de pâte de papier appliquée à la surface du béton, laquelle sert à emmagasiner une solution molaire 1,0 de carbonate de sodium. Le treillis métallique et l'armature sont reliés à une source de courant continu (schéma 1). L'armature sert de cathode, et le treillis d'anode. Avec des tensions continues jusqu'à 40 V, on observe des densités de courant entre 0,5 et 1,0 A/m<sup>2</sup>.

Sous l'influence du courant électrique (électrolyse), il se forme à la surface de l'armature des ions hydroxyle, grâce auxquels la couche

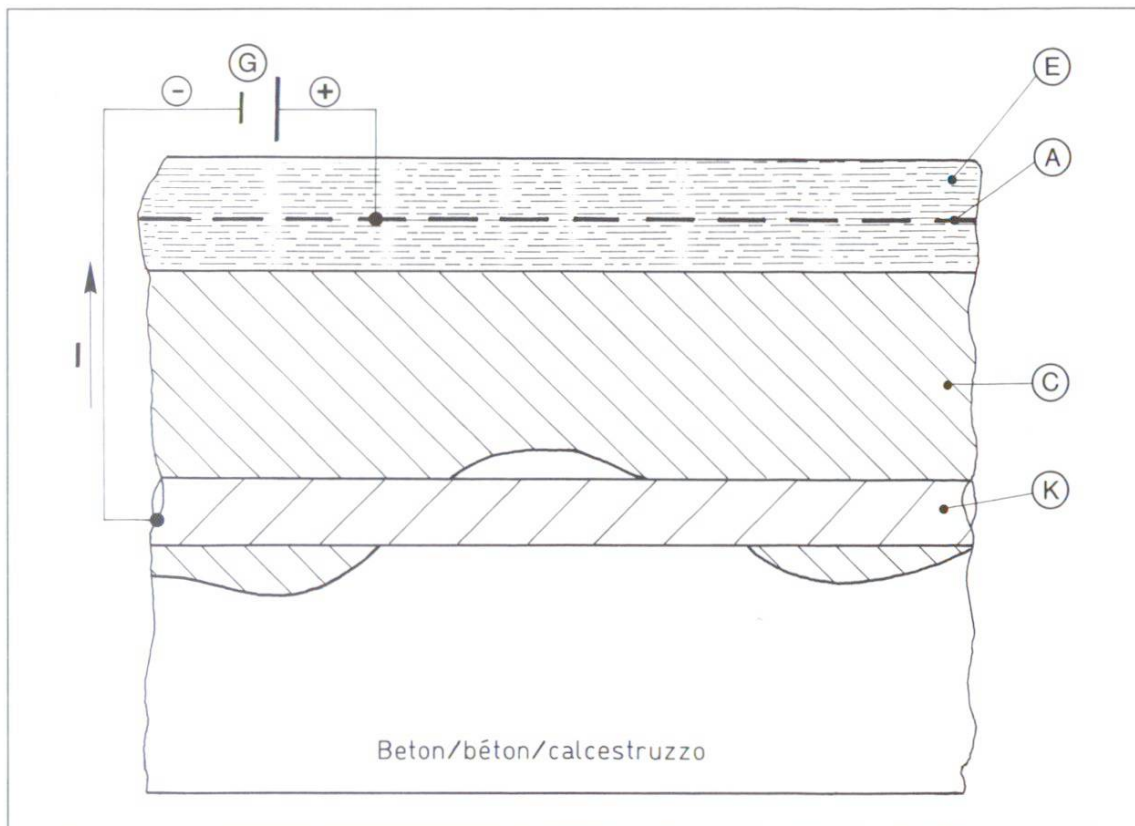


Schéma 1. Réalcalinisation électrochimique de béton carbonaté (C): la source de courant continu (G) est reliée pendant quelques jours au treillis servant d'anode (A) (noyé dans la pâte de papier [E] contenant l'électrolyte) et à l'armature (K). (Dessin: TFB)

3 protectrice détruite se reconstitue et la rouille se transforme en combinaisons du fer passives. Il y a simultanément *migrations de ions*: les ions hydroxyle quittent l'armature à charge négative (cathode) et se dirigent vers le filet extérieur (anode), et les ions natrium, ainsi que d'autres à charge positive, migrent de la surface du béton en direction de la cathode. De plus, sous l'influence du champ électrique, la solution de carbonate de sodium pénètre dans le béton (*électro-osmose*).

