

Béton bas carbone : Introduction aux enjeux modernes de l'industrie du béton

Culture Sciences
de l'Ingénieur

Antoine MARLOT - Xavier JOURDAIN - Hélène HORSIN MOLINARO

Édité le
21/02/2022

école _____
normale _____
supérieure _____
paris-saclay _____

Élève de l'ENS Paris-Saclay, Antoine Marlot, lors de sa première année en Sciences pour l'Ingénieur (année SAPHIRE) a suivi le parcours « Ingénierie civile ». Dans ce cadre les élèves ont, sur un thème imposé, à réaliser un état de l'art, un mémoire et à présenter une courte leçon. Trois articles sont issus de ce dossier.

Les bâtiments représentent 40 % de la consommation d'énergie dans le monde et 35 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) dans les pays développés. Ces valeurs sont élevées en raison de la désindustrialisation de ces pays [1]¹.

La répartition de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre dans les bâtiments en béton a été évaluée à 30 % au cours de la phase de construction, 70 % en phase d'utilisation et de maintenance, et 1 % lors de l'étape de démolition [1]. Néanmoins, l'utilisation d'un bâtiment sur le long terme est difficile à contrôler. Elle dépend d'un grand nombre de variables tel que le comportement des occupants. De nombreux leviers sont alors étudiés pour agir lors de la construction : la conception optimisée, les matériaux bas carbone, la mixité des matériaux, l'économie intelligente de matériaux, la réduction des déchets, la réhabilitation des déchets de chantier de construction et de démolition, etc.

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Actuellement, la consommation de béton est d'environ **1 tonne par an pour chaque être humain**. Les êtres humains ne consomment aucun autre matériau dans ces quantités à l'exception de l'eau. La production du ciment est responsable d'environ 7% des émissions mondiales de gaz à effet de serre selon l'Association mondiale du ciment et du béton² (GCCA). « C'est plus que les émissions de l'ensemble de l'Union européenne ou de l'Inde, juste derrière celles de la Chine et des USA », indique à l'AFP Valérie Masson-Delmotte, paléoclimatologue et co-présidente d'un groupe d'experts climat de l'ONU. Certains parlent donc du troisième « pays » des émissions de gaz à effet de serre [2].

C'est pourquoi même de petites réductions d'émissions de gaz à effet de serre par tonne de béton produit peuvent avoir un impact mondial significatif.

Cet article présente un bilan des émissions de gaz à effet de serre (éq CO₂) lors de la production de béton, les impacts sur le bilan carbone et les caractéristiques du béton ainsi que les enjeux de nouvelles formulations par optimisation du squelette granulaire, du ciment, de la formule globale et enfin des choix de construction.

¹ Cet article est largement basé sur le livre de A. Nazari et J.G. Sanayan intitulé *Handbook of Low Carbon* [1] publié en 2018. Ce recueil de plusieurs centaines d'articles scientifiques permet au lecteur une compréhension globale des techniques permettant la réduction des émissions de dioxyde de carbone liées à la fabrication de béton.

² L'Association mondiale du ciment et du béton (GCCA) regroupe les principaux acteurs du secteur, dont le groupe suisse Holcim (ex Lafarge-Holcim), le groupe mexicain Cemex ou encore le groupe chinois CNBM.

L'article « Substitution partielle des ciments Portlands » [3] expose des modifications de la composition du ciment par substitution d'une partie du clinker dans le ciment Portland par des matériaux cimentaires supplémentaires. Un dernier article traite des « Bétons auto-activés » [4].

Un glossaire et un récapitulatif des sigles utilisés se trouvent page 16.

1 – Émissions de gaz à effet de serre dans la production du béton

Pour comprendre les options envisagées par la recherche, il est important de faire un bilan de la pollution émise lors de la fabrication du béton. L'analyse effectuée dans les paragraphes suivants se veut générale. Il est clair que les émissions dues à la production de béton sont fonction de divers paramètres contextuels tels que le mix énergétique du pays concerné, la modernité de l'installation cimentière, la modernité des moyens de transports utilisés, la formulation du béton, etc. De plus, une analyse de cycle de vie dépend fortement de la définition et des frontières déterminées à notre système. Ainsi, **les chiffres ne sont fournis qu'à titre d'ordre de grandeur.**

Un mètre cube de béton ordinaire est composé d'environ 1850 kg de granulats (sable pour les diamètres inférieur à 6 mm et graves pour les plus gros), 350 kg de ciment de type Portland (environ 60 à 70 % de calcaire, 30 à 40 % d'argile cuit dans un four puis broyé et un peu de gypse) et d'environ 200 L d'eau. Pour une information complète sur la composition du béton, on pourra se reporter à l'article « Formulation d'un béton ordinaire » [5].

1.1 - Émissions liées aux granulats

1.1.1 - Les sables

Le processus d'extraction et d'utilisation du sable apparaît relativement bien établi. L'énergie utilisée par les transporteurs et les équipements de pompage et calibrage est polluante mais représente une part faible dans l'ensemble du processus de fabrication du béton. La raréfaction du sable est un enjeu majeur non abordé dans le cadre des émissions de carbone. Néanmoins, le transport sur de longues distances du sable à cause de sa raréfaction (moins de 5% du sable sur terre peut être utilisé pour le béton, les sables éoliens présents dans les déserts par exemple sont composés de particules trop fines et lisses) pourrait prochainement le faire entrer dans le cadre de cette étude.

1.1.2 - Les graves

Le processus de concassage par son utilisation importante d'énergie électrique est la source majeure de pollution d'utilisation des graves. Les solutions adéquates proposées dans la littérature sont un placement intelligent des explosifs pendant le processus de dynamitage initial, qui permet de fragmenter la roche en de plus petits morceaux avant de la concasser, ou l'entretien ou/et le remplacement des équipements de concassage qui sont parfois très anciens.

1.2 - Émissions liées à la fabrication des ciments de type Portland³ et à leur transport

Le schéma figure 1 résume le processus industriel de fabrication du ciment.

³ Ciments de type CEM1 selon la norme EN 197-1 composés de 95% de clinker (K)

