



Energie

Programmes nationaux de recherche 70 et 71

Synthèse

Constructions durables en béton





Energie

Programmes nationaux de recherche 70 et 71

Constructions durables en béton

Synthèse conjointe



1. Constructions durables en béton

Synthèse du projet conjoint du PNR 70
« Béton à basse énergie »



1.1. Un potentiel considérable dans les matériaux de construction

1.1.1. Résumé



À l'échelle de leur cycle de vie, toutes les constructions de Suisse – c'est-à-dire les bâtiments, les routes, les ouvrages d'infrastructure, etc. – représentent environ 50 % des besoins d'énergie finale de la Suisse. De plus, elles sont responsables de plus de 30 % des émissions de CO₂, un gaz à effet de serre.

Au cours des dernières décennies, les besoins énergétiques et les émissions de CO₂ liées à l'utilisation des bâtiments ont fortement diminué. L'énergie grise contenue dans les bâtiments et les émissions de CO₂ issues de la production des matériaux de construction, de la rénovation et du démantèlement sont cependant restées élevées. Le potentiel d'amélioration est considérable à cet égard.

Le projet conjoint « Béton à basse énergie » jette les fondements d'une transformation de l'industrie de la construction en un secteur durable. Il se concentre notamment sur le béton en tant que matériau de construction engendrant des niveaux particulièrement élevés d'énergie grise et d'émissions de CO₂. Les résultats de ce projet conjoint sont résumés et interprétés dans la présente synthèse « Constructions durables en béton ».

Le projet conjoint s'est avant tout concentré sur les objectifs suivants :

1. Réduire les émissions de CO₂ et l'énergie grise par une diminution drastique du clinker dans le ciment.
2. Réduire l'énergie grise en remplaçant l'acier d'armature et de précontrainte dans les structures en béton par du bois et des matériaux de synthèse.
3. Allonger la durée de vie des ouvrages grâce à une surveillance professionnelle et des mesures de rénovation adéquates, ce qui réduit les moyennes annuelles d'énergie grise et d'émissions de CO₂.

Les recherches montrent que les émissions de CO₂ causées par le béton et les structures en



béton peuvent être réduites d'un facteur 4 et l'énergie grise mobilisée d'un facteur 3.

1.2. Messages clés

Durabilité

1.2.1. Fortes réductions possibles



Les recherches menées dans le cadre du projet conjoint « Béton à basse énergie » permettent de formuler deux messages clés :

1. L'énergie grise et les émissions de CO₂ associées à la construction, à la rénovation et au démantèlement de structures en béton dans le bâtiment et le génie civil peuvent être réduites jusqu'à un tiers sans nuire de façon significative aux excellentes propriétés du matériau de construction¹.
2. La surveillance constante et le diagnostic professionnel de l'état de la structure des ouvrages contribuent à éviter des assainissements inutiles ou un remplacement prématuré. En outre, la surveillance permanente permet la mise en œuvre de matériaux de construction et de structures innovants, encore peu éprouvés, pour réduire l'énergie grise et les émissions de CO₂ lors de la construction, de la rénovation et du démantèlement des structures en béton².

Notes et références

1 Projet « Béton à basse énergie »

2 Projet « Monitoring des constructions en béton »

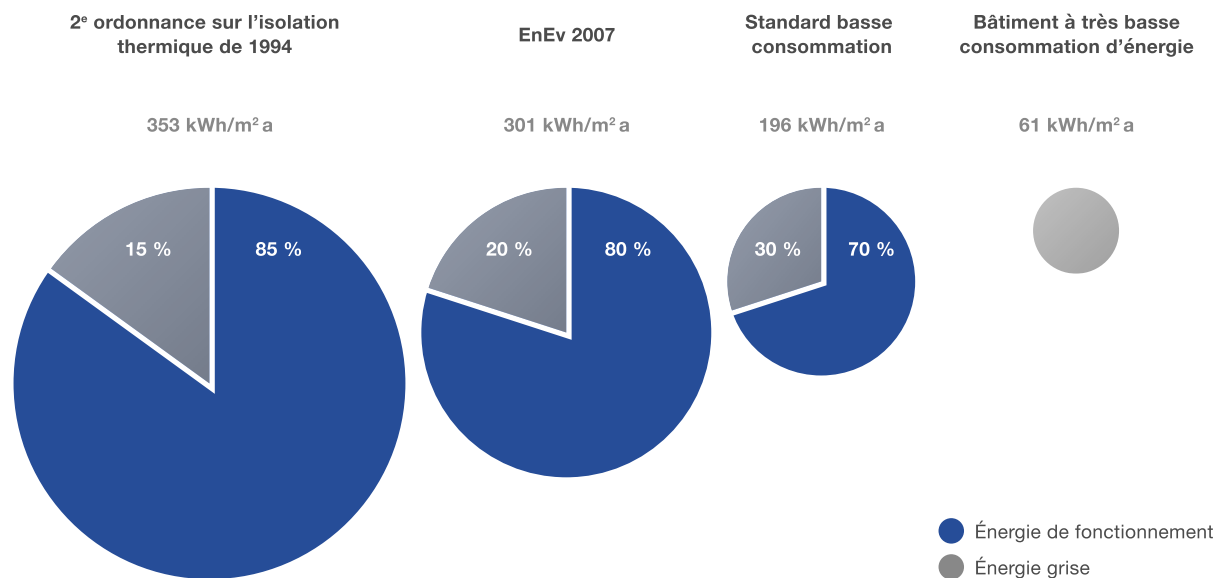


1.3. Le béton, un matériau de construction complexe

Le béton mobilise énormément d'énergie grise et représente également un facteur significatif d'émissions de CO₂. Alors que le fonctionnement des bâtiments est constamment optimisé en termes de consommation d'énergie et d'émissions polluantes, la construction, la rénovation et le démantèlement de structures en béton comportent encore un potentiel considérable. De récents résultats de recherche montrent comment agir en ce sens.

Bâtiments # CO₂ / Gaz à effet de serre

1.3.1. La construction et les ouvrages, ennemis du climat



Évolution de la répartition de la consommation d'énergie dans le parc immobilier allemand. EnEv : ordonnance sur les économies d'énergies. *Source : Hegger et al. 2008*

La construction, la rénovation et l'exploitation du parc suisse de bâtiments et d'infrastructures représentent actuellement quelque 50 % de la consommation d'énergie finale et 30 % des émissions de CO₂, dont quatre cinquièmes sont liés à la phase d'exploitation et un cinquième à la construction, à la rénovation et au démantèlement des ouvrages. Ce ratio va sensiblement évoluer au cours des années à venir, comme le montre une étude¹ menée en Allemagne avec l'exemple du parc immobilier (hors infrastructures) : les émissions de CO₂ et l'énergie finale puisée dans le réseau pour l'exploitation vont tendre à devenir nulles, tandis que les chiffres liés à la construction, à la rénovation et au démantèlement auront quant à eux tendance à augmenter légèrement. En effet, les exigences énergétiques accrues applicables aux bâtiments se traduisent par une hausse de l'énergie grise et des émissions de CO₂. Retrouvez de plus amples informations à ce sujet dans la synthèse Bâtiment et aménagement², également réalisée dans le cadre du PNR « Énergie ».

L'énergie grise et les fortes émissions de CO₂ associées à la construction, à la rénovation et au démantèlement proviennent à hauteur de 20 à 30 % de la structure portante des bâtiments³, composée en grande partie de structures en béton et de mortiers liés au ciment. Il est par conséquent judicieux d'accorder une attention particulière à ce matériau de construction.

Notes et références

1 Hegger, M., Fuchs, M., Stark, T., Zeumer, M. (2008), Energy Manual : Sustainable



Energie

Programmes nationaux de recherche 70 et 71

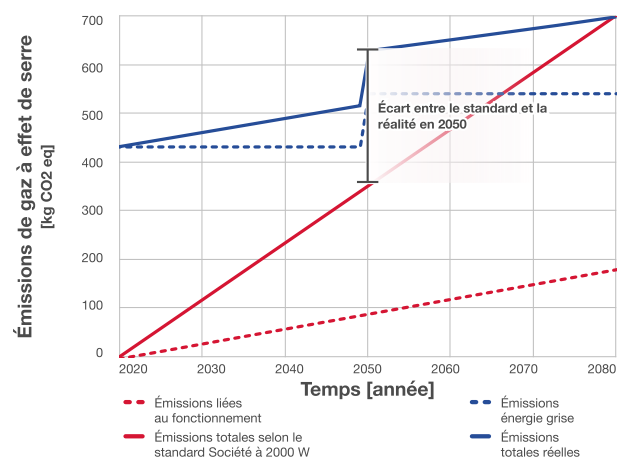
Architecture, DETAIL. ed. Institut für Internationale Architekturdokumentation / Birkhäuser, Munich

2 **Synthèse « Bâtiment et aménagement »**

3 SIA (2010), L'énergie grise des bâtiments ; Cahier technique SIA 2032, Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA), Zurich

CO2 / Gaz à effet de serre

1.3.2. La consommation d'énergie grise et les émissions de CO₂ sont irrégulières



Comparaison entre les émissions liées au fonctionnement et les émissions intrinsèques d'un nouveau bâtiment selon le standard de la Société à 2000 watts.

Source : Projet « Béton à basse énergie »

Tout au long de l'exploitation d'un ouvrage, les besoins annuels d'énergie et les émissions de CO₂ restent plus ou moins les mêmes, avec une légère tendance à la hausse au fil des ans en raison du vieillissement. Une telle régularité n'existe pas en ce qui concerne la construction, la rénovation et le démantèlement ; le moment où un bâtiment sera rénové ou démolé dépend de la décision du propriétaire. Il n'existe donc pas de règle en la matière.

Toutes les sources^{1 2 3} indiquent néanmoins des moyennes annuelles, basées sur la durée de vie standard des matériaux, des composants de construction et des installations techniques. Ces moyennes sont ensuite extrapolées aux valeurs cibles d'un bâtiment entier. La voie SIA vers l'efficacité énergétique⁴ définit par exemple de cette manière – et sur la base du concept de « Société à 2000 watts »⁵ – les valeurs cibles suivantes pour les émissions de CO₂ d'un nouveau bâtiment résidentiel à construire :

- Construction, rénovation et démantèlement : 9,0 kg CO₂/m²/an
- Fonctionnement : 3,0 kg CO₂/m²/an

Ces valeurs se rapportent à la surface de référence énergétique du bâtiment. Concrètement, les 9,0 kg de CO₂/m²/an pour la construction, la rénovation et le démantèlement ne sont pas générés de façon linéaire. La majeure partie des nuisances apparaissent lors de la construction, puis les valeurs sont nulles pendant une trentaine d'années, jusqu'à ce que la première grande opération de rénovation soit nécessaire. Comme le montre le graphique, adopter une vision linéaire revient à fortement sous-évaluer le problème des émissions de CO₂ au fil du temps. Il en va de même pour l'énergie grise.