Une fois le courant continu coupé, différentes réactions se produisent dans les pores du béton, qui se terminent par la formation de carbonate et de bicarbonate de sodium. Ces deux combinaisons protègent l'armature contre une nouvelle dépassivation et contre la corrosion s'ensuivant: elles forment ce qu'on appelle un «système tampon», qui maintient la valeur pH au-dessus de 10,0, même en cas de nouvelles attaques par le CO<sub>2</sub> contenu dans l'air.

### **Exécution des réalcalinisations électrochimiques**

On commence par nettoyer la surface du béton. On élimine ensuite les parties qui se détachent et on les remplace par du mortier de teinte assortie. Tous les 50 m<sup>2</sup>, on établit un raccordement électrique entre l'armature et la source de courant. Avec un appareil ordinaire on projette sur la surface du béton, en même temps, la pâte de papier sèche et la solution aqueuse de carbonate de sodium. Sur cette couche humide de quelque 2,5 cm d'épaisseur, on pose un treillis métallique, que l'on recouvre d'une nouvelle couche de pâte de papier et de solution de carbonate de sodium de 2,5 cm d'épaisseur. La quantité de pâte de papier nécessaire est d'environ 5 kg/m<sup>2</sup>. L'armature et le treillis métallique sont reliés à la source de courant continu, et la pâte de papier est maintenue humide pendant le traitement sous tension. Après environ quatre jours, on prélève les premières carottes, de 20 mm de diamètre, pour contrôler la réalcalinisation. Si le béton est suffisamment réalcalinisé, ce qui est le cas après quatre à huit jours ainsi que l'expérience nous l'a appris, le courant peut être coupé.

La pâte de papier ainsi que le treillis servant d'anode sont enlevés, et la surface est nettoyée à fond avec de l'eau sous pression (150 bars). Les trous résultant du raccordement électrique de l'armature et du prélèvement de carottes sont remplis avec du mortier.

La réalcalinisation électrochimique a été appliquée par exemple à Londres: dans les murs extérieurs de la fabrique Hoover, construite en 1932, la carbonatation atteignait une profondeur de quelque 30 mm en moyenne, et de 70 mm au maximum, et l'armature était corrodée. Etant donné que les autorités compétentes exigeaient que le béton initial soit conservé, on a choisi le procédé NCT pour la

4 réfection. Des portions de surface allant jusqu'à 400 m<sup>2</sup> ont été réalcalinisées en quatre jours en moyenne. On a traité au total 4500 m<sup>2</sup> [6].

En Suisse, on a réalcalinisé, entre autres, des clochers à Bottmingen et à Münchenstein, ainsi que 1400 m<sup>2</sup> de béton apparent d'un bâtiment des PTT à Berne, dont les profondeurs de carbonatation allaient jusqu'à 40 mm. A la demande de l'Office des constructions fédérales, la réalcalinisation a également été utilisée pour les éléments de façades d'un bâtiment de Brigue.

### **Quand la réalcalinisation électrochimique est-elle judicieuse?**

Le béton carbonaté est un «bon» béton, auquel manque cependant la capacité d'offrir à l'armature une protection durable contre la corrosion. Si dans un ouvrage en béton armé, le front de carbonatation n'a pas encore atteint l'armature, il peut suffire de stopper la progression de la carbonatation. Divers revêtements conviennent alors, qui vont de minces enduits synthétiques à une couche de béton projeté aussi compacte que possible. A ce stade précoce, on utilise la réalcalinisation électrochimique lorsque des surfaces de béton apparent ne doivent pas changer d'aspect (protection des monuments historiques!) ou que, pour des raisons de stabilité, un poids supplémentaire n'est pas admissible.

Dès que la corrosion a causé des dégâts visibles, la réalcalinisation entre en concurrence avec le coûteux enlèvement total du béton jusqu'à l'armature, suivi du décapage de l'acier et du reprofilage,



Recouvrement du treillis servant d'anode avec de la pâte de papier humide. (Photo: Ecbis, Allschwil)

5 généralement avec du béton projeté. Les constructions en béton armé de faibles sections, statiquement fragiles, telles que silos, tours de refroidissement ou châteaux d'eau, représentent d'autres cas où la réfection par réalcalinisation électrochimique peut être prise en considération.