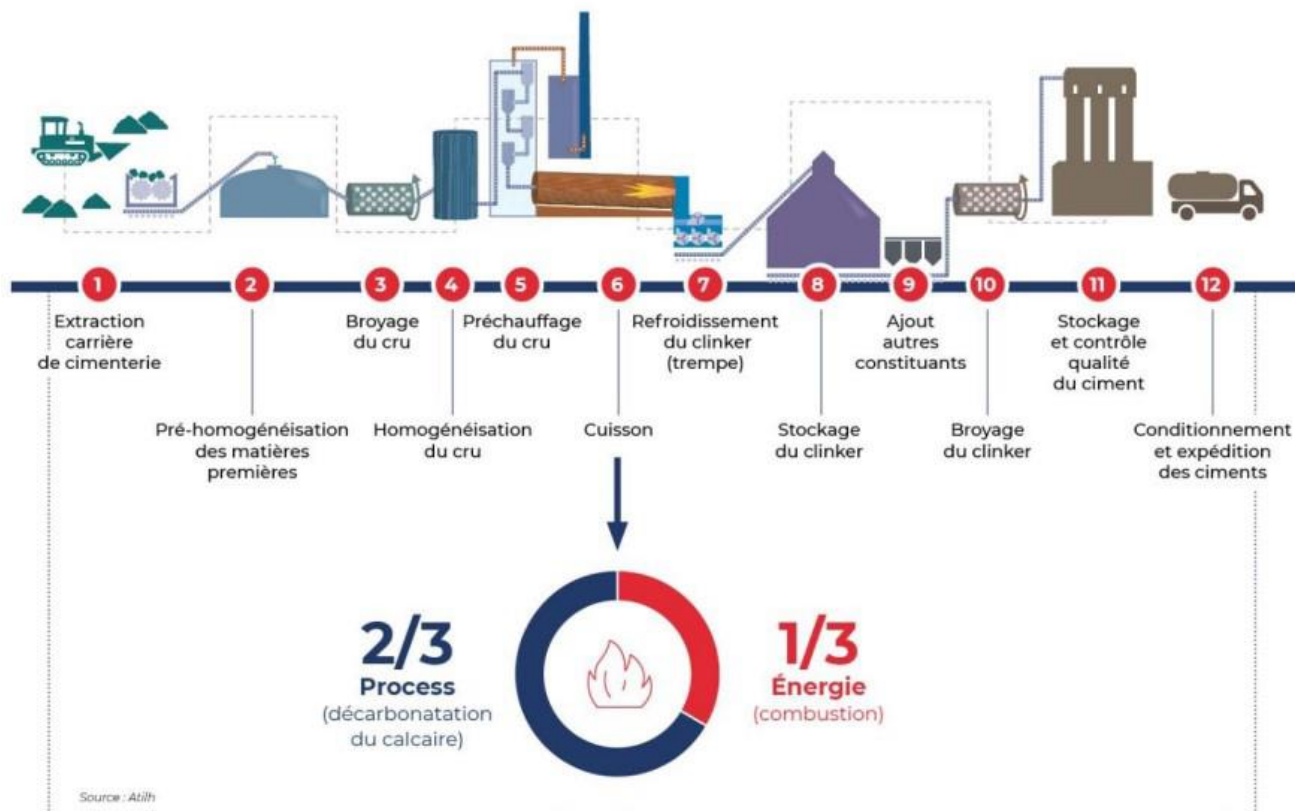


Figure 1 : Process industriel du ciment et répartition des émissions de CO₂ - France, source [6]

L'origine des émissions de gaz à effet de serre provient principalement de la **décarbonation du calcaire et du processus de combustion** (voir section 1.2.2 - Procédé). Les proportions indiquées sont celles de l'industrie cimentière française. Le mix énergétique en France pour la production électrique est particulièrement peu carboné par l'utilisation de l'énergie nucléaire.

Les proportions calculées dans les paragraphes suivants sont donc différentes car la production d'électricité est plus polluante dans la plupart des autres pays.

1.2.1 - Combustibles des fours et électricité

Pour une tonne de ciment produite, 100 kg (10 % de la masse produite) de carburant et 110 kWh d'électricité sont utilisés en moyenne dans le monde [1]. En cherchant les valeurs de la production d'électricité annuelle mondiale (3000 TWh [7]) et de la production annuelle moyenne de ciment (3,5 milliards de tonnes [8]), il apparaît que la production de ciment représente 10 % de la consommation électrique mondiale.

L'utilisation de combustibles et dans une moindre mesure d'électricité correspond ainsi à environ **30 % des émissions de gaz à effet de serre liées au béton dans le monde**.

Le procédé actuel le plus économe en énergie est la voie dite « sèche ». Les matières premières sont dosées et homogénéisées à sec et introduites en tant que poudre dans le four. Le remplacement de la voie « humide » par la voie « sèche » est maintenant acté dans les pays développés. La voie « humide » permettait une meilleure homogénéisation mais était très énergivore.

L'utilisation de gaz en remplacement du charbon ou de pétrole est aussi plébiscitée car son utilisation en tant que combustible émet moins de gaz à effet de serre que les autres carburants.

Finalement, l'énergie consommée lors de la fabrication du ciment est responsable de l'émission d'environ 0,4 tonne de dioxyde de carbone par tonne de béton produit [1].

1.2.2 - Procédé

Les ciments Portland sont composés de 30 % d'argile (silice et alumine), de 70 % de calcaire, et d'oxyde de fer dans le mélange initial. La fabrication des ciments Portland est basée sur la transformation du calcaire en chaux vive par décarbonatation, sa clinkérisation, une trempe à l'air et un broyage. Enfin, des adjuvants sont ajoutés pour régulariser la prise⁴.

Équation chimique de transformation des pierres calcaires en chaux vive :



Aussi, cette réaction chimique est à l'origine de l'émission de 0,5 tonne de dioxyde de carbone par tonne de béton produit [1]. **Cette réaction chimique est alors la source de 35 % des émissions de dioxyde de carbone liées à la production du béton.**

Dans la littérature, il est souvent cité que la production du ciment émet environ 0,9 tonne de dioxyde de carbone par tonne de béton [1].

1.3 - Bilan des sources d'émissions de gaz à effet de serre

Les quantités de gaz à effet de serre données sont celles liées à la production d'une tonne de béton.

Source de pollution	Émissions de GES en t eqCO ₂ .t ⁻¹	Émissions de GES en %
Adjuvants	5 × 10 ⁻⁴	<< 1 %
Dosage	1 × 10 ⁻³	< 1 %
Béton mis en lots	1 × 10 ⁻³	< 1 %
Pompage, vibration et finition	3 × 10 ⁻³	< 1 %
Transport	3 × 10 ⁻³	< 1 %
Sables	1 × 10 ⁻²	1 %
Graves	5 × 10 ⁻¹	35 %
Ciment	9 × 10 ⁻¹	63 %

Tableau 1 : Source d'émissions de gaz à effet de serre, source [1]

Les émissions générées par le béton (tableau 1) proviennent ainsi quasiment exclusivement des émissions émises par la transformation des graves et lors de la fabrication du ciment. Cet article se concentre sur la modification de ce dernier processus.

Finalement, le bilan de l'industrie du béton dans le monde est le suivant : **7% du dioxyde de carbone rejeté dans l'atmosphère par l'homme est due à la consommation de béton.**

1.4 - Feuille de route de la filière ciment

En France, le ministère de l'économie, des finances et de la relance a communiqué les solutions envisagées et les objectifs de la filière ciment à l'horizon 2030 et 2050 (figure 2) [6].

⁴ Solidification d'un fluide visqueux

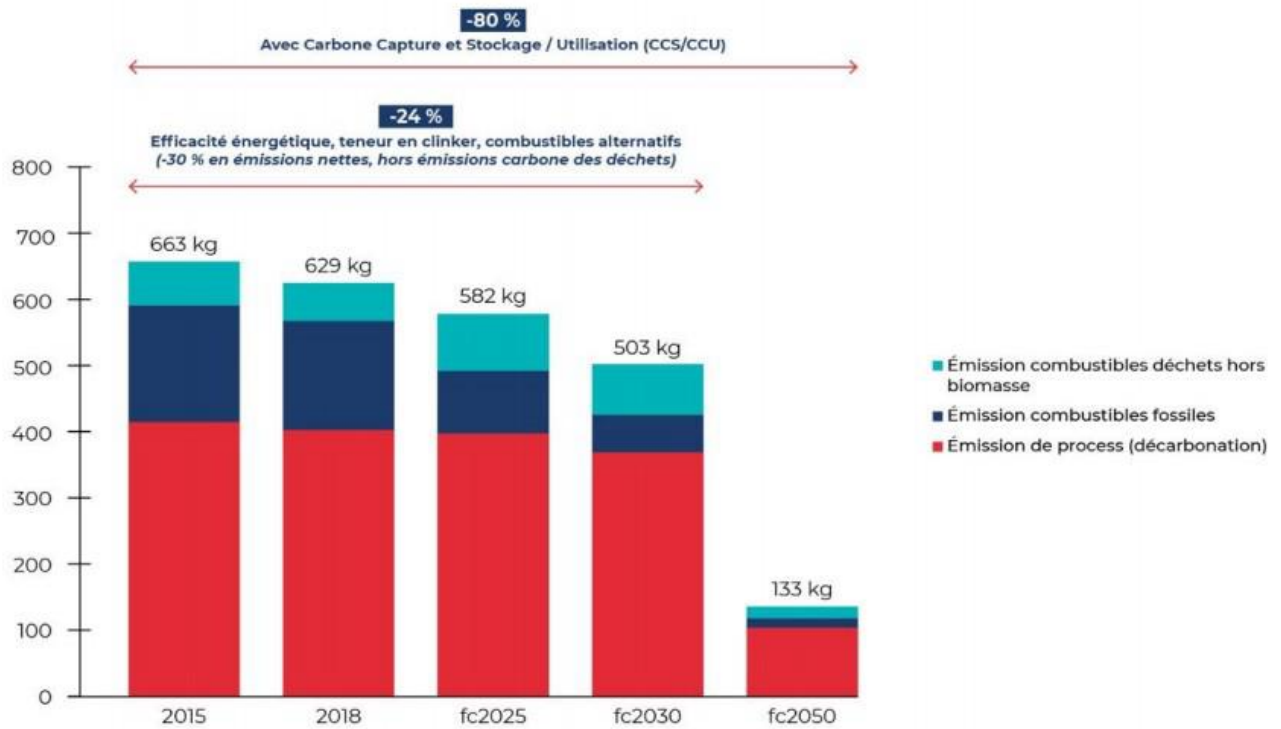


Figure 2 : Évolution des émissions de dioxyde de carbone du secteur cimentier en France, source [6]