Notes et références

- 1 KBOB, CIMP (2016), Écobilans dans la construction, recommandation 2009/1 :2016, Conférence de coordination des maîtres d'ouvrage publics (KBOB) et Communauté d'intérêts des maîtres d'ouvrage professionnels privés (CIMP), Berne et Zurich
- 2 SIA 2032 :2010, L'énergie grise des bâtiments ; Cahier technique SIA 2032, Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA), Zurich
- 3 SIA (2014 :2017, La voie SIA vers l'efficacité énergétique, Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA), Zurich
- 4 SIA (2014 :2017, La voie SIA vers l'efficacité énergétique, Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA), Zurich
- 5 <http://www.2000watt.ch>

1.3.3. Les structures en béton sont des structures composites



Le béton est le matériau de construction le plus largement utilisé pour les structures porteuses des bâtiments, des ponts, des structures de soutènement, des tunnels, etc. Un mètre cube de béton frais se compose d'environ 2000 kg de granulats (gravier et sable), 300 kg de ciment et 150 kg d'eau, la formulation étant optimisée en fonction de l'utilisation prévue. Des adjuvants peuvent en outre être ajoutés au béton pour modifier des propriétés spécifiques telles que la porosité, la vitesse de durcissement ou l'ouvrabilité.

Une fois mélangé, le béton frais est versé dans le coffrage et compacté. Il durcit alors par hydratation d'une partie de l'eau du mélange, tandis que le ciment lie les granulats, ce qui donne un matériau de construction largement homogénéisé avec une grande résistance à la compression mais une faible résistance à la traction. La résistance souhaitée est en principe atteinte au bout de 28 jours.

Les structures en béton ne sont toutefois pas seulement soumises à des contraintes de compression, mais doivent également être capables d'absorber des moments de flexion, par exemple dans les poutres ou les dalles porteuses. Un moment de flexion est une combinaison de forces de compression et de traction équivalentes, appliquées à une distance donnée. Afin de permettre à une structure en béton d'absorber les forces de traction, des tiges ou des armatures de renfort en acier sont insérées côté traction. Une structure en béton est par conséquent une structure composite de béton et d'acier.

Si les émissions de CO₂ liées à cette structure composite sont principalement imputables au béton, l'énergie grise provient du béton et de l'acier d'armature. Dans le cas d'une dalle de béton traditionnelle d'une épaisseur de 18 cm et intégrant une armature standard, les ratios sont les suivants :¹

- Émissions de CO₂ : béton 75 %, armature 25 %
- Énergie grise : béton 54 %, armature 46 %

Des mesures sont donc nécessaires tant au niveau du béton que de l'armature.



Notes et références

1 KBOB, CIMP (2016), Écobilans dans la construction, recommandation 2009/1 :2016, Conférence de coordination des maîtres d'ouvrage publics (KBOB) et Communauté d'intérêts des maîtres d'ouvrage professionnels privés (CIMP), Berne et Zurich

1.3.4. Les structures en béton vieillissent aussi



Les structures en béton sont extrêmement résistantes et durables. Pourtant, elles vieillissent. C'est tout particulièrement le cas pour les structures en béton confrontées à un environnement humide, lorsque l'humidité relative dépasse 80 %. Le composant alcalin de la pâte de ciment réagit alors en absorbant le CO_2 de l'air pour former du carbonate de calcium et de l'eau $[\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}]$. Le pH de la pâte de ciment diminue de ce fait de 12,5 en moyenne à moins de 10, ce qui signifie que la protection anticorrosion initiale de l'acier d'armature utilisé dans le béton est en grande partie perdue. L'acier d'armature est par conséquent touché par la corrosion, et l'augmentation de volume qui en résulte se traduit par un écaillage de la surface du béton, qui a pour effet d'accélérer encore davantage la corrosion des armatures.

D'autres effets peuvent intensifier le processus de corrosion, par exemple une augmentation de la teneur en chlorure de sodium provoquée par le salage sur les ouvrages de voirie. La corrosion avancée de l'armature conduit à une baisse inadmissible de la capacité portante des structures en béton et finalement à leur effondrement.

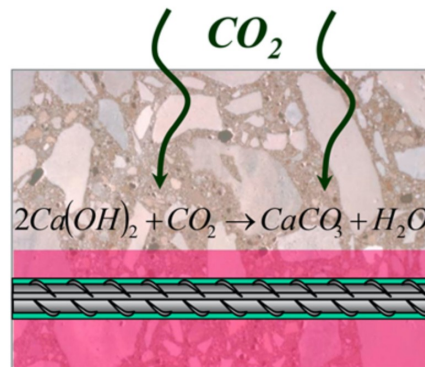
La vitesse de progression de la corrosion dépend principalement des facteurs suivants :

- l'humidité à la surface du béton – les taux de 50 à 70 % sont les plus défavorables ;
- la résistance du béton ;
- la porosité du béton.

Dans les structures en béton exposées aux intempéries – façades en béton de parement, ponts ou murs de soutènement –, le béton doit par conséquent être le plus dense et le plus résistant possible, et il ne doit présenter que très peu de fissures capillaires. Les structures en béton situées à l'abri, par exemple à l'intérieur des bâtiments, ne sont généralement pas concernées par les problèmes de corrosion.

Corrosion causée par la carbonatation dans les structures ordinaires en béton armé ; aucune corrosion ne se produit si le béton n'est pas exposé à l'eau, par exemple à l'intérieur. Credits :

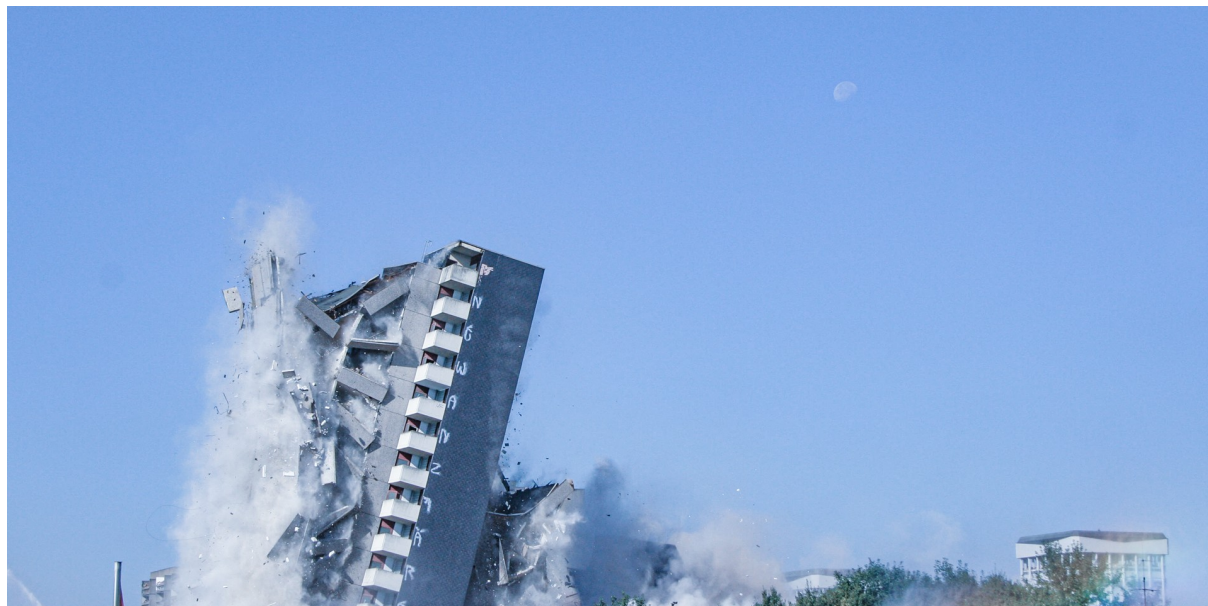
Francesco Pittau.



Source : Projet « Ciments pauvres en clinker »

CO2 / Gaz à effet de serre

1.3.5. La fin de vie des structures en béton



Les structures en béton ont une durée de vie et, par conséquent, une fin de vie. Ce terme ne désigne pas un effondrement incontrôlé, comme cela s'est par exemple produit pour le pont Morandi à Gênes, mais le moment où l'aptitude au service ou la marge de sécurité requise ne sont plus garanties. Dans ce cas, un renforcement en profondeur ou un remplacement complet de l'ouvrage est nécessaire. Le choix de la mesure la mieux adaptée dépend de l'état de la construction, de l'impact écologique et opérationnel de la mesure, ainsi que de sa viabilité économique.

Étant donné qu'en règle générale, toutes les parties d'un ouvrage en béton n'arrivent pas en fin de vie en même temps, les consolidations partielles sont monnaie courante en Suisse, un pays qui a une longue tradition de mesures de renforcement partiel de ce type. Le remplacement interviendra plutôt lorsque de nouvelles exigences d'utilisation ou des conditions-cadres légales l'exigent.

Dans les projets de rénovation, comme dans les ouvrages neufs, il convient de veiller à ce que l'énergie grise et les émissions de CO₂ soient évitées autant que possible et que les ressources soient utilisées avec parcimonie. Le moment où un projet de rénovation est mis en œuvre représente à cet égard un facteur clé : intervenir trop tôt n'est pas optimal d'un point de vue économique, trop tard peut être lourd de conséquences. En dépit d'une longue expérience dans ce domaine, la Suisse dispose encore d'un potentiel d'amélioration considérable, notamment en termes de réduction des émissions de CO₂ et d'amélioration de la durabilité. Les résultats de recherche du projet conjoint « Béton à basse énergie » constituent une base intéressante à cet effet.

1.3.6. Thématique prioritaire de la synthèse



Cette synthèse se concentre sur les résultats du projet conjoint « Béton à basse énergie » et des sous-projets associés « Ciments pauvres en clinker »¹, « Béton à hautes performances »², « Structures porteuses hybrides »³, « Béton précontraint à fibres de carbone »⁴ et « Monitoring des constructions en béton »⁵.

La préoccupation commune de l'ensemble des groupes de recherche était de réduire sensiblement l'énergie grise et les émissions de CO₂ liées à la construction, à la rénovation et au démantèlement de structures porteuses en béton. La faisabilité technique figurait à cet égard au premier plan ; la rentabilité économique et l'acceptation n'ont pas encore été traitées de manière approfondie.

Notes et références

- 1 Projet « Ciments pauvres en clinker »
- 2 Projet « Béton à hautes performances »
- 3 Projet « Structures porteuses hybrides »
- 4 Projet « Béton avec fibres de carbone précontraintes »
- 5 Projet « Monitoring des constructions en béton »

1.4. Caractéristiques matérielles du béton

Les matériaux de construction mobilisent de grandes quantités d'énergie grise et sont



Energie

Programmes nationaux de recherche 70 et 71

responsables d'une part non négligeable des émissions de CO₂. Cette réalité a fait l'objet d'une attention insuffisante jusqu'à présent. Pourtant, ces effets négatifs pourraient être considérablement réduits.