Il faut également mentionner la réalcalinisation d'éléments de construction en béton carbonatés au moyen de mortiers à liant hydraulique. L'hydroxyde de calcium provenant du mortier fait monter la valeur pH à quelque 12,5 dans l'eau des pores du béton carbonaté. Mais sitôt après l'élimination du mortier de réparation, la carbonatation recommence. Pour protéger plus durablement le béton réalcalinisé contre une nouvelle carbonatation, il faut laisser le mortier de réparation sur la surface du béton, ou appliquer sur cette surface un inhibiteur de carbonatation [11].

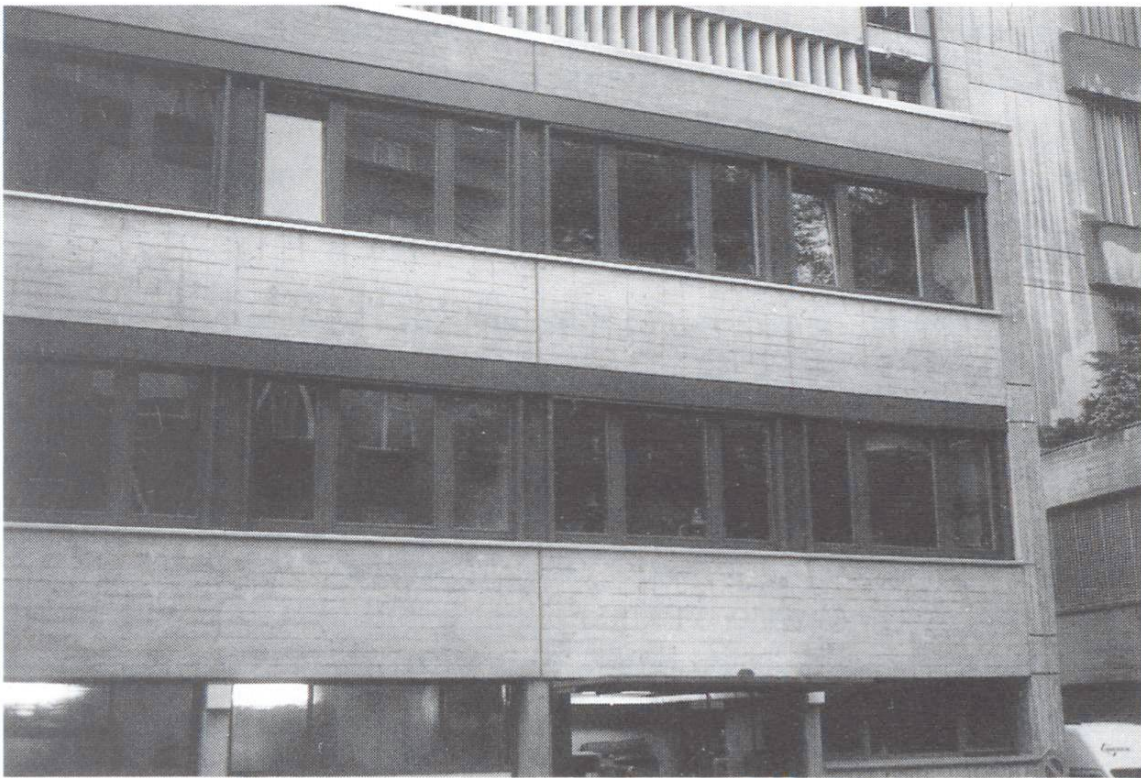
### **Extraction électrochimique des chlorures**

Le rôle des ions de chlorure dans la corrosion de l'armature des ouvrages en béton armé a déjà été expliqué dans le dernier «Bulletin du Ciment» [1]. Il faut retenir que dans des conditions défavorables, les ions de chlorure peuvent percer la couche passivante de l'armature et induire la corrosion, même avec des valeurs pH élevées ( $> 12,0$ ).