Les leviers proposés par le ministère sont les suivants (figure 3) :

1. L'amélioration de l'efficacité énergétique (réduction de 4 % pour les GES) en modifiant les procédés d'obtention ;
2. L'utilisation des combustibles alternatifs (réduction de 12 % pour les GES) ;
3. L'utilisation de ciments à plus faible teneur en clinker ou de ciments alternatifs (réduction de 17 % pour les GES) ;
4. Le captage, transport et stockage ou utilisation du carbone (réduction de 47 % pour les GES).

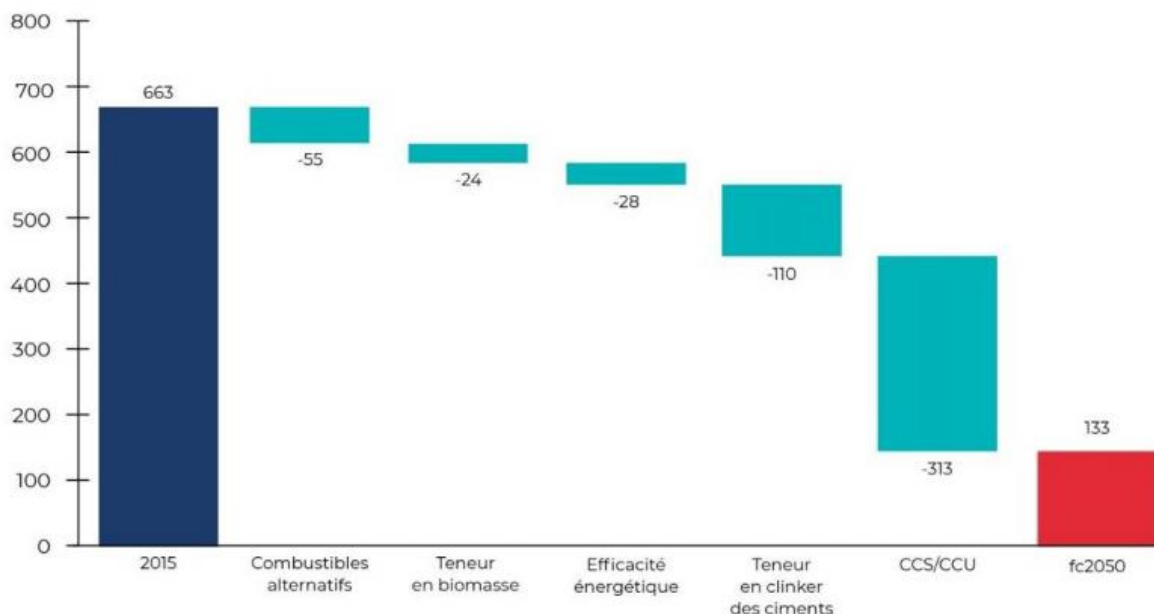
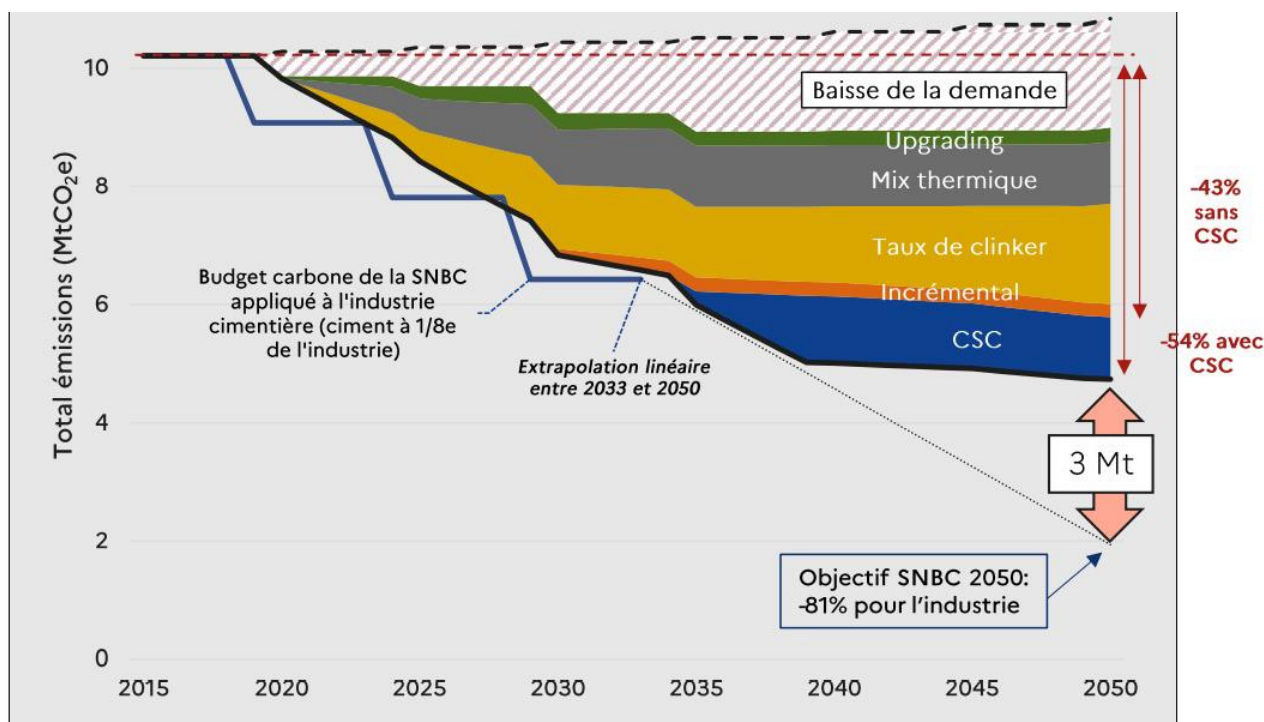


Figure 3 : Leviers de réduction des émissions de CO₂ en France [kgCO₂t⁻¹] - objectifs, source [9]

De plus, le niveau de demande peut être un facteur important de diminution. L'objectif est ainsi de réduire de 10 % les émissions de dioxyde de carbone de l'industrie cimentière. Les solutions possibles sont une meilleure gestion des bâtiments, davantage de rénovations et une durabilité des constructions améliorées.

Néanmoins, il y a des écarts importants entre les objectifs quantifiés sur la figure 3 et les prévisions de la figure 4 réalisée par l'ADEME⁵ et publiée dans le plan de Transition Sectoriel de l'industrie cimentière. Cet établissement prévoit au mieux une réduction de 50 % en 2050 dont 10% dus à la baisse de la demande.



Cet article se concentre par la suite sur la modification du liant entrant dans la composition du béton.

2 – Enjeux des nouvelles formulations de béton

Un processus d'optimisation des mélanges se dégage dans la recherche ainsi que dans l'industrie cimentière. La plupart des solutions énoncées dans cette section ne sont pas révolutionnaires. D'un point de vue économique, c'est le ciment qui coûte cher et les producteurs de béton ont toujours cherché à en mettre le moins possible dans leur formulation. Il s'agit néanmoins de questionner les formulations usuelles pour les améliorer, cette fois-ci du point de vue écologique et non financier.

