



RESSOURCES MINÉRALES POUR LES LIANTS DES BÉTONS DÉCARBONÉS : DISPONIBILITÉ, PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION ET INNOVATIONS

563.E Septembre 2022



CERIB
Expertise concrète

/ Cerib.com

SLT/JRO
3704BV025/Bétons verts

© 2018 CERIB – CS 10010 – 28233 Epemont Cedex

ISSN 0249-6224– EAN EAN 9782857553557

563.E – septembre 2022

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction
par tous procédés réservés pour tous pays.

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de son article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (article L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon exposant son auteur à des poursuites en dommages et intérêts ainsi

Ce rapport a été réalisé à la demande du
Ministère de la Transition Ecologique DGALN/DEB/EARM

Ont collaboré à l'élaboration de ce rapport :

Dominique Bellenoue, DGALN
Diane Achard, Ecocem
Mouloud Behloul, Lafarge France
Anthony Binet, Aalborg Portland
Stéphanie Bondoux, Hoffmann Green Cement
Catherine Chambouleyron, Lafarge France
Isabelle Champetier, EDF
Alexandre Collard, Ciments Calcia
Jean-Fabien Criquioche, Aalborg Portland
Loïc Danest, Surschiste
Jérémy Domas, CTPL
Laurent Frouin, Ecocem
Marina Golhen, Condensil
Pascal Gonnon, Omya
Floriane Grand, Vicat
Philippe Hauza, Argeco
Laure Héliard, SFIC
Rudy Magué, Vicat
Antoine Moreau, Lafarge France
Pierre Naproux, Sibelco
Christian Pimpie, Eqiom
Maurizio Romeo, Aalborg Portland
Shahinaz Sayagh, CTPL
Jean-Christophe Trassard, Ecocem

Auteurs :

Suzanne Le Thierry, Cerib
François Jacquemot, Cerib
Patrick Rougeau, Cerib

SOMMAIRE

SOMMAIRE.....	5
1 Objet de l'étude.....	7
1.1 Contexte	7
1.2 Enjeux de l'étude	8
1.3 Méthodologie	8
1.4 Contenu du rapport.....	8
2 Données générales sur les bétons et leurs constituants – contexte normatif.....	10
2.1. Préambule	10
2.2.1 Le béton.....	10
2.2.2 Le ciment.....	10
2.2.3 Les additions minérales	10
2.2. Impact environnemental du béton	12
2.3 Contexte normatif	13
2.3.1 Utilisation des additions minérales dans les bétons.....	13
2.3.2 Utilisation de constituants autres que le clinker dans les ciments.....	15
2.4 Production de béton et de ciment en France.....	16
2.5 Évolutions de la filière ciment.....	20
2.5.1 Feuille de route pour la décarbonatation de la filière ciment.....	20
2.5.2 Évolutions de l'offre cimentière à court terme.....	21
3 Les constituants des liants cimentaires dont l'usage est normalisé	22
3.1 Les matériaux issus directement de carrières.....	22
3.1.1 Les fillers et additions calcaires.....	22
3.1.2 Les additions siliceuses.....	25
3.1.3 Les pouzzolanes naturelles.....	27
3.1.4 Les argiles calcinées.....	30
3.2 Les matériaux correspondant à des co-produits industriels.....	34
3.2.1 Les laitiers de haut-fourneau	34
3.2.2 Les cendres volantes siliceuses	37
3.2.3 Les cendres volantes calciques	38
3.2.4 Les fumées de silice	39
3.2.5 Les schistes calcinés	40
3.3 Conclusion.....	40

4	Intérêt des constituants non traditionnels pour les liants cimentaires	42
4.1	Les matériaux issus directement de carrières.....	42
4.1.1	La diatomite	42
4.1.2	La phonolite.....	42
4.2	Les co-produits industriels	43
4.2.1	Les laitiers d'aciérie de conversion	43
4.2.2	Les laitiers de cubilot.....	43
4.2.3	Autres typologies de laitier	44
4.2.4	Les fines de fonderie	44
4.2.5	Les cendres de boues de papeterie	45
4.2.6	Les cendres de chaudières biomasse	46
4.2.7	Le verre broyé.....	46
4.3	Contexte normatif	47
5	Technologies alternatives	48
5.1	Ciments sursulfatés.....	48
5.2	Ciments sulfoalumineux.....	49
5.3	Liants obtenus par activation alcaline	50
5.3.1	Les géopolymères	50
5.3.2	L'activation alcaline du laitier de haut-fourneau	51
5.3.3	Les liants Hoffmann Green Cement Technologies	52
5.4	Ciment et technologie Solidia	53
5.5	Liants à base d'oxyde de magnésium	54
5.5.1	Sorel.....	54
5.5.2	Novacem.....	55
5.5.3	TecEco	55
5.5.4	Calix	55
5.6	Liant d'hydrosilicate de calcium	55
6.	Conclusion - Perspectives	57
7.	Références bibliographiques	60

1 OBJET DE L'ÉTUDE

1.1 Contexte

La transition écologique est au centre des enjeux de la construction, dont les acteurs sont engagés dans la réduction de l'empreinte environnementale des ouvrages. Elle concerne les secteurs du bâtiment et des travaux publics. Récemment, les Pouvoirs Publics ont lancé des travaux en vue de définir la Stratégie Française Energie Climat (SFEC), intégrant notamment la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC).