On peut y remédier en recourant à l'extraction électrochimique des chlorures, selon le procédé NCT. Les processus sont en principe les mêmes qu'avec la réalcalinisation. C'est-à-dire que les zones corrodées de l'armature sont repassivées. Il est en outre capital que les ions de chlorure non fixés dans la pâte de ciment durcie, tels que les ions hydroxyle, s'éloignent de l'armature en direction de l'anode. Ils arrivent dans la pâte de papier humide, avec laquelle ils sont éliminés une fois l'extraction terminée.

Dans l'exécution également, l'extraction électrochimique des chlorures ne diffère que peu de la réalcalinisation électrochimique. Un électrolyte alcalin n'est pas nécessaire; la pâte de papier est généralement maintenue humide avec de l'eau. On utilise parfois aussi une solution d'hydroxyde de calcium diluée. Les tensions (10 à 40 V) et densités de courant (0,5 à 1,0 A/m<sup>2</sup>) sont les mêmes.

On surveille la progression de l'extraction électrochimique des chlorures au moyen d'analyses faites sur les carottes régulièrement prélevées. L'extraction dure généralement de trois à neuf semaines, selon la teneur en chlorures et leur répartition, selon la qualité et l'humidité du béton, et selon la disposition et le recouvrement de l'armature. L'extraction des chlorures se fait de préférence pendant la saison chaude.



Béton apparent du bâtiment des PTT de la Haslerstrasse à Berne, construit voici plus de 25 ans, après la réalkalinisation. (Photo: Ecbis, Allschwil)

Les réductions typiques de la teneur en chlorures se situent entre 50 et 60 %. Si des réductions plus fortes sont exigées, on peut continuer le traitement NCT après une à deux semaines d'arrêt, en réenclenchant le courant électrique. S'il est prévisible que l'ouvrage traité sera par la suite de nouveau infesté par des chlorures, il faut le doter d'un revêtement approprié.

Des essais d'extraction électrochimique des chlorures ont été effectués in situ en Suisse sur mandat de l'Office fédéral des routes [9], ainsi qu'au Canada dans le cadre du Strategic Highway Research Program [8], et il n'a pas été constaté de modifications physiques ou chimiques dans le béton traité. Jusqu'à ce que l'on dispose des résultats de recherches, il vaut mieux, pour plus de sûreté, renoncer à la réparation d'ouvrages en béton précontraint au moyen du procédé NCT, car des fragilisations dues à l'hydrogène (corrosion fissurante due à la contrainte) ne sont pas totalement exclues. (C'est pour la même raison que l'utilisation de la protection cathodique aussi est limitée pour les ouvrages en béton précontraint [1].)

L'extraction électrochimique des chlorures s'utilise principalement pour les constructions en béton telles que piles de ponts, murs de soutènement ou dalles de parking infestés par le sel de dégel, pour les éléments de construction en béton infestés par les chlorures dans l'industrie chimique, ou pour ceux chargés de chlorures après la destruction de PVC par le feu. On dispose par exemple d'un rapport concernant un pont en arc avec 210 m d'ouverture de voûte, achevé en 1968 dans le Vorarlberg. A la surface de la voûte, la quantité de chlorures était de 2 % (par rapport au dosage en ciment). Un essai-

7 type d'une durée de cinq semaines a permis de réduire la teneur en chlorures de 67 % à une profondeur de 0 à 10 mm, et de 54 % à une profondeur de 15 à 25 mm [5].

A Francfort, on a également réussi à abaisser la teneur en chlorures des quatre piles rondes d'un pont sur le Main ayant 20 ans. Dans ce cas, le béton compact, composé de ciment de haut fourneau dont la résistance électrique est dix à vingt fois plus élevée que celle du ciment Portland, a rendu l'exécution plus difficile. Après quelque 60 jours de traitement, la teneur en chlorures (par rapport au dosage en ciment) a cependant été abaissée de 1,3 % à environ 0,3 % dans la zone extérieure, et de 0,7 à 0,1 % près de l'armature. Afin de les protéger contre une nouvelle pénétration de ions de chlorure, les piles ont été revêtues d'un enduit pigmenté une fois la réparation terminée [7].