2.1 - Optimisation du squelette granulaire

Dans le cadre d'un projet de fabrication d'une dalle de béton, une optimisation de la quantité de ciment a permis par exemple une réduction de l'utilisation de ciment d'environ 40 % en masse. La quantité de ciment utilisée était alors inférieure à la valeur minimale acceptée par certains pays occidentaux et nécessitait une autorisation particulière.

Pour compenser cette réduction, la teneur en poudre, par exemple par l'utilisation de métakaolin, a été augmentée de 100 kg.m^{-3} (augmentation de l'ordre de 100 %). Des essais en laboratoire ont montré que la dalle avait des caractéristiques mécaniques et une maniabilité suffisante. De plus, un temps de malaxage plus court était nécessaire [1].

⁵ ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

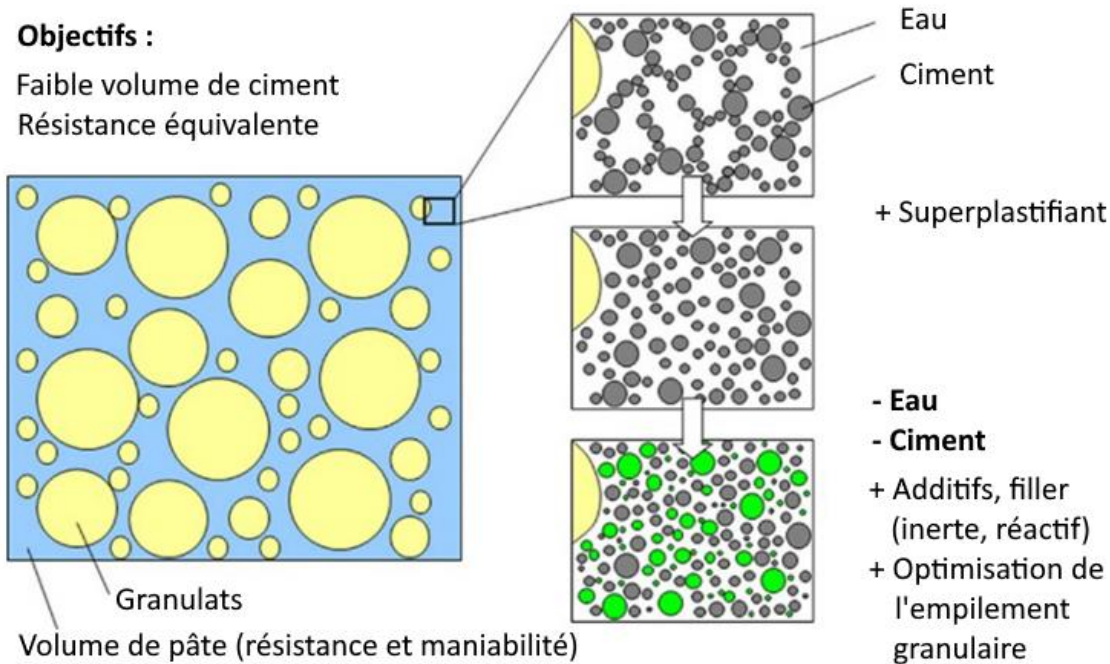


Figure 5 : Mécanisme de réduction du besoin en ciment, source [1]

Les schémas ci-dessus expliquent le rôle des poudres pour compenser la quantité de ciment. Usuellement, le ciment permet à la fois de former la pâte cimentaire et d'augmenter la compacité du béton. **Le ciment ne réagit alors pas intégralement.**

Les fillers servent à remplir la porosité engendrée par l'empilement granulaire avant d'y ajouter le ciment. Un squelette granulaire optimal implique une compacité plus grande et permet ainsi d'augmenter la résistance avec une moindre dépendance au ciment. De plus, l'utilisation d'un matériau broyé finement, donc avec une surface spécifique plus importante, engendre une meilleure réactivité du squelette granulaire. Le ciment a alors "uniquement" le rôle de liant et réagit en plus grande proportion.

Cette technique est utilisée pour réaliser des bétons à hautes performances, BHP (45 MPa à 60 MPa).

Différentes études ont montré que l'utilisation de fillers **augmente la maniabilité du béton**. La maniabilité est proportionnelle à $(C+E)$, la somme des dosages massiques en eau (E) et en ciment (C). L'utilisation de fillers permet alors par exemple de diminuer le dosage en eau, donc d'augmenter le rapport $\frac{C}{E}$ et ainsi d'améliorer la résistance du béton [10].

Néanmoins, lorsque le rapport du dosage en poudre sur le dosage en eau est trop faible (de l'ordre de 0,25), le malaxage est impossible. Le **phénomène de floculation** est important, les granulats s'agglomèrent pour former des particules plus grosses.

C'est pourquoi le dosage en addition minérale telles que les fillers est limité par l'intermédiaire du rapport $\frac{A}{A+C}$ où A est le dosage en addition minérale. Par ailleurs, le ciment et les additions minérales sont couramment appelés liant équivalent [11].

L'influence de la taille et du type de plus gros granulats est aussi étudiée dans la recherche pour l'objectif double de diminuer la quantité de ciment et de diminuer les émissions de gaz à effet de serre dues à l'utilisation des graves.

2.2 - Optimisation du ciment

Dans l'industrie, cette optimisation est spécifiquement basée sur l'utilisation de matériaux cimentaires supplémentaires. Ceux-ci sont détaillés dans l'article « Substitution partielle des ciments Portlands » [3] qui présente une étude déterminant le taux de substitution idéal des ciments Portland par des matériaux cimentaires supplémentaires pour obtenir la résistance en compression souhaitée.

Dans la recherche, d'autres technologies sont étudiées. Celles-ci sont présentées dans l'article « Bétons auto-activés » [4].

2.2.1 - Cadre de l'étude [10]

L'effet des matériaux cimentaires supplémentaires sur le béton est étudié sur une base de données comprenant plus de 5000 formulations effectuées en laboratoires et 4000 formulations effectuées dans le milieu industriel.

Le taux de substitution des matériaux cimentaires supplémentaires dans les échantillons de laboratoire variait entre 3 % et 70 % pour les cendres volantes siliceuses, entre 3 % et 80 % pour les laitiers de haut fourneau, et entre 3 % et 40 % pour les fumées de silice. La résistance en compression variait entre 7 et 170 MPa. Le dosage en ciment (ou masse spécifique du ciment) variait entre 50 et 1400 kg.m⁻³.

2.2.2 - Évolution de l'intensité en liant (B_i)

Pour différencier les bétons selon leur besoin en liant, on définit le dosage en liant, noté L en France et B (pour binder) dans la communauté anglo-saxonne :

$$L \text{ (ou } B) = \frac{\text{masse de liant}}{\text{volume béton}} \quad (2)$$

Pour considérer ensuite l'influence du dosage en liant (L) et de la composition du liant sur la résistance d'un béton, notée f'_c , il est d'usage de tracer l'intensité en liant, notée B_i , en fonction de la résistance du béton pour différentes compositions.