Dans ce contexte, la filière béton doit disposer d'un panel de solutions pour diminuer les émissions de CO₂ des systèmes constructifs en béton en passant par des évolutions sur la conception des ouvrages (dimensionnement, complémentarité des matériaux...), le recours à des évaluations environnementales, l'optimisation des formules de béton et des process de fabrication.

Les bétons contenant dans leur liant des matériaux minéraux venant en substitution du clinker Portland sont très couramment et largement utilisés en France. Le secteur de la construction dispose d'un retour d'expérience de plusieurs décennies et les apports des additions minérales aux différentes propriétés des bétons à l'état frais (ouvrabilité, mise en œuvre...) et à l'état durci (résistance mécanique, déformations différées, durabilité...) ne sont plus à démontrer [1] [2] [3]. Ces matériaux sont incorporés directement dans les ciments pour la production de ciments autres que de type CEM I ou bien intégrés dans le béton en substitution partielle du ciment au moment du malaxage.

Aujourd'hui, la démarche de la transition écologique et environnementale amène les additions minérales et les ciments à faible teneur en clinker à jouer un rôle majeur dans les bétons décarbonés. Ils constituent en effet les pistes principales pour réduire l'empreinte carbone des bétons.

Si l'apport de ces additions cimentaires aux propriétés des bétons dépend essentiellement de leur composition minéralogique et de leur finesse, les additions se distinguent les unes des autres en premier lieu par leur origine. Certaines, comme les additions calcaires, les additions siliceuses, les pouzzolanes et les argiles calcinées, sont issues de process de fabrication qui leur sont dédiés. D'autres, comme les cendres volantes, les fumées de silice et les laitiers de haut-fourneau, sont des co-produits industriels. Pour ces dernières additions, les quantités disponibles sur le marché sont dépendantes des fluctuations éventuelles et des évolutions des industries auxquelles elles sont liées : arrêt des centrales à charbon dans le cas des cendres volantes, changements concernant l'industrie du silicium et des alliages de ferrosilicium pour les fumées de silice, volumes de production d'acier et changement des modes de production par la filière haut-fourneau pour les laitiers. Il est donc essentiel pour l'intérêt général et la satisfaction des enjeux environnementaux, d'anticiper de telles évolutions et de mener les actions qui permettront d'accroître la résilience des filières béton et construction.

1.2 Enjeux de l'étude

Dans ce contexte, les principaux enjeux de l'étude confiée au Cerib par le Ministère de la Transition Écologique sont les suivants :

- > appréhender les différents gisements et sources en constituants minéraux utilisés dans les liants des bétons en France métropolitaine afin d'identifier d'éventuelles tensions technico-économiques, présentes ou à venir ;
- > déterminer le degré de maturité des technologies de remplacement ou de rupture potentielles dans un domaine économiquement pertinent des points de vues environnemental, de la disponibilité et du coût final.

1.3 Méthodologie

L'étude s'est appuyée sur la démarche ci-dessous :

- > rencontre avec des cimentiers, des fournisseurs d'additions minérales et de nouveaux liants ;
- > élaboration d'un état des lieux sur les données technico-économiques (disponibilité, localisation...) des constituants pouvant venir en addition ou en substitution du clinker ou du ciment ;
- > analyse du contexte normatif des bétons et de la réglementation des ouvrages. Identification des points clés (volets matériaux, analyse du cycle de vie...) à considérer pour engager les évolutions nécessaires ;
- > réflexion prospective sur les actions à lancer pour accroître la résilience de la filière béton quant à l'utilisation des additions minérales, actuelles ou futures.

Le Cerib s'est entretenu avec les acteurs présentés dans le tableau 1.

1.4 Contenu du rapport

Le présent rapport s'articule autour des parties suivantes :

- > état des lieux des disponibilités actuelles concernant les additions cimentaires utilisées dans les bétons en France : localisation, quantité, mode de transport... ;
- > scénarii d'évolution pour la prochaine décennie ;
- > recensement des technologies alternatives ;
- > identification des leviers d'actions qu'il conviendrait de mettre en place des points de vue scientifiques, opérationnels, normatifs et réglementaires.

Tableau 1 – Entretiens menés par le Cerib pour la réalisation de l'étude

Société	Domaine d'activité	Interlocuteurs
Lafarge France	Cimentier	▪ Mouloud Behloul, directeur Innovation ▪ Antoine Moreau, responsable national des ventes marché Préfa ▪ Catherine Chambouleyron, responsable technique national
Ciments Calcia	Cimentier	▪ Alexandre Collard, responsable Marketing France
Eqiom	Cimentier	▪ Christian Pimpie, responsable Pôle Marketing
Vicat	Cimentier	▪ Floriane Grand, directeur de région ▪ Rudy Mague, responsable technico-commercial
Aalborg Portland	Cimentier	▪ Jean-Fabien Criquioche, directeur général France ▪ Maurizio Romeo, président France ▪ Anthony Binet, responsable secteur Sud
Surschiste	Fournisseur de cendres volantes	▪ Loïc Danest, chef de projet recherche et développement
Sibelco	Fournisseur d'additions siliceuses	▪ Pierre Naproux, responsable technico-commercial
Argeco Développement	Fournisseur de métakaolin	▪ Philippe Hauza, directeur technique recherche et développement
Ecocem	Fournisseur de laitier de haut-fourneau	▪ Laurent Frouin, directeur innovation ▪ Diane Achard, responsable développement technique et applications ▪ Jean-Christophe Trassard directeur marketing de l'innovation durable
Omya	Fournisseur d'additions calcaires	▪ Pascal Gonnon, responsable béton, ciment et mortier
Condensil	Fournisseur de fumée de silice	▪ Marina Golhen, directrice
EDF	Producteur d'électricité Fournisseur de cendres volantes	▪ Isabelle Champetier, chef de projet Environnement
CTPL	Centre Technique et de Promotion des Laitiers sidérurgique	▪ Shahinaz Sayagh, directrice technique ▪ Jérémie Domas, délégué général