1.4.1. Champion du monde pour tout un tas de bonnes raisons



Le béton – en particulier le béton armé – est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Cela s'explique par toute une série de bonnes raisons :

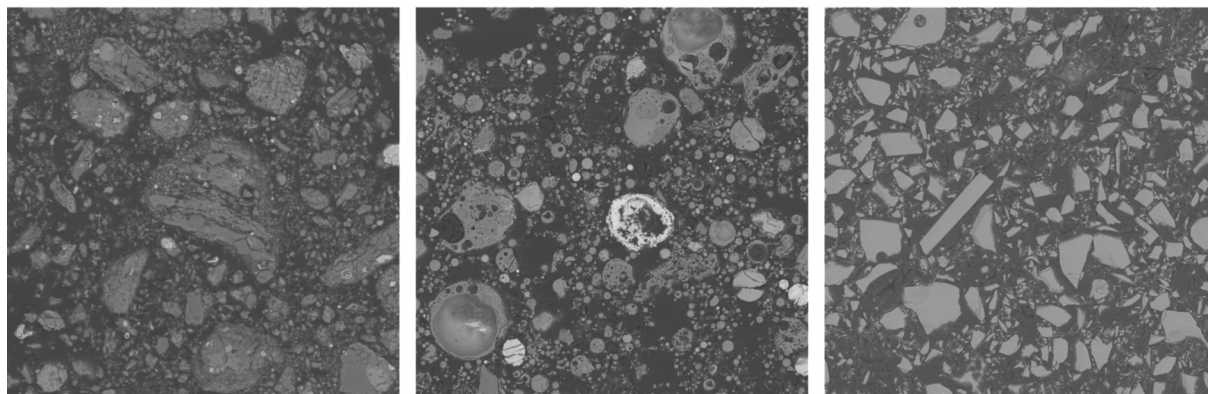
- Ses composants sont relativement faciles à produire localement.
- Les éléments en béton peuvent prendre pratiquement n'importe quelle forme.
- Sa mise en œuvre sur le chantier ne nécessite pas de connaissances particulières.
- La résistance développée est excellente.
- La porosité est faible.
- C'est un matériau de construction très durable.
- Grâce à des additifs, les propriétés du matériau peuvent être ajustées presque sans limite.
- C'est un matériau de construction bon marché.

Grâce à ces propriétés exceptionnelles, le béton armé ne peut pas être simplement remplacé par un autre matériau.

Le béton armé possède cependant aussi des inconvénients : la construction, la rénovation et le démantèlement de structures en béton mobilisent beaucoup d'énergie grise et génèrent des émissions de CO₂ considérables. Le grand défi consiste à éliminer autant que possible ces inconvénients, sans compromettre les excellentes propriétés du matériau de construction.

CO2 / Gaz à effet de serre

1.4.2. Du ciment avec moins de clinker



Images en électrons rétrodiffusés de schiste bitumineux calciné, cendre volante et laitier incrusté dans de la résine époxy. *Source : ETHZ, Chair of Physical Chemistry of Building Materials*

Le clinker est le composant le plus important du ciment. Il est obtenu à partir de calcaire et d'argile ; la roche est cassée et broyée, puis transformée en clinker par frittage à environ 1450°C dans un four tubulaire rotatif ou un four à cuve. Ce procédé est très énergivore et fortement émetteur de CO₂.

Afin de limiter ces inconvénients, le projet « Ciments pauvres en clinker »¹ a œuvré au développement d'un ciment nécessitant jusqu'à 65 % de clinker de moins que le ciment Portland standard (type CEM I). Le nouveau mélange de ciment (type CEM II/C) comporte 50 % de CEM I, ainsi que de la poudre de calcaire (filler) et du schiste bitumineux calciné en guise d'ajout cimentaire. Ce nouveau mélange peut être produit avec les installations de production existantes et réduit les émissions de CO₂ environ de moitié.

Les caractéristiques principales des matériaux sont comparables à celles du ciment Portland, car le développement de la résistance initiale a été considérablement amélioré grâce à des additifs chimiques. Des incertitudes subsistent cependant en ce qui concerne la carbonatation et donc le risque de corrosion des armatures en acier dans les environnements particulièrement humides, lorsque l'humidité relative dépasse 80 %. Pour l'instant, il est donc recommandé d'utiliser le nouveau ciment principalement à l'intérieur des bâtiments.

Notes et références

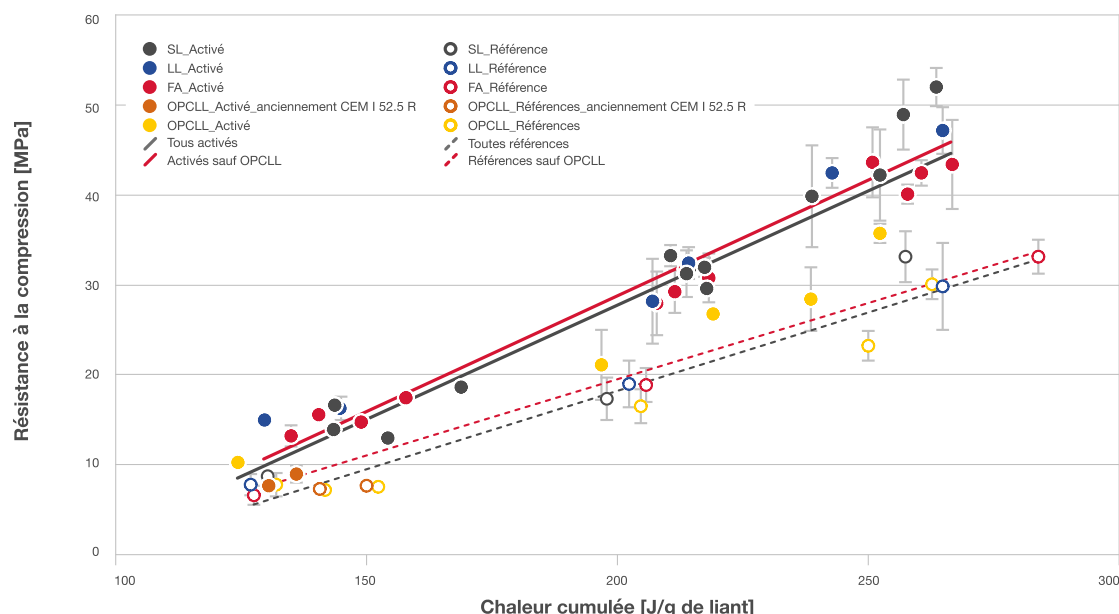


Energie

Programmes nationaux de recherche 70 et 71

1 Projet « Ciments pauvres en clinker »

1.4.3. Résistance initiale élevée grâce à des additifs chimiques



Influence de l'addition de solutions alcalines faiblement concentrées sur la résistance à la compression et le dégagement cumulé de chaleur après 7 jours par rapport aux mélanges de référence sans activateurs. SL : mélange avec 10 % de laitier, FA : mélange avec 10 % de cendres volantes, LL : mélange avec 10 % de poudre de calcaire, OPCLL : mélange avec 50 % de ciment Portland et 50 % de poudre de calcaire. Source : *Projet « Ciments pauvres en clinker »*

L'influence de divers activateurs – tels que des solutions alcalines modérément concentrées, du nitrate de calcium et du gypse – sur le développement de la résistance initiale a été étudiée dans le cadre du projet « Ciment pauvres en clinker »¹. Ces additifs ont été testés sur l'un des nouveaux mélanges de ciment contenant 50 % de ciment Portland et 50 % d'adjuvants cimentaires disponibles dans la région, par exemple 20 % de poudre de calcaire, 20 % de schiste bitumineux calciné et 10 % de cendres volantes ou de laitier.

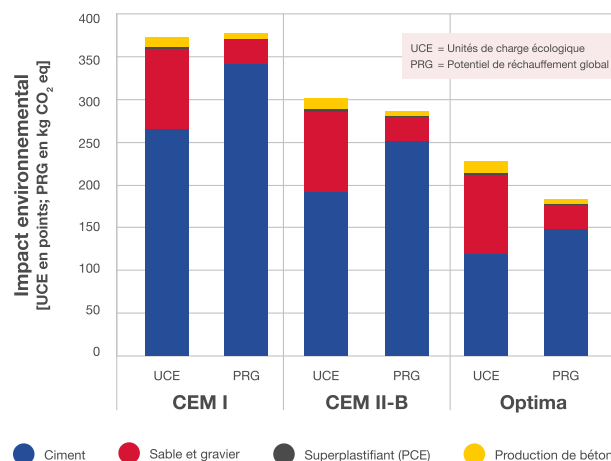
Les analyses ont montré que ce mélange donnait les meilleurs résultats lorsqu'il était additionné d'hydroxyde de sodium et de nitrate de calcium. La résistance à 90 jours a augmenté de 14 points pour atteindre 120 %. Il est aussi apparu clairement que le gain de résistance était de toute évidence dû à l'adjonction de schistes bitumineux calcinés. En outre, il a pu être démontré que le remplacement des cendres volantes et du laitier par de la poudre de calcaire n'affecte pas le développement de la résistance, tandis qu'un mélange de 50 % de ciment Portland et 50 % de poudre de calcaire se traduit par une perte de résistance considérable.

Notes et références

1 Projet « Ciments pauvres en clinker »

CO2 / Gaz à effet de serre

1.4.4. Des émissions de CO₂ divisées par deux



Estimation de l'impact environnemental pour 1 m³ de béton. Source : *Projet « Béton à basse énergie »*

Afin de quantifier les effets du nouveau mélange de ciment en termes d'émissions de CO₂ et d'énergie grise, une analyse de cycle de vie a été réalisée pour deux mélanges de ciment distincts.¹ Les deux ciments étaient basés sur un mélange de ciment Portland (CEM II), de poudre de calcaire et de schiste bitumineux calciné. L'un des mélanges (CEM II-B) ne comportait que 60 % de ciment Portland et l'autre (OPTIMA) seulement 35 %. Les deux mélanges ont été additionnés d'un superplastifiant spécialement conçu pour améliorer la résistance initiale et le comportement à long terme.

L'analyse du cycle de vie s'est appuyée d'une part sur la méthode de la saturation écologique², qui utilise des écofacteurs pour quantifier la charge environnementale due à l'émission d'un polluant ou à la consommation d'une ressource, exprimée en unités de charge écologique (ou écopoints) ; d'autre part sur le potentiel de réchauffement global³, déterminé grâce à l'équivalent CO₂.

Les deux analyses montrent que les nouveaux mélanges de ciment entraînent une réduction de 40 % de l'impact environnemental du béton fini, ainsi qu'une réduction de 50 % de son potentiel de réchauffement global. Ces améliorations substantielles en termes d'énergie grise et d'émissions de CO₂ sont obtenues sans impact majeur sur les caractéristiques matérielles du béton.