$$B_i = \frac{C \text{ (ou } B)}{f'_c} \quad (3)$$

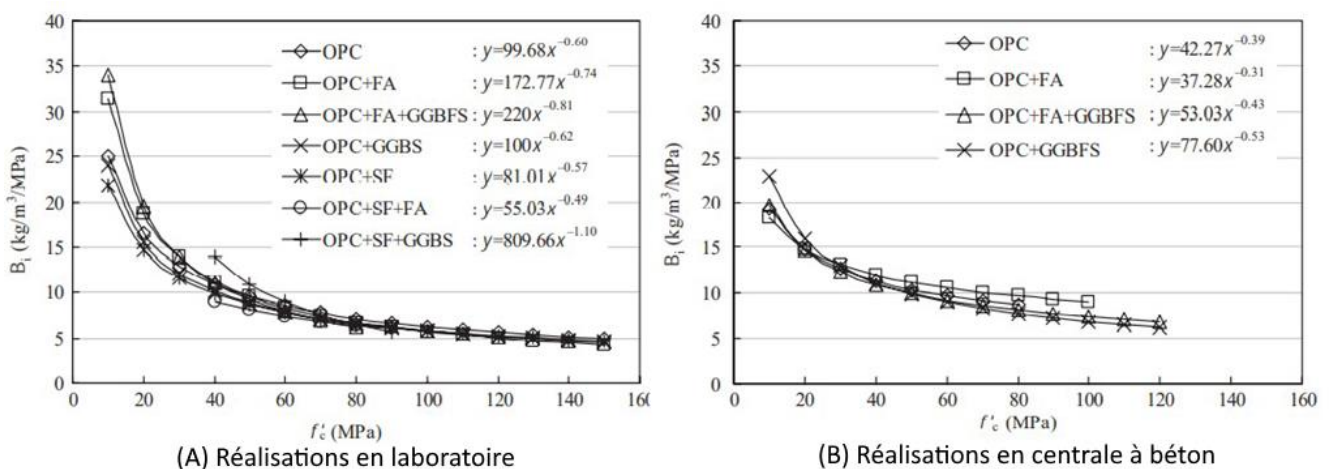


Figure 6 : Intensité du liant en fonction de la résistance du béton, source [1]

OPC : Ciment Portland ordinaire ; FA : Cendres volantes ; GGBFS : Laitiers granules broyées finement de haut fourneau ; GGBS : Laitiers granules de haut fourneau ; SF : Fumées de silice

Il s'agit ensuite d'effectuer une régression linéaire, en passant par la fonction logarithme, par la méthode des moindres carrés pour obtenir le lien, purement empirique, entre l'intensité du liant et la résistance en compression.

Sur les figures 6, les courbes n'évoluent pas exactement comme la courbe de la fonction inverse (en $\frac{1}{x}$). Ces fonctions décroissent moins rapidement que la fonction inverse.

En effet, l'augmentation de la résistance en compression est actuellement corrélée à l'augmentation du rapport $\frac{L}{E}$ [10]. Or, le dosage en eau ne peut pas être modifié sans prendre de précaution car sa diminution entraîne une réduction de la maniabilité du béton [10]. **Ainsi, l'augmentation de la résistance en compression est actuellement corrélée à l'augmentation du dosage en liant.** Donc l'intensité en liant décroît moins vite que la fonction inverse en fonction de la résistance en compression.

Ce concept pose problème car il implique **qu'une résistance plus élevée coïncide avec une pollution plus importante** dans les formulations modernes pour la fabrication d'une quantité de béton donnée, sauf si l'empreinte carbone des déchets n'est pas prise en compte (comme pour les laitiers de haut fourneau par exemple).

Superplastifiants

L'utilisation du superplastifiants, augmente la maniabilité du béton et permet de réduire parallèlement le dosage en eau. Ainsi, pour une résistance donnée, donc pour un rapport $\frac{L}{E}$ fixé, il serait possible de diminuer le dosage en liant en conservant une bonne maniabilité.

Les super-plastifiants sont utilisés par exemple pour réaliser des bétons à très hautes performances, BTHP (résistance en compression de 65 MPa à 100 MPa).

2.2.3 - Évolution de l'intensité de dioxyde de carbone (C_i)

La formulation du béton, notamment le dosage en ciment, est principalement déterminée à partir de la résistance en compression souhaitée comme expliquée dans la section 2.2.2.

Pour caractériser le gain dû à la modification de la composition du ciment sur les émissions de dioxyde de carbone, notée C_e, il faut donc considérer simultanément les modifications de formulation du béton (en particulier du dosage en ciment) permettant la résistance en compression souhaitée et les modifications de la composition du ciment permettant une réduction des gaz à effet de serre.

L'intensité de dioxyde de carbone, notée C_i, dépend de la résistance en compression du béton et du gain sur les émissions de dioxyde de carbone selon l'équation 4. C'est pourquoi cette grandeur est usuellement considérée.

$$C_i = \frac{C_e}{f'_c} \quad (4)$$

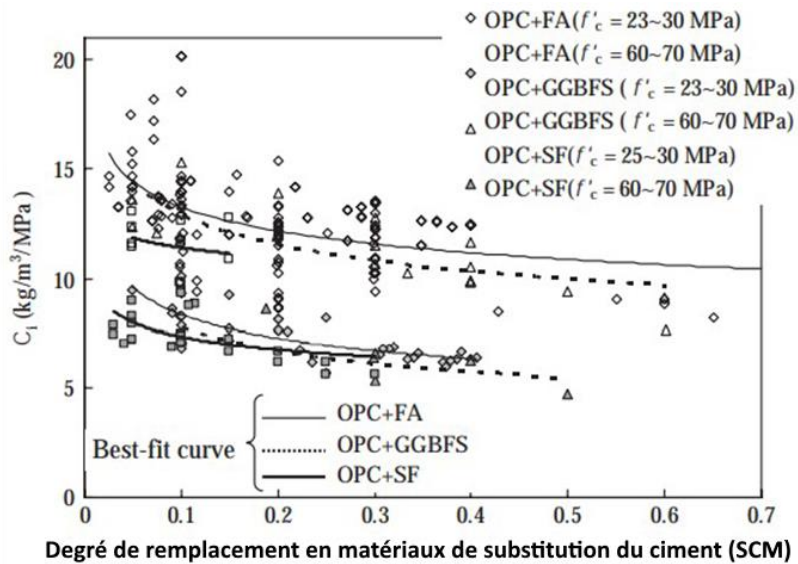


Figure 7 : Intensité de CO_2 en fonction de la résistance du béton, source [1]

OPC : Ciment Portland ordinaire ; FA : Cendres volantes ;
GGBFS : Laitiers granulés broyés finement de haut fourneau ; SF : Fumées de silice

Logiquement, les émissions de gaz à effet de serre diminuent lorsque le taux de substitution augmente. De plus, la figure 7 démontre que le gain augmente rapidement avec le niveau de substitution à faible niveau de substitution.

Lorsque le niveau de substitution dépasse 40 %, l'intensité de dioxyde de carbone peut être représentée par une asymptote horizontale quelle que soit la résistance en compression souhaitée.

En effet, la réaction d'hydratation du mélange constitué des granulats et de ces ciments de composition mixte est activée principalement par le ciment portland ordinaire. Un niveau de substitution trop important oblige alors à augmenter la quantité de ciment pour obtenir une réaction d'hydratation suffisamment rapide (donc une résistance en compression suffisante). L'augmentation de cette quantité diminue ainsi le gain sur les émissions de dioxyde de carbone dû à la substitution. Ceci explique le comportement asymptotique de la figure 7.

2.2.4 - Mécanisme d'amélioration des ciments Portland

Sur la figure 8, R_j représente le taux de substitution du clinker par le matériau j.

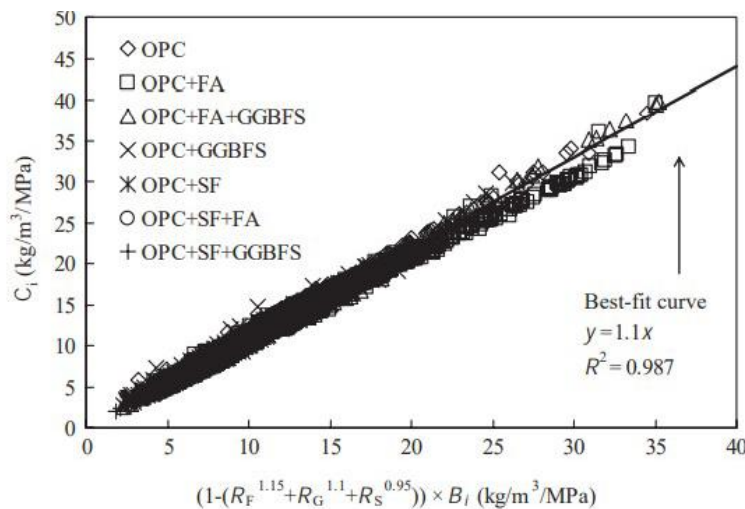


Figure 8 : Mécanisme de réduction du besoin en ciment, source [1]

OPC : Ciment Portland ordinaire ; FA : Cendres volantes ;
GGBFS : Laitiers granulés broyés finement de haut fourneau ; SF : Fumées de silice

Une régression linéaire par la méthode des moindres carrés par exemple permet, après les études des sections 2.2.2 et 2.2.3, d'obtenir le lien entre l'intensité de dioxyde de carbone, le taux de substitution du clinker et le dosage en ciment.