2 DONNÉES GÉNÉRALES SUR LES BÉTONS ET LEURS CONSTITUANTS – CONTEXTE NORMATIF

2.1. Préambule

2.2.1 Le béton

Le béton est principalement composé de sables et de gravillons assemblés au sein d'une matrice liante. Ce liant est composé de ciment, auquel des additions minérales peuvent être ajoutées. Il s'agit de matériaux minéraux finement divisés pouvant être ajoutés au béton pour améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières.

L'eau est utilisée pour obtenir la consistance nécessaire à la mise en place du béton. Elle est également indispensable à l'hydratation du liant.

Des adjuvants peuvent également être ajoutés durant le malaxage du béton frais. Il s'agit de produits incorporés, le plus souvent sous forme liquide, à une dose inférieure ou égale à 5 % en masse de la teneur en ciment du béton, pour modifier les propriétés du mélange à l'état frais et/ou durci.

Enfin, d'autres constituants tels que des fibres ou des pigments peuvent également être ajoutés dans le béton.

2.2.2 Le ciment

Le principal constituant du ciment est le clinker. Celui-ci est élaboré à partir d'un mélange d'environ 80 % de calcaire et 20 % d'argile, qui est progressivement porté à une température voisine de 1 450 °C, puis brusquement refroidi. Au cours de ces opérations, s'enchaînent plusieurs réactions chimiques. Il en résulte le clinker qui, mélangé avec du gypse, et éventuellement avec d'autres matériaux, puis finement broyé, donne le ciment [4].

Les ciments sont des liants hydrauliques. En présence d'eau, ils durcissent en formant essentiellement des silicates et aluminates de calcium hydratés très peu solubles dans l'eau.

2.2.3 Les additions minérales

Les additions sont des matériaux pulvérulents d'origine minérale. Il peut s'agir de roches calcaires ou siliceuses broyées, d'argiles calcinées ou encore de co-produits industriels tels que les laitiers de haut-fourneau, les cendres volantes ou les fumées de silice.

Suivant leur nature, les additions modifient certaines propriétés du béton comme la consistance à l'état frais, la durabilité ou la résistance mécanique. Certaines additions sont réactives, grâce à leur caractère pouzzolanique ou hydraulique latent et participent à la formation de nouveaux hydrates. Elles ont donc une importance majeure pour les caractéristiques de la microstructure des bétons.