Notes et références

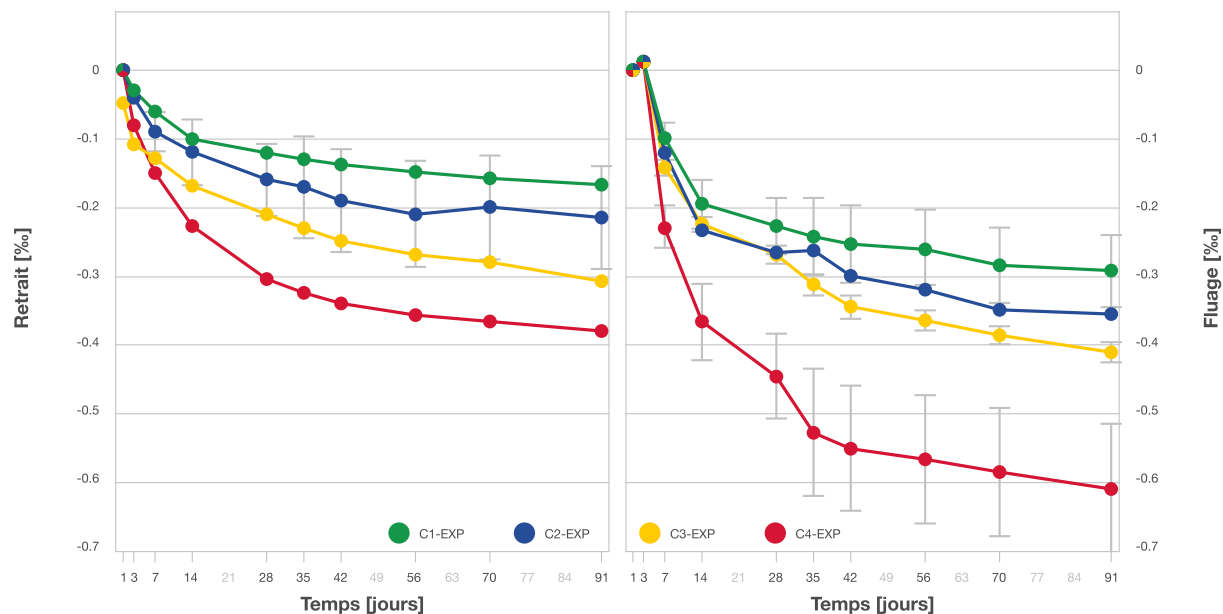
1 Projet « Béton à basse énergie »

2 OFEV (2013), Écofacteurs suisses 2013 selon la méthode de la saturation écologique, Office fédéral de l'environnement, Ittigen

3 <https://www.unfccc.int>

CO2 / Gaz à effet de serre

1.4.5. Ciments durables à hautes performances



Taux de retrait (à gauche) et de fluage (à droite). Pour les mesures du taux de fluage, la charge a été augmentée pour atteindre 20 % de la résistance à la compression après 3, 7 et 28 jours. C1 est un ciment industriel autocompactant à hautes performances actuellement utilisé dans l'industrie suisse de la préfabrication. C2, C3 et C4 correspondent aux mélanges de ciments nouvellement élaborés. *Source : Projet « Béton à hautes performances »*

Pour éviter la corrosion des éléments en béton précontraint, l'acier de précontrainte est de plus en plus remplacé par des polymères renforcés par des fibres de carbone. Pour réduire les coûts de production et permettre un décoffrage rapide, des ciments autocompactants hautes performances sont mis en œuvre, ce qui se traduit par des valeurs élevées d'énergie grise et d'émissions de CO₂.

Pour remédier à cela, un ciment hautes performances à très faible teneur en carbonate a été développé dans le cadre du projet « Béton à hautes performances »¹. Jusqu'à 70 % du ciment Portland a été remplacé par du métakaolin, de la microsilice et de la poudre de calcaire, tandis que le rapport eau/ciment a été réduit à 17 %. L'auto-compactage a pu être assuré par une forte augmentation de l'adjonction de superplastifiants. Ce mélange de ciment plus respectueux de l'environnement a permis d'obtenir une résistance à la compression du béton de 80 MPa et une résistance à la traction de 20 MPa de la liaison entre le béton et les polymères renforcés par des fibres de carbone et revêtus de sable. Ces valeurs correspondent aux résistances des ciments hautes performances disponibles sur le marché.

Par ailleurs, divers calculs MEF et tests ont montré que le nouveau mélange de ciment présentait un taux de fluage et de retrait nettement plus faible que les ciments hautes



performances habituels. Cela permet des pertes de précontrainte plus faibles et donc des coûts moindres, tout en réduisant de moitié l'énergie grise et les émissions de CO₂.

Notes et références

1 Projet « **Béton à hautes performances** »

1.5. Constructions en béton sans acier

La fabrication et le transport des aciers d'armature et de contrainte des structures en béton nécessitent beaucoup d'énergie. Il existe cependant des moyens innovants de réaliser des ouvrages en béton sans acier.

1.5.1. La production d'acier est très énergivore



Le béton possède une excellente résistance à la compression, mais une résistance à la traction très limitée. C'est pourquoi, dans les structures traditionnelles en béton, telles que les fondations, les murs, les piliers, les poutres et les dalles, des éléments d'armature ou de précontrainte en acier doivent être intégrés pour absorber les forces de traction qui surviennent.

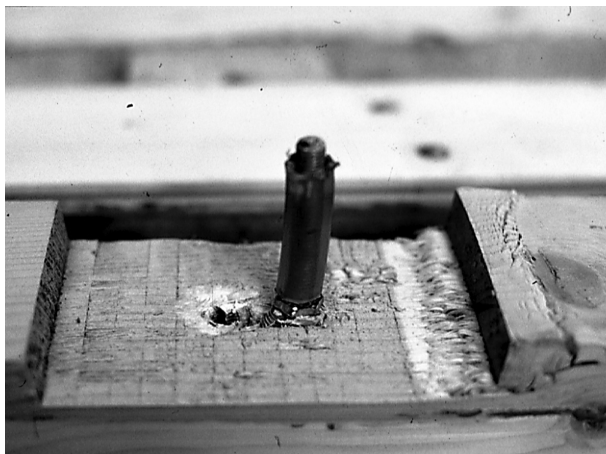
La production d'acier, en particulier d'acier d'armature et de précontrainte de haute qualité, est extrêmement énergivore. De plus, l'armature en acier doit être transportée sur des distances relativement longues de l'aciérie jusqu'aux revendeurs d'acier et de là, vers des chantiers répartis dans tout le pays, ce qui nécessite là encore de l'énergie. Les aciers d'armature et de précontrainte ont par conséquent accumulé une quantité non négligeable d'énergie grise lorsqu'ils arrivent sur le chantier. Pour l'acier d'armature, cela représente par exemple 3,55 équivalents pétrole brut/kg (hors transport). À titre de comparaison, le bois de résineux indigène séché à l'air et raboté n'affiche que 0,69 équivalent pétrole brut/kg.¹ D'un point de vue écologique, il est donc pertinent de limiter voire d'éliminer complètement l'acier contenu dans les structures en béton.

Notes et références

1 KBOB, CIMP (2016), Écobilans dans la construction, recommandation 2009/1 :2016, Conférence de coordination des maîtres d'ouvrage publics (KBOB) et Communauté d'intérêts des maîtres d'ouvrage professionnels privés (CIMP), Berne et Zurich

Bois

1.5.2. Du bois au lieu de l'acier



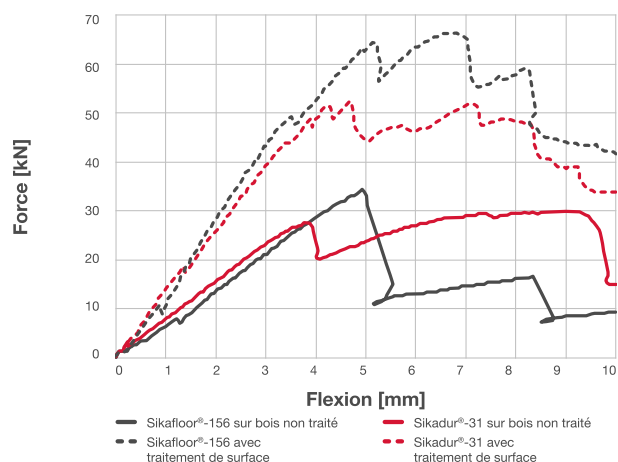
Le projet « Structures porteuses hybrides »¹ a adopté une approche innovante visant à éviter le recours à des armatures en acier dans les dalles en béton. Le principe de base de cette approche consiste à remplacer l'armature inférieure par une couche de lamibois en hêtre, qui absorbe les forces de traction sur la face inférieure de la dalle et fait office de coffrage lors de la construction. Sur ce lamibois en hêtre est appliquée une couche relativement mince de béton, qui absorbe les forces de compression en face supérieure de la dalle ; pour cela, le bois et le béton doivent être reliés entre eux de façon rigide.

Cette technique est déjà utilisée depuis plusieurs années pour la rénovation de bâtiments historiques. En effet, ces dalles hybrides présentent de nombreux avantages par rapport aux planchers traditionnels en bois, notamment une meilleure isolation contre les bruits d'impact, une résistance au feu supérieure et des temps de construction plus courts. Elles ont cependant aussi des inconvénients : assurer une liaison optimale entre le bois et le béton nécessite la mise en place d'un grand nombre de chevilles métalliques très robustes, susceptibles d'entraîner des pics de tension locaux et des risques de corrosion. En outre, les dalles hybrides actuelles conviennent uniquement pour les champs de dalles à contrainte unilatérale, avec des poutres continues en guise d'appuis. Cet inconvénient de taille limite les possibilités de conception architecturale et empêche une mise en œuvre à grande échelle.

Notes et références

1 Projet « Ciments pauvres en clinker »

1.5.3. Coller au lieu de cheviller



Test de flexion 4 points de spécimens de composites bois-béton avec le Sikafloor® 156 et le Sikadur® 31 pour des surfaces de bois traitées et non traitées. Le graphique montre les courbes de référence de 10 mesures. *Source : Projet « Structures porteuses hybrides »*

Afin de pouvoir renoncer aux chevilles métalliques qui posent problème dans les dalles composites bois-béton¹, un système de collage inédit a été développé dans le cadre du projet « Structures porteuses hybrides »². Cette technique est basée sur l'hydrophobisation de la surface du bois avec des polysilanes disponibles dans le commerce afin d'empêcher la colle de pénétrer dans le bois et un adhésif à base de résine époxy. Cette couche adhésive empêche en même temps la pénétration de l'eau interstitielle issue du béton dans le contreplaqué de hêtre.

Afin de mieux comprendre et d'optimiser le comportement porteur de la jonction entre le placage de hêtre et le béton, dans le cadre du projet « Structures porteuses hybrides », de nombreux essais à l'échelle 1 : 1 ont été réalisés avec deux colles différentes sur du hêtre avec et sans traitement préalable. Si les deux types de colle ont permis d'obtenir un comportement porteur comparable, des différences considérables sont apparues selon que la surface des échantillons de bois ait été traitée ou non. Il est ainsi apparu que le traitement préalable contribuait à renforcer la liaison chimique et mécanique. Des essais d'arrachement ont montré que la cassure entre le bois et le béton était friable, car la liaison collée avec de la résine époxy ne favorise pas un comportement ductile à la rupture. Dans la pratique, un comportement ductile serait toutefois un grand avantage.