Ce mécanisme est intéressant car il permet d'optimiser les choix de substitutions par des matériaux cimentaires supplémentaires lors de la fabrication du ciment en fonction de la résistance en compression souhaitée.

Néanmoins, cette étude aurait un intérêt plus grand si d'autres matériaux de substitution y étaient intégrés. En effet, **les productions de laitiers de haut fourneau, de cendres volantes siliceuses, et de fumées de silice sont inégalement réparties dans le monde, localisées chacune sur des territoires différents, actuellement en quantité insuffisante par rapport à la demande mondiale de ciment**, et seront probablement réduites pour des questions environnementales en lien avec leur industrie propre. Leur utilisation simultanée en grande quantité n'est donc pas une solution plausible à l'échelle mondiale, en grande quantité, et sur le long terme.

2.3 - Optimisation globale de la formulation - bilan

Le graphique 9 résume simplement le processus d'optimisation des formulations. Elle illustre aussi les effets néfastes des adjuvants nécessaires dans les formulations de ces nouveaux ciments (évoqués dans la section 4.3 de l'article « Substitution partielle des ciments Portland » [3]).

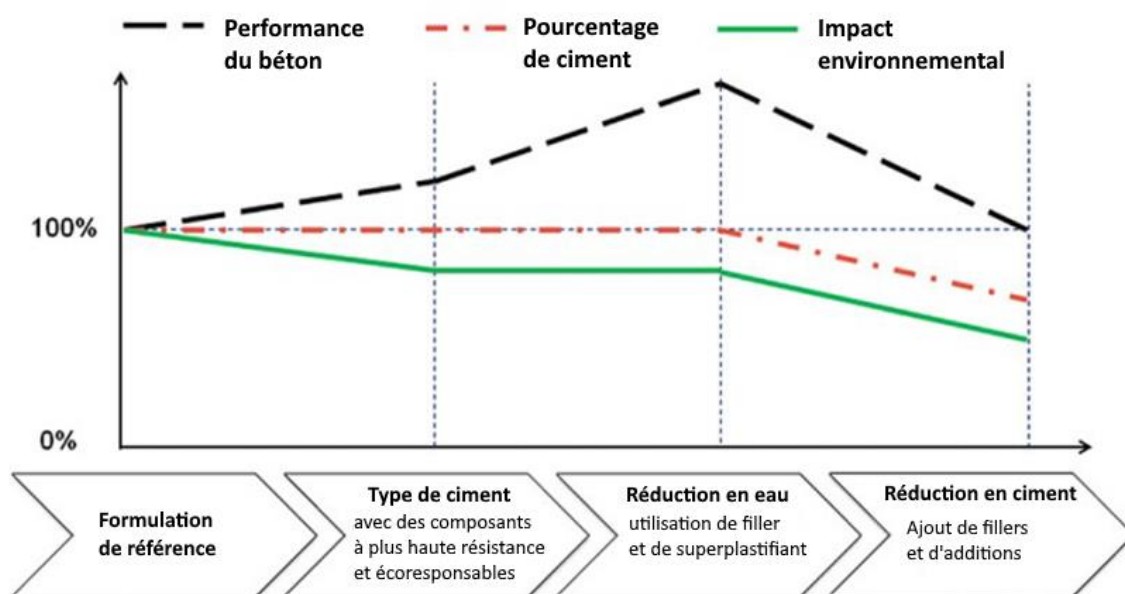


Figure 9 : Méthodologie permettant de diminuer l'empreinte carbone du béton, source [1]

2.4 - Durabilité des bétons

La maîtrise de la durabilité⁶ des bâtiments constitue un enjeu majeur afin de garantir la pérennité des structures et la sécurité des usagers. Elle permet également de **limiter les réparations et le renouvellement des structures à moyen et long terme en augmentant leur durée de vie de service**.

Ces éléments sont aussi importants dans les choix de construction que l'obtention d'une résistance suffisante pour supporter les chargements des structures.

⁶ Résistance au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations (physiques, mécaniques, chimiques, etc.)

La norme EN 206 définit différentes classes d'exposition en fonction de l'environnement dans lequel se trouve l'ouvrage : risque de corrosion en présence de chlorures ou par carbonatation, gel/dégel, environnements chimiques agressifs...

Ces classes d'expositions déterminent les éléments importants dont il faut se méfier lors du choix de la formulation du béton.

Les questions politiques et économiques sont importantes lorsqu'il est décidé de la durée de vie d'un bâtiment. Les politiques d'urbanisme favorisent parfois l'attractivité, notamment une esthétique moderne qui nécessite des renouvellements fréquents, au détriment de l'environnement. La recherche s'évertue alors à concevoir des bâtiments durables et modifiables.

De nouvelles méthodes de construction sont développées où les éléments structuraux d'immeubles seraient amovibles.

2.5 - Une remise en question des normes

Les normes jouent un rôle important dans l'industrie du béton. En effet, face aux enjeux évidents de sécurité, les normes préviennent des risques de pertes humaines et matérielles.

Néanmoins, certains chercheurs critiquent certaines **normes**, basées sur l'**approche prescriptive**, qu'ils jugent dépassée. Par exemple, un béton à base de laitiers de haut fourneau nécessite moins d'eau qu'un béton à base de ciments Portland pour obtenir une maniabilité équivalente. Or la norme fixe un dosage minimum en eau supérieure au besoin. Les chercheurs critiquent alors l'inertie actuelle du changement : les normes seraient très en retard par rapport aux résultats obtenus dans le domaine de la recherche.

L'**innovation** est, elle, dorénavant, dictée par une **approche performancielle**. Cette nouvelle approche fixe des **exigences en termes de résultats** (par exemple résistance aux chlorures) **et non plus en termes de moyens** (par exemple dosage minimal en ciment). Elle donne par ailleurs des outils pour contrôler si les objectifs de durabilité sont atteints [12].

Une solution proposée pour utiliser peu à peu l'approche performancielle dans l'industrie et de borner les écarts par rapport à l'approche prescriptive actuelle.

La recherche essaye de développer des indicateurs de résistance et de durabilité obtenus par des essais de performance précis qui pourraient être généralisés.

3 – Optimisation des choix de construction

3.1 - Recyclage du béton de déconstruction

3.1.1 - Une économie circulaire

Un bâtiment est construit pour une durée de l'ordre d'un siècle. Or, un pic de reconstruction a eu lieu après la seconde guerre mondiale et la durabilité de ces bâtiments a été moindre que prévue. C'est ainsi que le **pic de déconstruction** est prévu pour les prochaines décennies. Les granulats recyclés pour l'utilisation dans du béton représenteraient alors 25 millions de tonnes disponibles pour être recyclés dans du béton. Le potentiel de granulats recyclés est en effet de 25 Mt selon le rapport d'étude du projet national *recybeton* [13], or 120 Mt de granulats sont utilisés pour les bétons hydrauliques en 2018 (granulats recyclés et non recyclés) selon les chiffres de l'*UNICEM* [14]. Il y aurait donc potentiellement environ $25/120 = 21\%$ des granulats qui pourraient être recyclés pour la réalisation des bétons hydrauliques.

3.1.2 - Utilisations actuelles et enjeux

Matériaux	Évolution des émissions de GES en recyclant
Béton	5 %
Plâtre	48 %
Aluminium	-80 %
Acier	-40 %
Bois	-22 %

Tableau 2 : Émissions de GES dues au recyclage comparées à celles dues à la production, source [15]

Le tableau 2 souligne le problème majeur lié au recyclage du béton actuellement. Certes, le recyclage du béton permet de préserver les ressources naturelles, mais n'enlève pas toute pollution. Par exemple, les Pays-Bas est un des pays qui valorise le mieux les granulats recyclés car il manque de ressources.