### **Extraction électrochimique des chlorures ou protection cathodique contre la corrosion?**

Pour la réparation d'ouvrages en béton armé fortement chargés de ions de chlorure, on peut utiliser aussi bien l'extraction électrochimique des chlorures que la protection cathodique contre la corrosion, dont il a été traité dans le dernier «Bulletin du Ciment» [1]. A condition toutefois qu'il n'y ait pas d'importantes diminutions de la section portante de l'armature, ni de dégâts s'étendant sur une grande surface du recouvrement en béton. Les dégâts de ce genre exigent un enlèvement du recouvrement en béton jusqu'à l'armature, suivi d'un reprofilage. Il se peut qu'il faille aussi compléter l'armature, ou la remplacer en partie.

Les expériences de longue durée faites avec la protection cathodique parlent en sa faveur. Toutefois, contrairement au procédé NCT, la protection cathodique exige une surveillance périodique pendant toute la durée de service de l'ouvrage. De plus, sur de nombreux ouvrages, les modifications d'aspect, ou les charges supplémentaires qu'entraînent les couches de béton projeté nécessaires pour l'insertion des anodes, sont indésirables.

Les adeptes de chacun des deux procédés avanceront d'autres arguments encore. Finalement, il s'agit dans tous les cas de trouver une solution optimale. Et cela exige l'intervention de spécialistes, qui, par la suite, peuvent également exécuter ou suivre la réparation.

*Kurt Hermann*



## 8 Bibliographie

- [1] *Hermann, K.*, «Protection cathodique contre la corrosion», *Bulletin du Ciment* **61** [20] (1993).
- [2] «Richtlinie für Projektierung, Ausführung und Überwachung des kathodischen Korrosionsschutzes von Stahlbetonbauwerken» (C7d), éditée par la Société suisse de protection contre la corrosion (1991).
- [3] *Neisecke, J.*, «Karbonatisierung von Stahlbeton – wirklich ein Problem?», *Beton-Informationen* **31** [3/4], 27–31 (1991).
- [4] *Jungwirth, D., Grübl, P., et Windisch, A.*, «Elektrochemische Schutzverfahren für bewehrte Bauteile aus baupraktischer Sicht», *Beton- und Stahlbetonbau* **86** [7], 167–171 (1991) et **86** [8], 190–192 (1991).
- [5] *Kaltenegger, W.*, «Sanfte Technologie für zerstörungsfreie Beton-Instandsetzung», *Zement und Beton* **1993** [2], 14–15.
- [6] «News from NCT», février 1993, pages 2–3.
- [7] *Eichert, H.-R., Wittke, B., et Rose, K.*, «Elektrochemischer Chloridentzug», *Beton* **42** [4], 209–213 (1992).
- [8] *Bennett, J., et Schue, T. J.*, «Evaluation of Norcure process for electrochemical chloride removal from steel-reinforced concrete bridge components», Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC (1992).
- [9] *Elsener, B., et Molina, M.*, «Elektrochemische Chloridentfernung an Stahlbetonbauwerken», rapport final concernant le mandat de recherche 97/92 «Brückenunterhaltsforschung», OFR.
- [10] *Roti, J. A.*, «Elektrochemische Realkalisation und Entsalzung von Beton», *Documentation SIA D 065*, 1–21 (1990).
- [11] *Wittmann, F. H., et Lunk, P.*, «Beeinflussung des Feuchtigkeits- und Ionentransports in Beton durch oberflächentechnologische Massnahmen», *Documentation SIA D 099*, 27–35 (1993).

**Traduction française:** Liliane Béguin

---

### Rédaction

Dr Kurt Hermann  
TFB, Lindenstrasse 10  
5103 Wildegg  
Téléphone 064 57 72 72  
Téléfax 064 53 16 27

### Le «Bulletin du Ciment»

paraît une fois par mois  
Abonnement annuel:  
Suisse: Fr. 25.–  
Europe: Fr. 50.–  
Autres pays: Fr. 80.–

### Expédition/Abonnements

Mme M. Winter  
Zürichsee Medien AG  
Seestrasse 86, 8712 Stäfa  
Téléphone 01 928 52 23  
Téléfax 01 928 52 00

### Editeur

TFB, Lindenstrasse 10  
5103 Wildegg  
Téléphone 064 57 72 72

### Impression

Zürichsee Druckereien AG  
Seestrasse 86  
8712 Stäfa

### Copyright

TFB  
Lindenstrasse 10  
5103 Wildegg