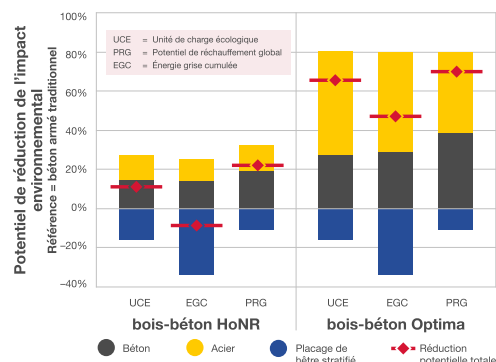
Notes et références

¹ Du bois au lieu de l'acier

² Projet « Structures porteuses hybrides »

Bois # CO₂ / Gaz à effet de serre

1.5.4. 70 % d'émissions de CO₂ en moins



Étude d'impact environnemental d'une dalle composite bois-béton de 1 m² dans le House of Natural Resources (HoNR) et avec le nouveau ciment hautes performances Optima à 40 % de clinker. Une dalle classique en béton armé avec 100 % de ciment Portland a servi d'élément de référence. Source : Projet « Béton à basse énergie »

La poursuite du développement des dalles composites bois-béton¹ dans le cadre du projet « Structures porteuses hybrides »² a donné des résultats surprenants : des analyses de cycle de vie ont révélé que l'utilisation de ciment hautes performances OPTIMA, ne comportant que 40 % de ciment Portland, permettrait de réduire l'énergie grise cumulée (EGC) d'environ 50 % et les émissions de CO₂ d'environ 70 % par rapport à une dalle classique en béton armé. De même, les unités de charge écologique (UCE) sont en baisse d'au moins 60 % selon la méthode de la saturation écologique.

La même équipe de recherche a mis en œuvre et testé dès 2014 les premières dalles composites bois-béton sur le « House of Natural Resources (HonR) »³, un bâtiment de démonstration du campus Höggerberg de l'EPF de Zurich. Un contreplaqué de hêtre de 40 mm d'épaisseur avait alors été utilisé en guise de coffrage et d'armature inférieure. Le béton de couverture, d'une épaisseur de 120 à 160 mm, comportait un peu d'acier d'armature et la liaison entre le bois et le béton était assurée par emboîtement à l'aide d'encoches fraisées dans le bois. Compte tenu de la teneur encore relativement élevée en acier de cette structure, la réduction de l'impact environnemental est nettement inférieure. La poursuite du développement de cette technologie dans le cadre du PNR « Énergie » a par conséquent apporté des améliorations substantielles.

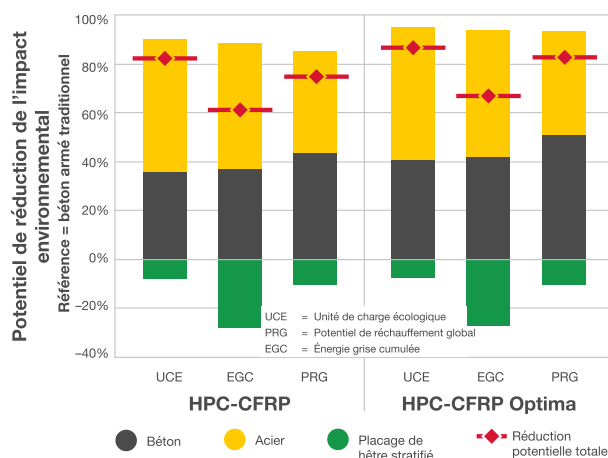
Notes et références

¹ Du bois au lieu de l'acier

² Projet « Structures porteuses hybrides »

³ <https://honr.ethz.ch>

1.5.5. Polymères renforcés de fibres de carbone au lieu de l'acier



Étude d'impact environnemental pour 1 m² de béton précontraint hautes performances à fibres de carbone, avec du ciment hautes performances OPTIMA et une teneur en clinker de 40 %. Le béton armé traditionnel avec 100 % de ciment Portland a servi d'élément de référence. *Source : Projet « Béton à basse énergie »*

Une autre façon d'éliminer complètement l'acier des structures en béton consiste à remplacer l'acier d'armature et de précontrainte par des polymères renforcés de fibres de carbone. Cette technique est utilisée avec succès depuis plusieurs années, notamment pour les éléments en béton précontraints dans un lit de précontrainte et pour le renforcement de structures porteuses existantes en béton. Jusqu'à présent, peu d'attention était toutefois accordée aux aspects environnementaux.

Pour combler cette lacune, une nouvelle génération de poutres précontraintes à fibres de carbone a été développée dans le cadre du projet « Béton précontraint à fibres de carbone »¹. D'une part, des fibres de carbone ultra-résistantes ont été utilisées dans les éléments de contrainte ; d'autre part, de nouveaux mélanges de ciment² ont été utilisés, dans lesquels jusqu'à 60 % du ciment Portland est remplacé par de la poudre de calcaire et du métakaolin. Des essais approfondis à grande échelle, menés en laboratoire, ont montré que ce nouveau mode de conception se traduisait par des capacités de charge plus élevées, des déformations plus faibles et des fissures moins larges que les solutions traditionnelles.

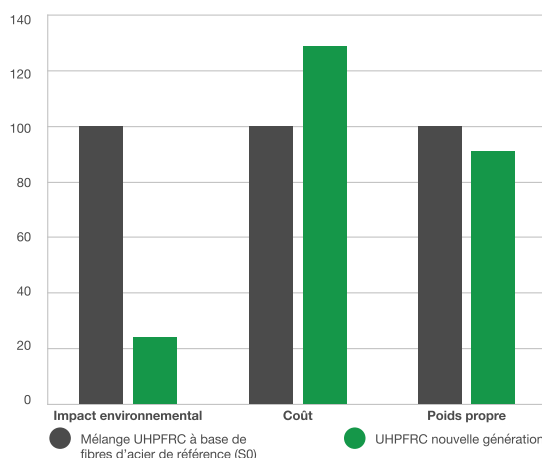
Outre ces avantages mécaniques, les nouvelles poutres en béton précontraint à fibres de carbone procurent aussi des améliorations majeures sur le plan environnemental : par rapport à une poutre traditionnelle en béton armé, le nouveau mode de conception et l'utilisation du mélange de ciment OPTIMA permettent de réduire l'énergie grise de près de 70 % et les émissions de CO₂ d'au moins 80 %.

Notes et références

¹ Projet « Béton avec fibres de carbone précontraintes »

² Du ciment avec moins de clinker

1.5.6. Fibres de polyéthylène au lieu de l'acier



Comparaison de l'impact environnemental, du prix et du poids propre du nouveau béton fibré à ultra-hautes performances et d'un béton classique à base de fibres d'acier. Source : Projet « *Béton à hautes performances* »

Pour certaines applications spéciales, les structures en béton ne sont pas renforcées avec des barres d'acier ou des éléments de contrainte, mais avec des fibres d'acier réparties de manière homogène mais non orientées (longueur env. 35 mm, diamètre env. 0,6 mm, quantité env. 25-35 kg/m³ de béton). Actuellement, le béton à fibres d'acier est avant tout utilisé pour les revêtements de sol fortement sollicités, sous forme de béton projeté dans la construction de tunnels et dans les éléments préfabriqués.

Dans le cadre du projet « Béton à hautes performances »¹, un béton fibré à ultra-hautes performances a été développé. D'une part, les fibres d'acier y sont intégralement remplacées par des fibres de polyéthylène de qualité supérieure ; d'autre part, un ciment hautes performances est mis en œuvre, dans lequel 50 % du clinker est remplacé par de la poudre de calcaire. Le béton armé de fibres de polyéthylène présente une contrainte limite élastique similaire à celle du béton armé de fibres d'acier et satisfait aux exigences de la sorte UA conformément au cahier technique SIA 2052². Ce nouveau béton, qui a déjà fait ses preuves lors de la rénovation du tablier du viaduc de Chillon, connaît un succès croissant en Suisse.

Le béton armé de fibres de polyéthylène affiche toutefois environ 75 % d'énergie grise et environ 10 % de densité de moins que le béton armé de fibres d'acier. En revanche, son prix de marché actuel est supérieur d'environ 30 %.

Notes et références

¹ Projet « *Béton à hautes performances* »

² SIA (2016), Béton fibré ultra-performant (BFUP) – Matériaux, dimensionnement et exécution, Cahier technique SIA 2052 :2016, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich



1.6. Stratégie de conservation optimale

L'utilisation prolongée des structures en béton permet de réduire la moyenne annuelle de l'énergie grise et des émissions de CO₂ associées. Des procédés et des matériaux de construction spécifiques sont nécessaires à cet effet.

1.6.1. Économies grâce à une utilisation prolongée



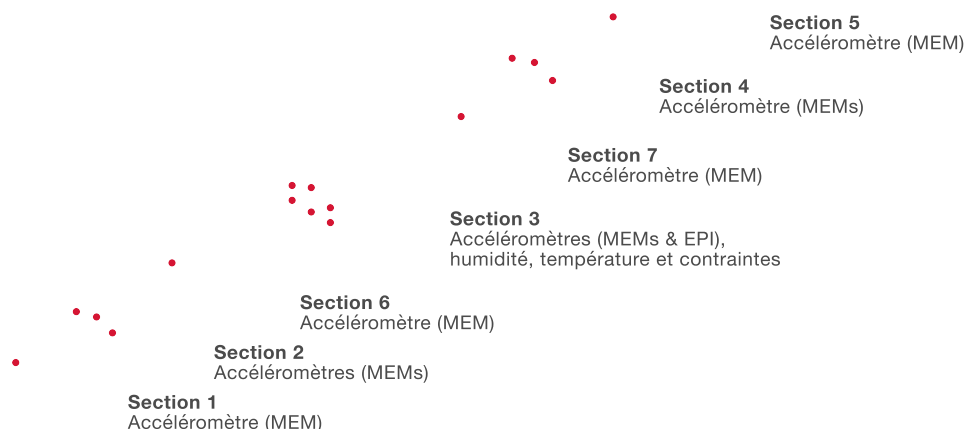
Des économies considérables peuvent être réalisées sur les constructions en les utilisant le plus longtemps possible au lieu de les remplacer par du neuf dès les premiers signes de vieillesse, et ce même si une nouvelle construction aurait un certain nombre d'avantages par rapport à un ouvrage vieillissant. Cette stratégie de temporisation permet d'économiser non seulement de l'argent, mais aussi de l'énergie grise et du CO₂.

Le principe des « économies grâce à une utilisation prolongée » s'applique notamment aux infrastructures telles que les réseaux d'eau et d'assainissement, les réseaux électriques, les lignes ferroviaires, les routes, les ponts, les tunnels, etc., dont les coûts d'exploitation et les émissions sont relativement faibles. Bien entendu, les économies concernent uniquement les coûts et les émissions émanant des ouvrages eux-mêmes et non ceux liés à leur utilisation.

Pour les bâtiments, la situation est quelque peu différente : nul n'ignore que des bâtiments mal isolés et dotés d'équipements techniques obsolètes à base de combustibles fossiles génèrent de fortes émissions de CO₂ et voient leurs coûts d'exploitation augmenter continuellement. C'est pourquoi, il convient de mener une étude globale visant à comparer les coûts d'exploitation, de rénovation énergétique et de démantèlement des bâtiments existants à ceux d'une nouvelle construction.