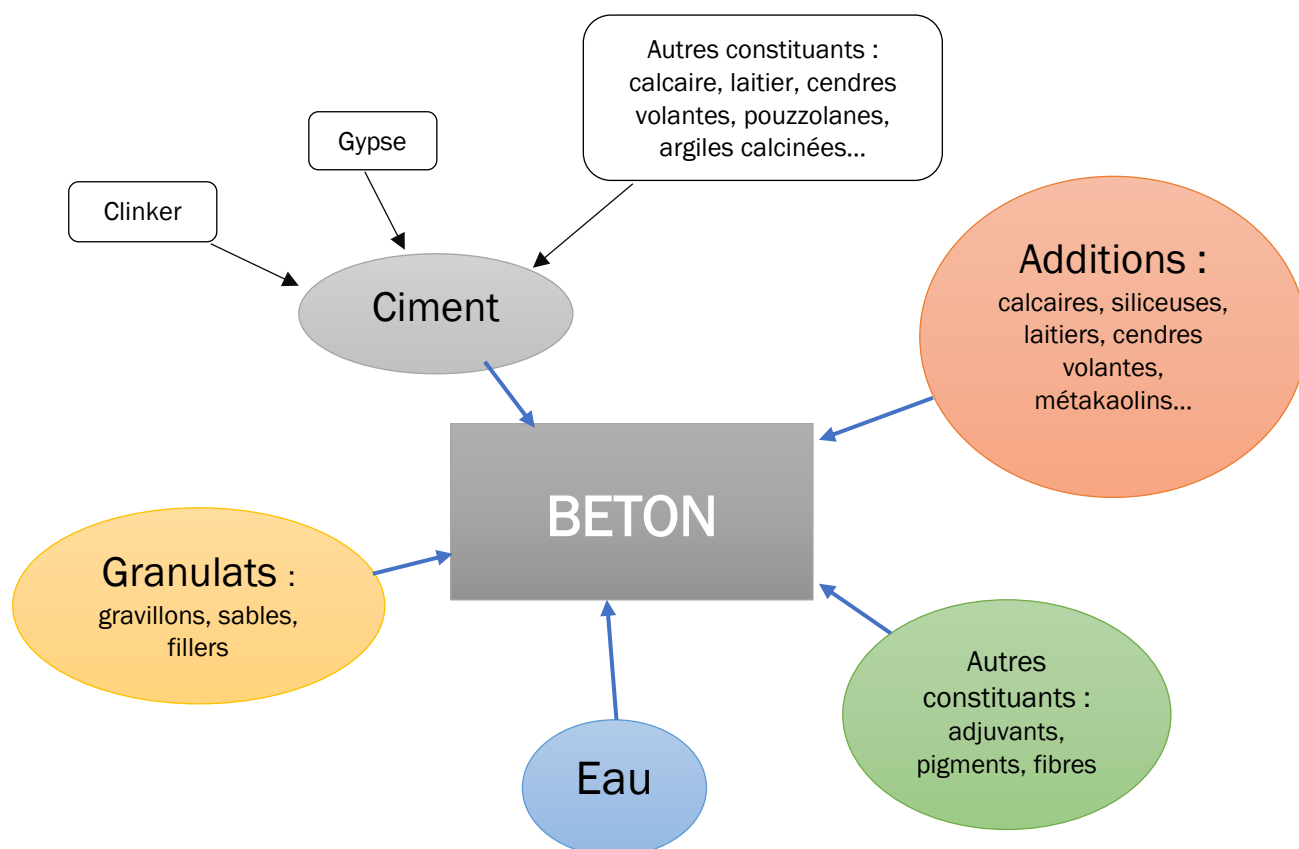


Figure 1 – Schéma récapitulatif de la composition du béton

L'efficacité d'une addition minérale dans les matrices cimentaires dépend essentiellement :

- > de la taille des particules ; en fonction de la distribution granulaire de l'addition et de celle des autres constituants (ciment, éventuelles autres additions, sable fin...), celle-ci exercera une influence plus ou moins marquée d'une part sur la compacité de l'empilement granulaire du mélange et d'autre part sur les cinétiques des réactions d'hydratation ;
- > de sa réactivité ; une addition pouzzolanique ou à caractère hydraulique latent conduit à la formation d'hydrates semblables à ceux produits lors de l'hydratation du ciment ; cela conduit à densifier la matrice cimentaire ;
- > de sa consommation d'eau ; l'eau est nécessaire pour l'hydratation des anhydres, mais également pour assurer une fluidité (ouvrabilité) suffisante du béton ; une consommation d'eau plus importante se traduit par une moindre compacité et donc des résistances mécaniques plus faibles ; cet effet peut être compensé en recourant à des adjuvants (superplastifiants) ;
- > de l'absence de composé (organique ou minéral) susceptible de conduire à un gonflement (c'est le cas de la chaux libre par exemple) ; à défaut l'application d'un traitement permet de contrôler ce phénomène.

Ces phénomènes déterminent :

- > la nature des traitements (physiques, chimiques, thermiques...) à réaliser en vue d'une incorporation dans le béton en tant qu'addition ;
- > le taux de substitution optimal par rapport au clinker.

2.2. Impact environnemental du béton

Dans un contexte où la réduction de l'impact des activités humaines sur l'environnement est une priorité, la France a défini une Stratégie Bas Carbone visant la neutralité carbone à l'horizon 2050 [5]. En 2018, les émissions de CO₂ liées à la production de ciment en France étaient d'environ 11,6 millions de tonnes, soit environ 1,5 % de l'empreinte carbone totale de la France [6].

Il existe plusieurs axes de progrès techniques pour décarboner la filière béton [1] [7] [8]. Toutes les solutions techniques proposées ne se situent pas sur les mêmes horizons de temps, ni sur les mêmes potentiels quant aux taux de remplacement des solutions actuelles. Les principales sont les suivantes :

- > à court terme (5 à 10 ans) et pour la plupart des applications :
 - à l'échelle de l'ouvrage : la sélection des systèmes constructifs, la diminution des sections, le choix des classes d'exposition ;
 - à l'échelle des produits et systèmes constructifs : l'optimisation de la forme des éléments en béton afin de minimiser leur volume, l'évolution des process de fabrication (traitement thermique, précontrainte) ;
 - à l'échelle du matériau : l'optimisation des process industriels des cimenteries (l'industrie cimentière mène depuis de nombreuses années des actions dans ce sens), la réduction dans les bétons de la quantité de clinker associée à l'utilisation de liants avec un taux de clinker plus faible et à la réduction de la quantité de liant par mètre cube de béton ;
- > sur un horizon de temps plus long :
 - le développement de nouveaux ciments basés sur des clinkers générant moins d'émissions carbone du fait des matières premières qu'elles utilisent ou du process de fabrication ; les fournisseurs de liants conduisent des recherches sur cet axe ;
 - le captage du CO₂ des fumées des cimenteries, puis son stockage dans des réservoirs géologiques ou sa réutilisation industrielle pour réaliser des produits dérivés.

Le clinker, principal constituant du ciment Portland, est responsable en moyenne de 85 % des émissions de CO₂ liées à la fabrication du béton. L'indicateur de réchauffement climatique issu de la déclaration environnementale de produit (DEP) du ciment CEM I (composé à plus de 95 % de clinker) est de 765 kg CO₂/tonne. En moyenne, l'indicateur de réchauffement climatique des ciments produits en France est actuellement de 624 kg CO₂ par tonne (cf. § 2.3.2). Par conséquent, les travaux visant à réduire l'empreinte carbone du béton se concentrent essentiellement sur :

- > la diminution des émissions de CO₂ associées à la production du clinker ;
- > la réduction de la teneur en clinker dans les ciments et les liants reconstitués dans le malaxeur.