3.1.3 - Stocker du CO₂ dans les granulats recyclés

Le projet FastCarb (Carbonatation accélérée de granulats de béton recyclé) démarré en 2018, a pour objectif de stocker le CO₂ dans les granulats de béton recyclés (GBR) de manière accélérée, d'améliorer la qualité de ces granulats par le colmatage de la porosité et de diminuer finalement l'impact CO₂ du béton dans les structures (plus d'information sur ce lien : <https://fastcarb.fr>).

3.1.4 - Carbonatation du béton

Une solution envisagée par la recherche est (de quantifier) la carbonatation du béton.

Une partie des émissions de dioxyde de carbone dues à la décomposition du calcaire est réabsorbée de l'atmosphère par le béton suite à une réaction chimique appelée carbonatation. La chaux libre, présente dans les pores du béton, réagit avec le dioxyde de carbone atmosphérique et produit du carbonate de calcium.

Réaction de carbonatation :



La carbonatation des structures en béton ne se produit que près de la surface du béton. En effet, en bouchant les pores, la calcite ralentit la progression du dioxyde de carbone dans le béton. La carbonatation dépend du type de ciment, du rapport $\frac{C}{E}$, de la température et de l'humidité ambiante, ainsi que d'autres propriétés du béton. Pour une structure classique, la profondeur de carbonatation serait d'environ 20 mm après 50 ans [15]. Par conséquent, la réabsorption, naturelle, du dioxyde de carbone par le béton pendant sa durée de vie ne représenterait qu'une très faible proportion des émissions dues à la fabrication du béton. Ce processus est d'ailleurs couramment négligé dans une analyse de cycle de vie du béton.

Néanmoins, ce processus intrigue le domaine de la recherche. **Forcée artificiellement** la carbonatation du béton de déconstruction est une solution envisagée. Elle permettrait éventuellement d'utiliser de manière systématique et pour des bétons de structure des granulats recyclés.

Un écart important existe entre le discours de l'industrie cimentière qui se fixe l'objectif officiel (et médiatique) de systématiser le recyclage du béton et la recherche actuelle qui n'a pas encore

trouvé de solution pour obtenir des granulats recyclés performants en tant que matériau de construction.

3.2 - Béton à haute résistance

Plus de 80 % des émissions de dioxyde de carbone liées à la conception d'un immeuble proviennent de la construction des murs porteurs et des dalles. Ce sont ces pièces qui sont très sollicitées mécaniquement, et très volumineuses.

Certains chercheurs estiment qu'une solution pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre d'une telle structure est de **diminuer le volume de béton utilisé** en augmentant la résistance en compression de ce béton.

Aussi, **plus la résistance du béton est importante, plus le processus de carbonatation est lent** (figure 10). Les armatures sont alors attaquées plus tardivement. Cela constitue un atout supplémentaire pour la durabilité de la structure. Néanmoins, une résistance élevée ne garantit pas une microstructure moins sensible aux attaques sulfatiques ou alcali-granulaires.

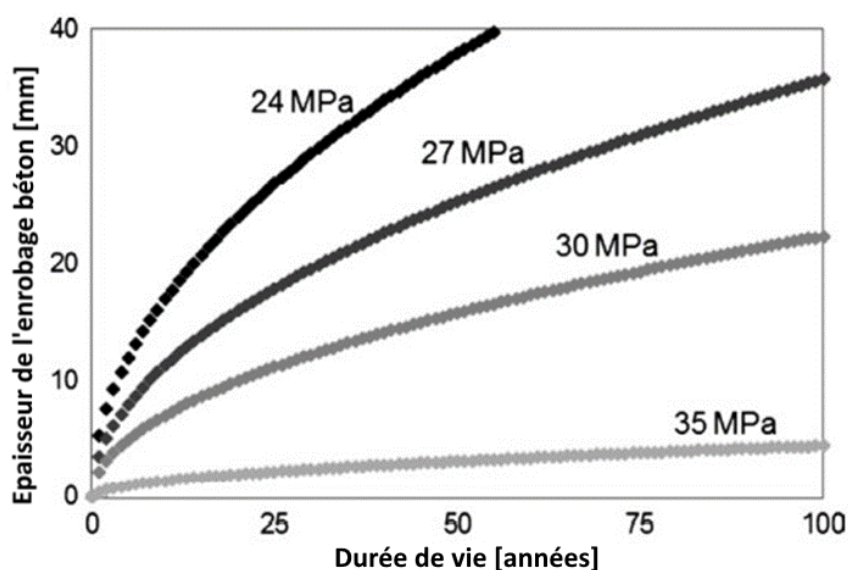


Figure 10 : Vitesse de carbonatation en fonction de la résistance en compression du béton, source [1]

Actuellement, cette solution ne fait pas l'unanimité car une augmentation de la résistance du béton est en général synonyme d'une augmentation du dosage en ciment⁷. Si la pollution liée à la fabrication du ciment diminuait à l'avenir, les avantages de cette solution seraient déjà plus évidents.

De plus, **l'augmentation de la résistance en compression du béton a pour objectif la diminution des sections**. Cette diminution est alors limitée par l'enrobage minimum obligatoire et par la résistance en traction du béton.

⁷ Dans de rares réalisations, le béton est enrichi en fibres pour augmenter sa résistance en compression (BFUHP)

3.3 - Bilan des solutions évoquées

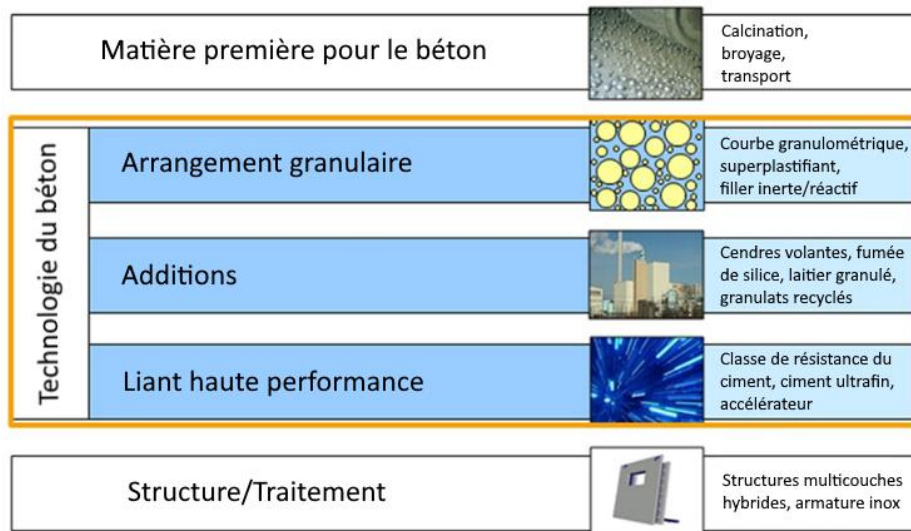


Figure 11 : Solutions technologiques pour un béton bas-carbone, source [1]

Le graphique précédent résume l'ensemble des techniques actuelles permettant de réaliser un béton (ou une construction) bas-carbone. La recherche s'efforce d'aller au-delà de ces techniques.

Un des inconvénients majeurs des bétons à base de matériaux cimentaires supplémentaires est leur activation par l'intermédiaire de la portlandite. Ce produit de la réaction hydraulique permet en effet de maintenir le liquide interstitiel présent dans la pâte de ciment à un pH très basique (de l'ordre de 13 à 14 pour un ciment uniquement composé de clinker) or ce pH basique est nécessaire pour que la réaction pouzzolanique de certains matériaux de substitution puisse être activée. Cette caractéristique implique de continuer à utiliser du clinker. Ce problème est déjà évoqué dans la section 2.2.3.

L'objectif de la recherche est maintenant d'obtenir de nouveaux bétons qui ne nécessitent pas de clinker pour former une pâte cimentaire. Pour cela, il est nécessaire de trouver de nouveaux matériaux aux propriétés hydrauliques.