Afin d'allonger la durée de vie des ouvrages d'infrastructure, une stratégie optimale est nécessaire. Celle-ci doit être fondée sur l'état actuel des structures, sur des prévisions d'évolution de ce dernier, ainsi que sur une vision claire des mesures envisageables dans l'immédiat et à plus long terme.

1.6.2. Nouveaux principes d'un diagnostic clair



Instrumentation d'une demi-travée du viaduc de Chillon. *Source : Projet « Monitoring des constructions en béton »*

En matière d'assainissement ou de rénovation d'ouvrages d'infrastructure, des diagnostics complets et fiables sont décisifs. La responsabilité en incombe aux autorités fédérales, cantonales et communales, mais de plus en plus aussi à des organisations privées, par exemple dans le cadre de partenariats public-privé.

Si les diagnostics étaient autrefois établis sur la base d'inspections et de contrôles visuels, les processus correspondants sont aujourd'hui beaucoup plus complexes et exigeants. Ils emploient par exemple des méthodes de mesure high-tech, des objets intelligents (IdO), des drones, ainsi que de nombreuses technologies informatiques et de communication.

Dans le cadre du projet « Monitoring des constructions en béton »¹, un système de suivi global a été développé et testé dans la pratique lors de la rénovation complète du viaduc de Chillon, édifié entre 1966 et 1969. D'une longueur de 2100 mètres, cet imposant pont routier réalisé selon le principe de la poutre-caisson précontrainte se compose de 23 travées d'une portée comprise entre 42 et 108 mètres. Les problèmes croissants liés aux réactions alcali-siliceuses (ASR) sur le béton et les dommages associés au niveau de la dalle de la chaussée ont rendu nécessaire une réhabilitation complète.

Avant le début des travaux d'assainissement, une des travées a été dotée d'un système de mesure comprenant quatre jauges de contrainte, onze accéléromètres et un capteur de température et d'humidité. Cela a permis de mesurer d'innombrables charges dynamiques, déformations, valeurs de rigidité et données climatiques, qui ont été transmises en ligne à une équipe de l'EPF de Zurich pour être évaluées.



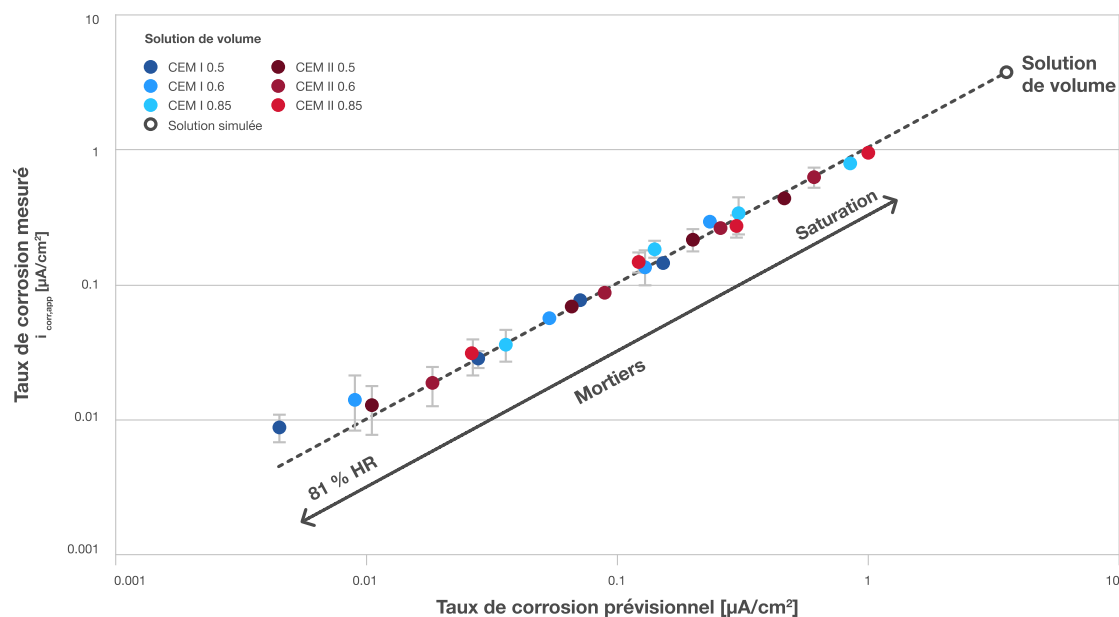
Energie

Programmes nationaux de recherche 70 et 71

Notes et références

1 Projet « **Monitoring des constructions en béton** »

1.6.3. Analyse d'échantillons de matériaux



Courbe de corrosion de l'acier en milieu poreux. Le graphique montre comment le modèle théorique proposé permet de prédire de façon fiable les vitesses de corrosion mesurées. Repère = valeurs moyennes, diagramme de quartiles = écarts types. *Source : Projet « Monitoring des constructions en béton »*

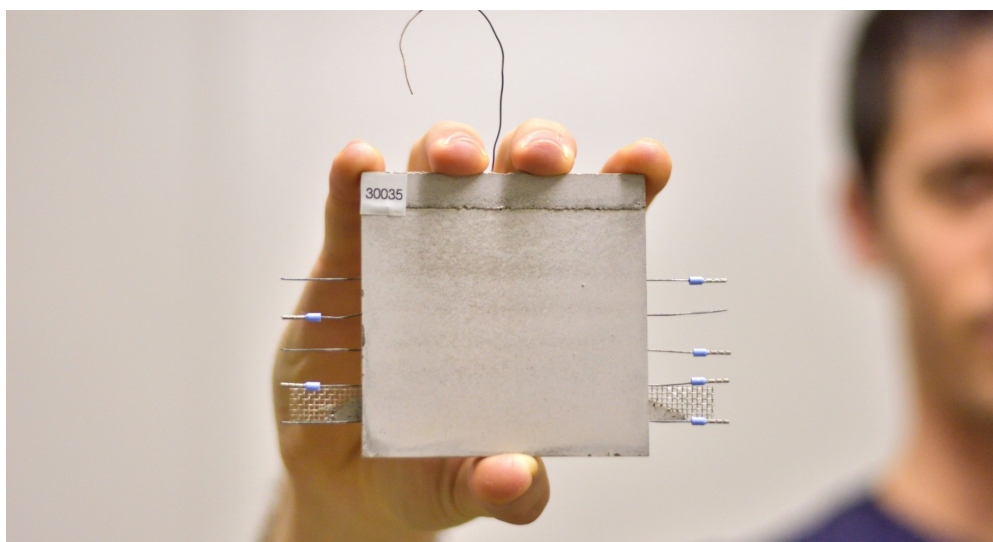
Afin d'interpréter correctement les dommages subis par la chaussée du viaduc de Chillon et de prendre des mesures d'assainissement appropriées, d'innombrables échantillons de matériaux ont été prélevés sur le pont afin d'être analysés en laboratoire. Ceci s'est avéré nécessaire parce que les méthodes habituelles de mesure de la corrosion de l'acier d'armature du béton, telles que la mesure de la résistance ohmique ou le contrôle de la corrosion cathodique, ne donnaient pas de résultats fiables.

Une nouvelle méthode de mesure de la corrosion de l'acier dans le mortier carbonaté a été développée dans le cadre du projet « Monitoring des constructions en béton »¹. L'installation d'essai est un petit échantillon de mortier (8 x 8 x 0,6 cm) muni d'une électrode de référence, de cinq électrodes en fil d'acier normal et d'une contre-électrode en acier inoxydable. Avec une humidité ambiante de 57 % et une teneur en CO₂ de 4 %, ce mince échantillon de mortier permet une carbonatation complète en l'espace d'une semaine. Les mesures visent à déterminer la résistance électrique, le potentiel de corrosion et le taux de corrosion de l'acier, ainsi que la diffusion et la consommation d'oxygène. Ces données permettent d'étudier la corrosion induite par la carbonatation et en particulier sa dynamique. Cela a permis d'établir pour chaque échantillon une corrélation linéaire entre le taux de corrosion et la teneur en eau. Le modèle développé est basé sur deux paramètres : la structure poreuse du mortier et l'humidité ambiante.

Cette approche permet de quantifier de façon fiable l'influence des différents mélanges de béton sur la corrosion de l'acier d'armature. Cette expérience a confirmé que les bétons dont une part substantielle du ciment Portland est remplacée par d'autres liants (CEM II)

n'affichent pas un taux de corrosion significativement plus élevé que ceux avec les mélanges habituels (CEM I). En revanche, les analyses ont également révélé que l'ajout d'additifs d'activation ou d'accélération augmentait considérablement la sensibilité à la corrosion – et ce, proportionnellement au dosage.

Photo du petit échantillon de béton. Il convient de noter l'absence de fissures et de creux à la surface de l'échantillon.



Source : Projet « **Monitoring des constructions en béton** »

Notes et références

1 Projet « **Monitoring des constructions en béton** »

1.6.4. Du diagnostic au traitement



Pour diagnostiquer l'état actuel du viaduc de Chillon, l'ouvrage a fait l'objet de nombreux relevés directement sur la structure ainsi que de tests en laboratoire. Les mesures effectuées ont clairement révélé que les zones endommagées en partie supérieure du pont nécessitaient le démantèlement de surfaces conséquentes et la réalisation d'une nouvelle couche de revêtement. D'une épaisseur de 40 mm, cette dernière a été réalisée avec le nouveau béton à ultra-hautes performances à base de fibres de polyéthylène¹, développé dans le cadre du projet « Monitoring des constructions en béton »². Ce nouveau béton présentant une excellente étanchéité à long terme, il a été possible de renoncer à des travaux d'étanchéité traditionnels. Cela a entraîné des gains de temps et des économies de coûts considérables, ainsi qu'une réduction de l'énergie grise et des émissions de CO₂ par rapport aux valeurs associées à la mise en œuvre d'un béton classique à fibres d'acier.³

Entre-temps, les nouveaux concepts de mesure et de test, ainsi que le nouveau béton fibré à ultra-hautes performances ont été utilisés et analysés plus avant dans d'autres ouvrages. Cela a notamment été le cas lors de la rénovation du pont ferroviaire de Buna en Croatie ou de la transformation de la maison Du Pont, un bâtiment de 8 étages datant de 1913 dans le centre de Zurich, dont les dalles ont été renforcées avec une couche de 4 cm du nouveau béton fibré à ultra-hautes performances.