L'utilisation de clinker plus performant grâce à une sélection des ressources du cru pourrait faciliter la réduction de la teneur en clinker des bétons.

Certains matériaux minéraux pulvérulents peuvent être incorporés dans les bétons pour former la matrice liante, en substitution d'une partie ou de la totalité du clinker. Leur utilisation peut se faire en tant qu'additions en complément ou en substitution du ciment employé dans le béton, ou en tant que constituants du ciment. Dans ce cas, ces matériaux sont directement

ajoutés au clinker lors de la production du ciment. Ils ont un impact sur l'environnement nettement plus faible, avec des émissions de CO₂ 2 à 20 fois inférieures à celles du clinker, suivant les matériaux considérés.

Les matériaux minéraux pulvérulents, constituants principaux des ciments ou additions pour béton, sont connues et ont fait l'objet d'un grand nombre de publications [1] [2] [3]. Il s'agit principalement des calcaires broyés, des argiles calcinées, des cendres volantes, des laitiers de haut-fourneau, des pouzzolanes naturelles et des fumées de silice. Ces matériaux peuvent être issus d'un process dédié, par transformation d'une matière minérale naturelle, ou bien provenir d'autres procédés industriels. Il s'agit alors de co-produits industriels. Au-delà de leur intérêt environnemental, l'utilisation de ces matériaux présente également un intérêt technique car ils peuvent améliorer certaines propriétés des bétons, comme la rhéologie, la durabilité ou encore l'esthétique.

Actuellement, trois matériaux constituent la majorité des additions minérales et des constituants des ciments en complément du clinker : le calcaire, le laitier de haut-fourneau et les cendres volantes. En raison de craintes sur la diminution à venir sur le moyen terme des ressources en laitier de haut-fourneau et cendres volantes qui sont respectivement des co-produits de l'industrie sidérurgique et des déchets des centrales à charbon, il est nécessaire de s'interroger sur le développement de nouvelles ressources.

Le bilan carbone est réalisé à l'échelle de l'ouvrage (RE2020). Il est donc essentiel de disposer d'analyses effectuées pour chaque système constructif via les FDES et ACV. Ces analyses reposent sur des données liées aux process, aux composants et aux matériaux qui entrent dans la fabrication des systèmes constructifs. Concernant le matériau béton, aujourd'hui, la notion de « béton bas carbone » ne fait pas l'objet d'une définition cadrée officielle s'appuyant sur un cadre normatif ou réglementaire. Ces termes sont employés pour des matériaux dont la formulation est établie en vue de réduire autant que possible l'impact carbone tout en maintenant les performances attendues, notamment la résistance mécanique et la durabilité. Un groupe d'experts français travaille actuellement à élaborer une définition normative (commission de normalisation P18B/GE SBC/TF2). À noter, le SNBPE propose des « seuils » d'impact carbone définissant des bétons bas carbone pour des parties d'ouvrage représentatifs, en fonction des classes d'exposition et de la classe de résistance du béton [9]. L'Agence Qualité Construction a établi un rapport sur les bétons bas carbone qui identifie les points sensibles quant à la conception et à la mise en œuvre de ces matériaux et que propose des recommandations quant à leurs usages [10]. La SIM (Société de l'Industrie Minérale) a également publié un rapport relatif à la maîtrise de l'empreinte carbone des ouvrages en béton [11].

2.3 Contexte normatif

2.3.1 Utilisation des additions minérales dans les bétons

La norme NF EN 206/CN, portant sur les spécifications relatives à la composition des bétons destinés aux structures, définit les additions comme des constituants minéraux finement divisés utilisés dans le béton afin d'améliorer certaines propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières. Elle distingue les additions de type I, qui sont quasi-inertes, des additions de type II, à caractère pouzzolanique ou hydraulique latent.

- > additions de type I : additions quasiment inertes chimiquement ; elles contribuent cependant à la compacité du squelette granulaire et interviennent aussi sur les propriétés rhéologiques des bétons ;
- > additions de type II :
 - additions à caractère pouzzolanique c'est-à-dire aptes à former par combinaison avec la chaux et, en présence d'eau, des composés hydratés, stables, semblables à ceux formés par le ciment Portland,
 - additions à caractère hydraulique latent c'est-à-dire aptes à former, en présence d'eau, des minéraux contribuant à la résistance de la matrice cimentaire.

Les additions dont l'aptitude à l'emploi est établie par la norme NF EN 206/CN font l'objet de normes spécifiques :

- > cendres volantes (NF EN 450-1) ;
- > fumées de silice (NF EN 13263-1) ;
- > laitiers vitrifiés moulus de haut-fourneau (NF EN 15167-1) ;
- > métakaolins (NF P 18-513) ;
- > additions calcaires (NF P 18-508) ;
- > additions siliceuses (NF P 18-509).

La norme NF EN 206/CN introduit la notion de « liant équivalent », qui permet de prendre en compte une partie de l'addition dans la formulation d'un béton à base de ciment CEM I ou CEM II/A. Le « liant équivalent » ($Liant_{eq}$) est défini dans la norme NF EN 206/CN comme l'addition de la quantité de ciment (C) et d'une fraction de la quantité d'addition minérale (A) pondérée par un coefficient (k) : $Liant_{eq} = C + kA$.