4 – Conclusion

Le monde de l'industrie de la construction et le monde de la recherche travaillent activement sur la formulation des bétons et notamment sur la composition du liant permettant de réduire l'impact carbone du béton.

Ces évolutions sont principalement de deux types :

- l'utilisation des matériaux cimentaires supplémentaires qui est détaillée dans l'article « Béton bas carbone : Substitution partielle des ciments Portland » [3] ;
- l'utilisation des bétons à activation alcaline est traité dans l'article « Béton bas carbone : Bétons auto-activés » [4].

Pour ces deux solutions, il existe un **réel besoin d'investigation pour s'assurer d'une durabilité** suffisante pour les structures les utilisant.

Aussi, l'objectif *in fine* est de remplacer totalement les ciments Portland par de nouveaux ciments sans clinker.

En outre, une **évolution du cadre juridique et politique** des activités cimentières a commencé. Elle se révèle limitée par un lobbying fort de la part de certains industriels. Investir pour l'avenir a un coût colossal.

En arrière-plan se dessine un débat fondamental, celui de la place de la construction et de la densification urbaine dans notre société. Davantage que le mode de production du béton, c'est la massification de son emploi qui soulève de nombreuses questions [16].

5 – Glossaire

Addition minérale poudre d'origine minérale ajoutée au béton pour modifier certaines de ses propriétés. Les additions sont classées en deux types : les additions quasiment inertes (I) ; les additions à caractère pouzzolanique ou hydraulique lentes (II). [10]. 7

Ciments Portland liants hydrauliques contenant 95% de clinker, composé notamment de silicates de calcium, hydrauliques responsables de sa prise et de son durcissement. Sa réaction avec de l'eau (hydratation) produit de la portlandite qui donne son pH basique à la solution interstitielle contenue dans les pores de la pâte de ciment hydratée. 4,8,11,12,15

Clinker constituant du ciment Portland, il est le résultat de la cuisson d'un mélange composé d'environ 70 % à 80 % de calcaire et de 30 % à 20 % d'aluminosilicates (notamment des argiles apportant silicium, l'aluminium et fer). 2,5,10,11,15

Filler matière minérale, finement divisée (de taille inférieure à 0,063 mm selon la norme NF EN 12620) destinée à remplir les vides laissés par l'empilement granulaire. Leur utilisation dans la formulation des bétons permet d'améliorer les propriétés d'écoulement du béton frais et les résistances mécaniques du béton durci. Elles sont généralement moins coûteuses que les ciments. [10]. 7

Métakaolin addition minérale ultra-fine inorganique aux propriétés pouzzolaniques, issue de la calcination d'une argile kaolinique. [10]. 6

Réaction hydraulique durcissement en présence d'eau. Cette réaction est à l'origine de la prise du béton et du durcissement. Réaction : $C_3S + H \Rightarrow CSH + CH$ (notation cimentière) [10]. 15

Réaction pouzzolanique durcissement en présence de chaux et d'eau. Des hydrates de nature analogue à ceux obtenus par la réaction hydraulique sont produits. Réaction : $x CH + y S + z H \Rightarrow C_x S_y H_{(x+z)}$ (notation cimentière) [10]. 15

6 – Sigles

BTHP bétons à très hautes performances (65 MPa à 100 MPa). 9

BHP bétons à hautes performances (45 MPa à 60 MPa). 7

CO₂ dioxyde de carbone. 1,3,4,5,10,13

D fumées de silice. 8,11

GES gaz à effet de serre. 1,4,5,13

K ciments Portland. 4,8,11,12,15

S laitiers de haut fourneau. 8,11,12

V cendres volantes siliceuses. 8,11

Références :

- [1]: Handbook of Low Carbon Concrete, Ali Nazari et Jay G. Sanjayan, Butterworth-Heinemann, septembre 2016
- [2] : Le béton-ciment, troisième « pays » des émissions de gaz à effet de serre, GEO, 19 octobre 2021, <https://www.geo.fr/environnement/le-beton-ciment-troisieme-pays-des-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-206744>
- [3]: Béton bas carbone : Substitution partielle des ciments Portland, A. Marlot, X. Jourdain, H. Horsin Molinaro, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/beton-bas-carbone-substitution-partielle-des-ciments-portland
- [4]: Béton bas carbone : Bétons auto-activés, A. Marlot, X. Jourdain, H. Horsin Molinaro, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/beton-bas-carbone-betons-auto-actives
- [5]: Formulation d'un béton ordinaire, H. Horsin Molinaro, X. Jourdain, octobre 2018, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/formulation-dun-beton-ordinaire
- [6]: Décarbonation : la feuille de route de la filière ciment à horizon 2030 et 2050, Ministère de l'économie, des finances et de la relance, Conseil national de l'industrie, mai 2021, https://www.conseil-national-industrie.gouv.fr/files_cni/files/csf/construction/decarbonation_feuille_de_route_ciment.pdf
- [7]: Le mix énergétique, Henri Safe, janvier 2021.
- [8]: Ciment, Wikipédia, mars 2021, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Ciment>
- [9]: Ministère de l'économie, des finances et de la relance : Décarbonation : la feuille de route de la filière ciment à horizon 2030 et 2050, mai 2021, <https://www.conseil-national-industrie.gouv.fr/actualites/comites-strategiques-de-filiere/construction/decarbonation-la-feuille-de-route-de-la-filiere-ciment-horizon-2030-et-2050>,
- [10]: Fabrication d'une poutre en béton armé, Hélène Horsin Molinaro, Xavier Jourdain, novembre 2018, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/fabrication-dune-poutre-en-beton-arme
- [11]: La base documentaire de référence sur les ciments et bétons, Infociments, <https://www.infociments.fr/>
- [12]: Approche performancielle des bétons, AFGC, février 2018, https://www.afgc.asso.fr/app/uploads/2016/10/1_5_RECO_Approche_performantielle_des_betons.pdf
Approche performancielle, Infociments, avril 2018, <https://www.infociments.fr/betons/lapproche-performantielle>
- La démarche Performantielle, Benoit Thauvin, septembre 2017, <https://www.cerema.fr/system/files/documents/2017/09/5-Approche-performantielle.pdf>
- [13]: https://www.pnrecybeton.fr/wp-content/uploads/2020/03/RECYBETON_Recommandations_2019-03.pdf
- [14]: <https://www.unicem.fr/wp-content/uploads/depliant-unpg-chiffres-2018-web.pdf>

- [15]: Handbook of Low Carbon Concrete, Ali Nazari et Jay G. Sanjayan, Butterworth-Heinemann, septembre 2016
- [16]: Le béton, mis au défi des enjeux environnementaux, Guillaume Buttin, mai 2020, <https://www.lafabriqueecologique.fr/le-beton-mis-au-defi-des-enjeux-environnementaux/>
- [a]: La fumée de silice : les origines (1), ACPresse, avril 2019, Section : Savoirs, <https://www.acpresse.fr/la-fumee-de-silice-les-origines/>
- [b]: Formulation d'un béton ordinaire, Hélène HORSIN MOLINARO, Xavier JOURDAIN, octobre 2018, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/formulation-dun-beton-ordinaire
- [c]: Norme ciment NF EN 197-1 : Composition des ciments courants, Infociments, <https://www.infociments.fr/norme-beton-nf-en-197-1-composition-des-ciments-courants>
- [d]: INIES Les données environnementales et sanitaires de référence pour la bâtiment, <https://www.inies.fr/accueil/>
- [e]: Fabrication du béton, LAFARGE, février 2016, <https://www.lafarge.fr/fabrication-du-beton>
- [f]: Comment la filière ciment va se décarboner, Le Moniteur, page 4, <https://www.lemoniteur.fr/article/comment-la-filiere-ciment-va-se-decarboner.2146309>
- [g]: Fumée de silice, Wikipédia, novembre 2020, https://fr.wikipedia.org/wiki/Fum%C3%A9_de_silice