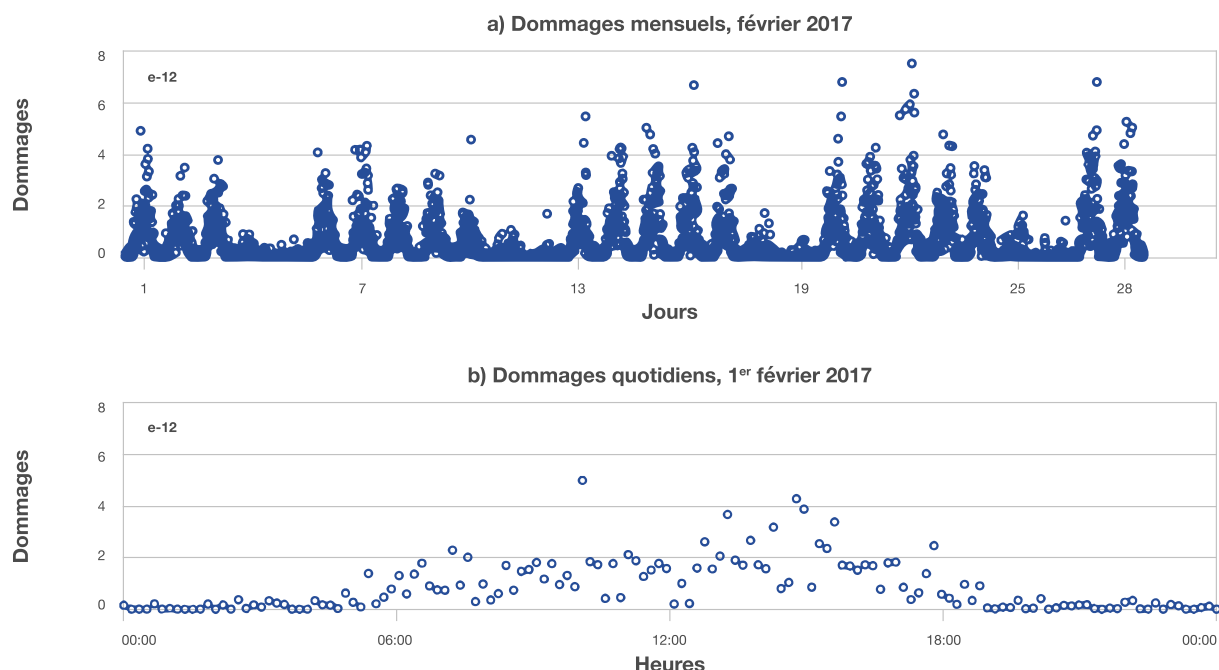
Notes et références

1 **Fibres de polyéthylène au lieu de l'acier**

2 **Projet « Monitoring des constructions en béton »**

3 **Fibres de polyéthylène au lieu de l'acier**

1.6.5. Contrôle a posteriori



Détail des dommages cumulés pour la jauge de contrainte longitudinale : a) par mois et b) par jour. Ces graphiques montrent que les contraintes sont plus importantes les jours ouvrables et aux heures de pointe. *Source : Projet « Monitoring des constructions en béton »*

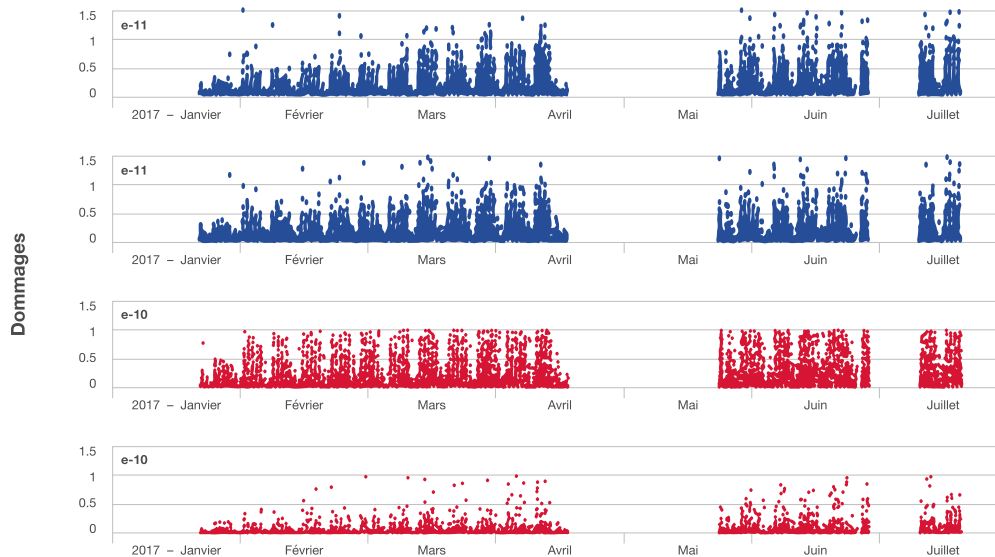
Les matériaux de construction et procédés développés dans le cadre du projet conjoint « Béton à basse énergie » ont conduit à la découverte théorique et à la mise en pratique d'un potentiel inespéré d'économies d'énergie grise et de réduction des émissions de CO₂. En particulier dans les cas où les résultats de ces recherches ont été appliqués à grande échelle à des projets de construction concrets, le comportement à long terme attendu reste toutefois à démontrer.

Les systèmes de mesure installés sur les ouvrages sont indispensables dans cette perspective. Sur le viaduc de Chillon, une première série de mesures a été enregistrée puis évaluée entre mi-mai et fin juin 2017, c'est-à-dire après la fin des travaux d'assainissement. Au moment de la clôture du projet, au printemps 2018, les évaluations étaient toujours en cours. De premiers résultats sont toutefois déjà disponibles, par exemple ceux issus des mesures d'accélération et des fréquences qui en découlent. Ils permettent de se prononcer sur l'état de « santé » du pont et d'éventuels dommages. Les mesures de déformation ont permis de déduire les charges cumulées, un paramètre important pour décrire le comportement porteur effectif en conditions réelles. Ces mesures ont révélé un comportement plausible du pont, dans la mesure où les contraintes étaient plus importantes durant les saisons chaudes, les jours ouvrables et pendant la journée que le reste du temps.

En mai 2018, des équipements de mesure similaires ont été installés sur une autre travée du pont dans le but de pouvoir quantifier le comportement à long terme des mesures de

réhabilitation et leurs effets sur l'ensemble de la structure du pont à l'aide d'indicateurs spécialement définis à cet effet. Les résultats ne sont pas encore disponibles.

Estimation des contraintes ou dommages accumulés à l'aide des jauges de contrainte longitudinales (en bleu) et transversales (en rouge).



Source : Projet « Monitoring des constructions en béton »

1.7. Actions requises

1.7.1. Actions requises en matière de recherche et de développement



Une partie des recherches du projet conjoint « Béton à basse énergie » s'apparente à de la recherche fondamentale avec un faible degré de maturité technologique. Des efforts sont par conséquent encore nécessaires en matière de recherche et de développement.

À titre d'exemple, l'activateur mis au point en laboratoire pour améliorer l'ouvrabilité et la résistance initiale du béton à faible teneur en clinker – le superplastifiant – doit être développé et rendu commercialisable par des entreprises spécialisées en chimie du bâtiment.¹ La carbonatation accélérée du béton à faible teneur en clinker par rapport au béton normal à base de ciment Portland doit elle aussi être étudiée et maîtrisée davantage^{2,3} afin que ces types de béton durables puissent également être utilisés sans risque de corrosion lorsque l'humidité relative dépasse 80 %.

Dans le cas des dalles composites bois-béton⁴, le recours à une liaison collée doit améliorer la ductilité de transmission des forces de cisaillement entre le panneau de hêtre et le béton de couverture. Pour les poutres fibrées précontraintes⁵, il est capital d'augmenter la résistance au cisaillement entre les éléments de contrainte en fibres de polyéthylène et le béton.

Une fois que ces défis auront été relevés sur le plan pratique et économique, les nouveaux matériaux et structures pourront être mis en œuvre sur le marché à grande échelle.

Notes et références

1 Projet « Ciments pauvres en clinker »

2 Projet « Ciments pauvres en clinker »

3 Analyse d'échantillons de matériaux

4 Projet « Structures porteuses hybrides »

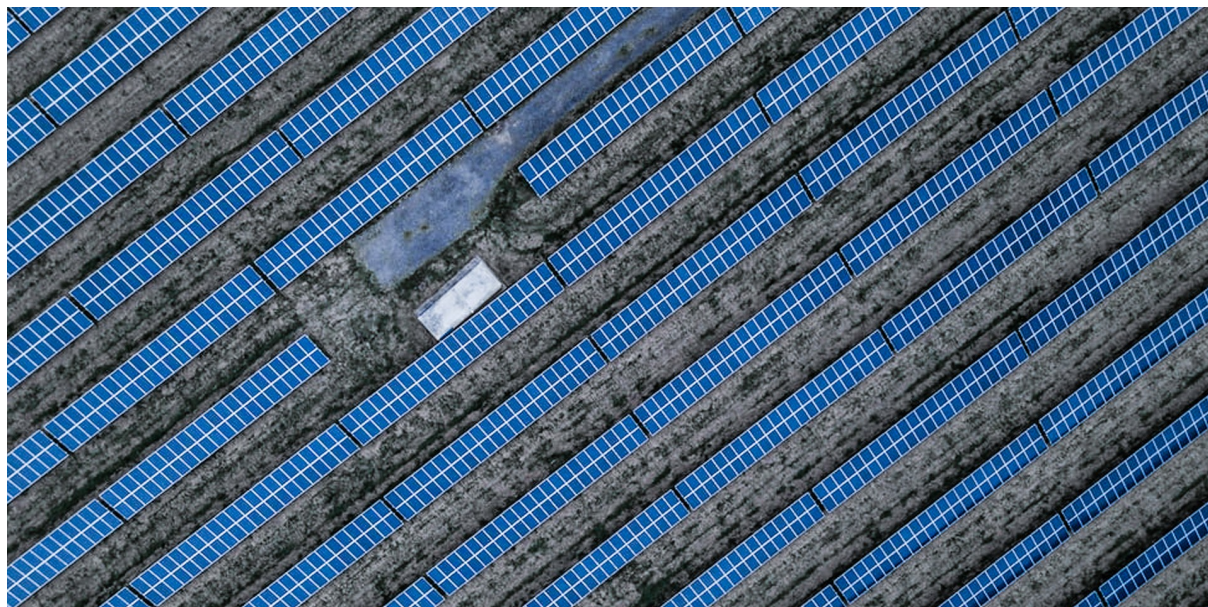


Energie

Programmes nationaux de recherche 70 et 71

5 Projet « Béton avec fibres de carbone précontraintes »

1.7.2. Actions requises dans la pratique



Malgré le faible degré de maturité technologique des matériaux de construction, des structures et des procédés développés dans le cadre du projet conjoint « Béton à basse énergie », un certain nombre d'actions sont déjà requises dans la pratique. Celles-ci concernent avant tout les aspects suivants :

Objets pilotes et de démonstration

Si le fonctionnement d'une nouveauté peut être démontré à l'échelle 1 : 1, celle-ci sera davantage susceptible d'être acceptée par les maîtres d'ouvrage, les architectes, les ingénieurs et les entrepreneurs. Ce constat s'applique également à la construction durable et à l'ensemble des mesures innovantes de réduction de l'énergie grise et des émissions de CO₂. C'est pourquoi, pour accélérer la transposition dans la pratique des résultats de recherche du projet conjoint « Béton à basse énergie », des objets pilotes et de démonstration sont nécessaires.¹