Afin de faire évoluer la prise en compte des liants bas carbone dans les normes, et notamment la prise en compte des additions, la commission Afnor P18B « Béton » a décidé en début d'année 2021 de créer un groupe d'experts « Solutions Bétons Bas Carbone ».

Les principales missions de ce groupe sont les suivantes :

- > identifier les dispositions ou spécifications de la norme EN 206 et NF EN 206/CN susceptibles de limiter la couverture des bétons « bas carbone » ;
- > identifier les risques que cherchent à prévenir ces dispositions ;
- > collecter les données et éléments de connaissance permettant éventuellement de relaxer en tout ou partie ces dispositions actuelles, notamment en autorisant des alternatives performantielles aux spécifications de moyens ou en faisant évoluer si nécessaire ces spécifications de moyens ;
- > identifier des dispositions ou spécifications que pourrait comprendre les normes NF EN 206/CN et EN 206 pour mieux intégrer les performances du béton vis-à-vis de l'objectif environnemental recherché ;
- > proposer des amendements à ces normes en cohérence avec cette démarche, en prévoyant le cas échéant un phasage entre des modifications pouvant être apportées :
 - à court terme : édition du nouveau complément national français à l'EN 206 attendu pour 2022,
 - à moyen terme (2 ans) : le cas échéant, en fonction des données collectées à l'issue des actions précédemment identifiées, d'autres évolutions à apporter au complément national à l'EN 206,
 - et à plus long terme : révision de l'EN 206 à amorcer au niveau européen d'ici 2 à 3 ans en cohérence avec une approche performantielle de la durabilité impulsée par l'Eurocode 2 révisé.

La norme NF EN 206/CN est utilisée pour la formulation de bétons destinés aux structures. Certains produits en béton préfabriqués relèvent de normes de produits dites normes autoportantes qui ne font pas appel à la norme NF EN 206/CN. Les spécifications de ces normes portent généralement plus sur les caractéristiques du produit en béton durci (exigences de performance) que sur la composition du béton.

2.3.2 Utilisation de constituants autres que le clinker dans les ciments

Les ciments courants font l'objet de la norme NF EN 197-1 qui définit 27 types de ciments courants en fonction de leur composition. Ces ciments contiennent en tant que constituant principal entre 5 et 100 % de clinker qui peut être associé à d'autres constituants :

- > laitier granulé de haut-fourneau ;
- > fumée de silice ;
- > pouzzolane naturelle ;
- > pouzzolane naturelle calcinée (y compris argiles calcinées) ;
- > cendre volante siliceuse ;
- > cendre volante calcique ;
- > schiste calciné ;
- > calcaire.

Depuis septembre 2021, cette norme est complétée par la norme NF EN 197-5 qui définit 5 types de ciments complémentaires (ciments Portland composés CEM II/C-M et ciments composés CEM VI).

Ces normes définissent ainsi 32 types de ciments courants répartis en 6 familles :

- > le CEM I, ciment Portland, contenant en tant que constituant principal au moins 95 % de clinker ;
- > les CEM II, ciments Portland aux ajouts, contenant au moins 50 % de clinker, associé à d'autres constituants parmi ceux listés ci-dessus ;
- > les CEM III, ciments de haut-fourneau, contenant 5 à 65 % de clinker, associé à du laitier de haut-fourneau ;
- > les CEM IV, ciments pouzzolaniques, contenant 45 à 89 % de clinker, associé à des constituants pouzzolaniques (fumée de silice, pouzzolane naturelle ou calcinée, ou cendres volantes) ;
- > les CEM V, ciments composés, contenant 20 à 64 % de clinker, associé à 18 à 49 % de laitier et 18 à 49 % de pouzzolane naturelle ou calcinée, ou de cendres volantes ;
- > les CEM VI, ciments composés, contenant 35 à 49 % de clinker, associé à 31 à 59 % de laitier de haut-fourneau et 6 à 20 % d'un autre constituant.

La figure ci-dessous présente les empreintes carbone¹ issues des déclarations environnementales de produits de ces différents types de ciments disponibles sur le site du SFIC. Les valeurs présentées dans ce graphique proviennent de la mise à jour des DEP des ciments de juin 2022 en tenant compte d'une empreinte carbone du laitier de haut fourneau avec une affectation économique. En effet, en mai 2022, la DHUP a publié un rapport

¹ L'empreinte carbone évalue les émissions de gaz à effet de serre (GES) induites par la consommation de la population résidant sur notre sol. à la différence des émissions produites sur le territoire, elle inclut les émissions de GES associées aux biens et services importés, et exclut celles associées aux biens et services exportés. (SFIC)

recommandant l'intégration d'une affectation économique entre la fonte et le laitier de haut-fourneau à une hauteur de 1,4 % pour le laitier de haut-fourneau, soit 83 kg CO₂ éq./tonne (cette valeur n'intègre pas les émissions liées au broyage).

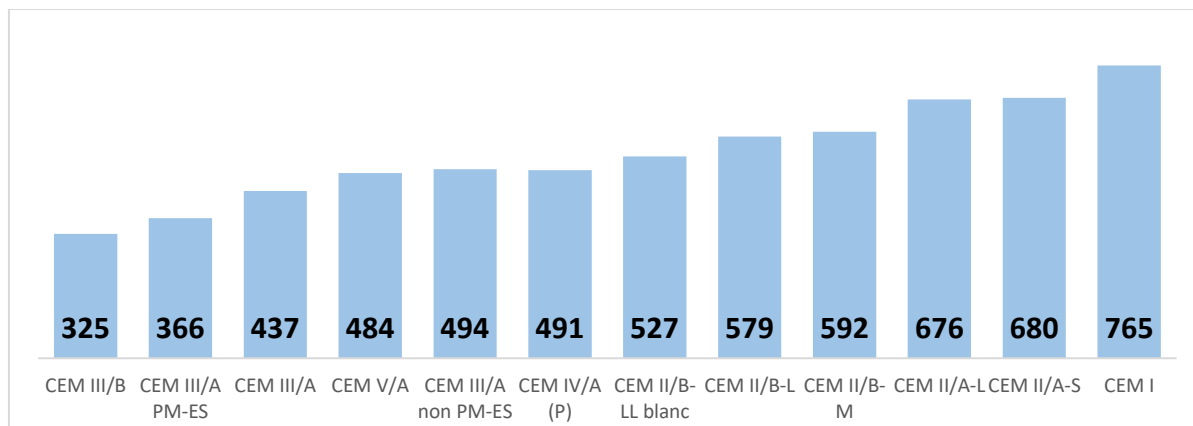


Figure 2 – Empreinte carbone des ciments courants définis par les normes NF EN 197-1 [12]

En complément, il existe des normes spécifiques pour certains ciments particuliers :

- > Ciments d'aluminates de calcium (NF EN 14647) : l'hydratation produisant des aluminates de calcium hydratés et du trihydrate d'alumine insoluble sans libérer de portlandite, confère à ce ciment une bonne résistance à de nombreux agents agressifs (eaux pures, sulfates, eau de mer, acides organiques ou minéraux). Ces ciments développent un durcissement particulièrement rapide et résistant aux températures élevées [13].
- > Ciment prompt naturel (NF P 15-314) : ce ciment à prise et durcissement rapides résulte de la cuisson à température modérée d'un calcaire argileux, suivie d'un broyage très fin [13].
- > Ciments spéciaux à très faible chaleur d'hydratation (NF EN 14216) : ces ciments ont des réactions d'hydratation identiques à celles des ciments courants, mais le processus d'hydratation est ralenti du fait de la composition, de la finesse ou de la réactivité des constituants [13].
- > Ciments sursulfatés (NF EN 15743) : il s'agit de ciments composés de laitier de haut-fourneau et de sulfate de calcium, dont les produits d'hydratation sont l'ettringite et les C-S-H. Ils sont connus pour leurs bonnes propriétés face aux agents agressifs et leur durcissement assez lent en conditions ambiantes (voir paragraphe 5.1) [8].

2.4 Production de béton et de ciment en France

La production de béton en France se répartit en trois catégories d'application :

- > le béton prêt à l'emploi dont la production en 2019 s'est élevée à 40 millions de mètres cubes (soit environ 96 millions de tonnes) dans plus de 1900 unités de productions réparties sur tout le territoire, pour un chiffre d'affaires de 4,4 milliards d'euros [14] ;
- > les produits en béton dont la production en 2020 s'est élevée à 21 millions de tonnes (béton et acier compris) dans 722 sites de production (voir la répartition sur le territoire en figure 3), pour un chiffre d'affaires de 2,8 milliards d'euros [15] ;
- > les bétons réalisés dans les centrales de chantier dont la production est estimée à 8,2 millions de mètres cubes soit environ 19 millions de tonnes.

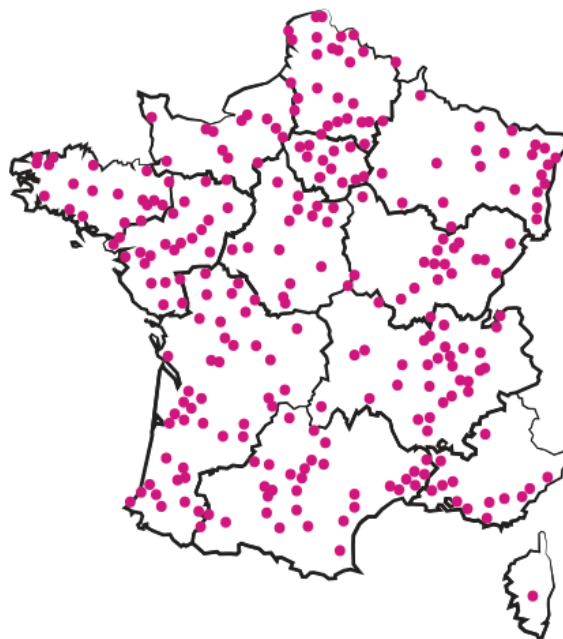


Figure 3 – Répartition des sites de production de béton préfabriqué en France métropolitaine [15]

	NOMBRE D'UNITÉS DE PRODUCTION
AUVERGNE-RHÔNE-ALPES	299
Auvergne	60
Rhône-Alpes	239
BOURGOGNE-FRANCHE-COMTÉ	107
BRETAGNE	121
CENTRE-VAL DE LOIRE	98
GRAND-EST	155
Alsace	48
Champagne-Ardenne	49
Lorraine	58
HAUTS-DE-FRANCE	118
Nord	76
Picardie	42
ÎLE-DE-FRANCE	133
NORMANDIE	114
NOUVELLE-AQUITAINE	232
Aquitaine	135
Limousin	28
Poitou-Charentes	69
OCCITANIE	245
Languedoc-Roussillon	112
Midi-Pyrénées	133
PACAC	170
PAYS DE LA LOIRE	136