Préservation du bâti

Le remplacement ou le remaniement approfondi d'ouvrages existants mobilise beaucoup d'énergie grise et génère des émissions de CO₂ considérables. C'est pourquoi, la nécessité et la pertinence des mesures prévues doivent faire l'objet d'un examen professionnel et leur mise en œuvre doit être reportée aussi longtemps que possible. Afin de prendre des décisions optimales, des informations fiables doivent être disponibles concernant l'état actuel et l'évolution de la structure du bâtiment ; des inspections visuelles et quelques prélèvements de béton par carottage ne sont pas suffisants.²

Connaissances et compétences

Les architectes, les ingénieurs et les entreprises exécutantes adoptent uniquement de nouveaux matériaux, structures et procédés de construction s'ils les connaissent et se sentent en mesure de les mettre en œuvre correctement. En clair, sans les connaissances et les



compétences appropriées, les mesures innovantes visant à réduire l'énergie grise et les émissions de CO₂ ne sont appliquées que de manière très timide. Il y a par conséquent un besoin urgent d'information et de formation.³

Notes et références

- 1 Projet « Béton à basse énergie »
- 2 Projet « Monitoring des constructions en béton »
- 3 Projet « Béton à basse énergie »

1.8. Les propriétaires de bâtiments sont invités à agir

1.8.1. Les acteurs concernés



En ce qui concerne la mise en application pratique des derniers résultats des recherches menées dans le cadre du projet conjoint « Béton à basse énergie », les acteurs majeurs suivants sont déterminants :

Propriétaires de bâtiments

Le choix des matériaux et des technologies de construction utilisés relève avant tout des propriétaires des bâtiments, qui peuvent être des particuliers, des organisations, des entreprises ou le secteur public. En règle générale, les décisions sont prises sur la base des recommandations des architectes et des ingénieurs.

Planificateurs et entrepreneurs

Les architectes, ingénieurs et entrepreneurs mandatés par le client sont tout aussi importants car ils doivent faire confiance aux nouveaux matériaux, structures et procédés et les utiliser dans leurs projets de construction.

Associations

Les associations professionnelles jouent un rôle essentiel en matière d'information et de formation continue de leurs membres, ainsi que dans l'élaboration de leurs propres normes.

Par conséquent, les recommandations de la synthèse conjointe « Constructions durables en béton » s'adressent en priorité à ces trois groupes d'acteurs.

Propriétaires d'immeubles

1.8.2. Encourager les projets de démonstration !



NEST, bâtiment modulaire de recherche et innovation de l'Institut fédéral suisse des sciences et technologies de l'eau et du Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche. *Source : Roman Keller*

Les propriétaires de bâtiments et d'ouvrages d'infrastructure soutiennent l'utilisation de béton à faible teneur en clinker et de structures en béton sans inserts en acier, et ils partagent leurs expériences.

Que ce soit pour une construction neuve, une transformation ou une rénovation, les maîtres d'ouvrage encouragent l'utilisation de matériaux, de structures et de procédés de construction impliquant le moins d'énergie grise et d'émissions de CO₂ possible. Ils apportent ainsi une contribution substantielle à la durabilité de leurs bâtiments. En rendant compte de ces objets de démonstration et des expériences réalisées, ils favorisent une mise en pratique rapide des résultats de recherche.

Propriétaires d'immeubles

1.8.3. Un diagnostic professionnel des ouvrages est indispensable !

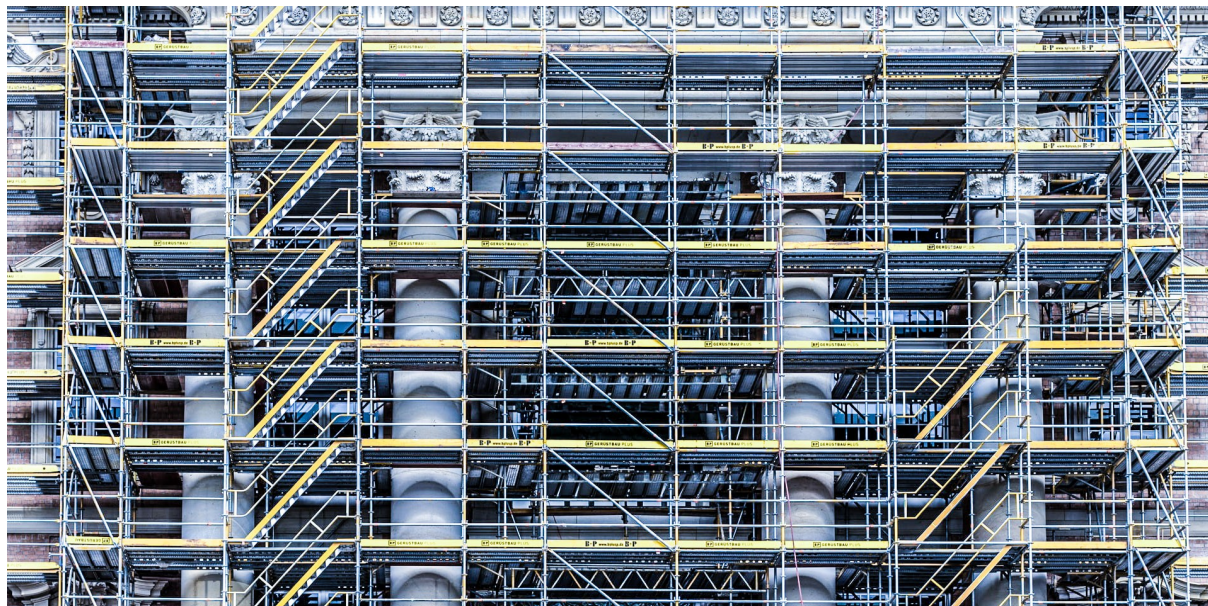


Les propriétaires de bâtiments et d'ouvrages d'infrastructure sont convaincus de la valeur ajoutée d'un diagnostic professionnel des constructions.

S'ils sont soigneusement entretenus, les bâtiments peuvent être utilisés plus longtemps. « Soigneusement » ne signifie pas qu'il faut un entretien maximum, mais qu'il convient de réaliser les interventions nécessaires au bon moment. Afin de satisfaire à cette exigence, des contrôles périodiques conduisant à des diagnostics professionnels sont indispensables. Grâce à ces informations pertinentes, les propriétaires d'immeubles peuvent économiser beaucoup d'argent en évitant des rénovations excessives et des remplacements prématurés.

Propriétaires d'immeubles

1.8.4. Préférer une rénovation économique à une démolition !



Les propriétaires de bâtiments et d'ouvrages d'infrastructure examinent de manière approfondie la nécessité et la pertinence des deux options que sont l'entretien et le remplacement et, en cas de doute, se prononcent en faveur d'une rénovation économique.

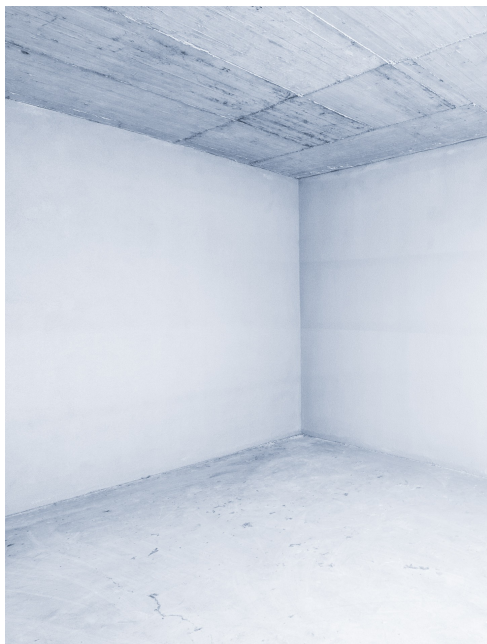
Pour les propriétaires de bâtiments durables, des rendements potentiellement plus élevés et le déficit de modernité des constructions ne sont plus des raisons suffisantes pour leur démolition et leur remplacement. Une analyse globale montre rapidement que l'option du remplacement est associée à une mobilisation d'énergie grise et des émissions de CO₂ supérieures à la moyenne, alors que l'option de la rénovation affiche un bilan bien meilleur, surtout si les matériaux, les structures et les procédés de construction développés dans le cadre du projet conjoint « Béton à basse énergie » sont mis en œuvre.¹

Notes et références

¹ Synthèse « Bâtiment et aménagement »

Propriétaires d'immeubles

1.8.5. Utiliser du béton pauvre en clinker à l'intérieur des bâtiments !



Convaincus par le béton à faible teneur en clinker, les architectes et les ingénieurs l'utilisent autant que possible dans les environnements secs, en particulier à l'intérieur des bâtiments.

En règle générale, ce sont les ingénieurs civils qui précisent la formulation du béton à l'entrepreneur. Ce dernier peut toutefois rejeter cette recommandation et proposer une alternative ou en transférer la responsabilité au client via une notification. En tant que responsable global de l'ouvrage, l'architecte peut lui aussi s'opposer à l'emploi de solutions inédites. Il est par conséquent crucial que les planificateurs et les entrepreneurs fassent confiance aux solutions innovantes, se forment en conséquence et aient le courage de les mettre en œuvre.

Propriétaires d'immeubles

1.8.6. Employer des matériaux de construction durables pour la rénovation !



Les architectes et les ingénieurs connaissent les propriétés d'exception du nouveau béton fibré à ultra-hautes performances à base de fibres de polyéthylène et l'utilisent dès lors que son emploi est pertinent.

Le béton fibré à ultra-hautes performances à base de fibres de polyéthylène a atteint la maturité commerciale et a déjà été utilisé avec succès à plusieurs reprises. Il combine tous les avantages du béton conventionnel à base de fibres d'acier et, fabriqué à base de ciment OPTIMA, il se distingue par une réduction d'environ 70 % de l'énergie grise et de 80 % des émissions de CO₂. Le surcoût d'environ 30 % par rapport au béton à base de fibres d'acier est en partie compensé par la densité inférieure de 300 kg. Les architectes et les ingénieurs sont conscients de ces avantages et utilisent avant tout ce matériau de construction pour la rénovation des dalles de plancher et des tabliers de pont, ainsi que pour la production de revêtements de sol fortement sollicités et d'éléments préfabriqués en béton dans les tunnels et en extérieur.

Associations et ONG

1.8.7. Encourager l'information et la formation continue !



Les associations professionnelles informent leurs membres sur l'énergie grise et les émissions de CO₂ générées lors de la construction, de la rénovation et du démantèlement de bâtiments et d'ouvrages d'infrastructure, et leur proposent une formation continue dans ce domaine. Le cas échéant, elles se chargent au plus tôt de mener des travaux de normalisation.

Les associations professionnelles sont tenues de tenir leurs membres au courant des dernières connaissances en matière d'architecture. C'est donc à elles qu'il incombe en premier lieu de proposer des informations et des formations continues sur les questions d'énergie grise et d'émissions de CO₂, ainsi que sur les nouvelles solutions techniques pour la construction, la rénovation et le démantèlement de bâtiments et d'ouvrages d'infrastructure. Les associations professionnelles qui sont également actives dans le domaine de la normalisation doivent répondre au plus tôt aux besoins identifiés en la matière.