Figure 4 – Nombre d'unité de productions de béton prêt à l'emploi par région en France en 2019 [16]

Pour la fabrication de ces bétons, 18,6 millions de tonnes de ciment ont été consommées en 2020, dont environ 3 millions importées de l'étranger. La production française de ciment s'élevait alors à 16,4 millions de tonnes parmi lesquelles un peu moins d'un million ont été exportées [17]. En France, la production et la commercialisation du ciment sont concentrées sur un petit nombre d'entreprises : en 2016, 5 entreprises ont réalisé 95 % de la production, pour un total de 12 entreprises [18].

L'évolution de la production de ciment en France depuis 2001 est illustrée sur la figure 5. Elle a connu une baisse d'environ 20 % par rapport aux années 2000, mais demeure relativement stable depuis 2014. La liste des ciments porteurs de la marque NF Liants Hydrauliques est disponible sur le site de l'AFNOR (<https://cdn.afnor.org/download/produits/FR/NF002.pdf>). La localisation des sites de production est présentée sur la figure 5. L'implantation des sites est conditionnée par la proximité des carrières de calcaire nécessaire à la production du ciment [18].

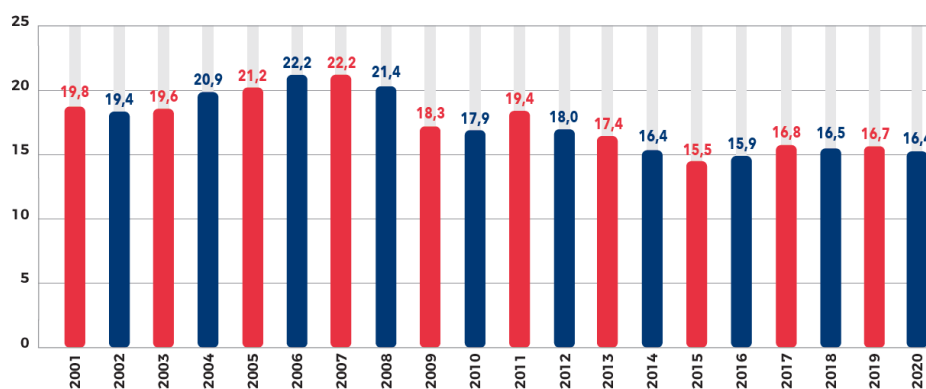


Figure 5 – Évolution de la production française de ciment entre 2001 et 2020 (en millions de tonnes) [17]

La répartition de la production par catégorie de ciment en 2010 et 2020 est présentée sur la figure 6. Aussi bien en 2010 qu'en 2020, 80 % de la production demeure dédiée aux CEM I et aux CEM II autres que blancs. Néanmoins, la proportion de CEM II par rapport aux CEM I a augmenté.



Évolution de la production par catégorie de ciments de 2010 à 2020

En pourcentage

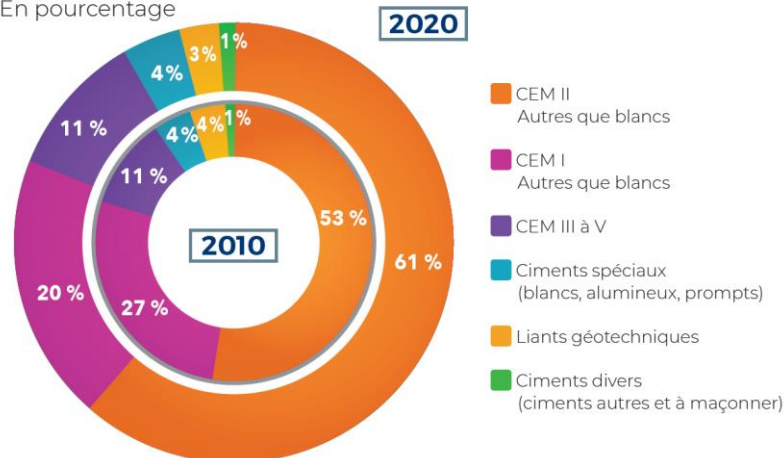


Figure 6 – Répartition de la production de ciment en France, par catégorie de ciments [17]



Sites industriels des adhérents du SFIC

▲ Cimenterie
■ Centre de broyage

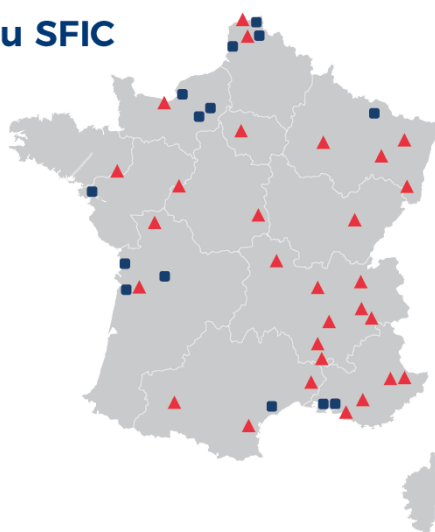


Figure 7 – Répartition en France des sites industriels des adhérents du SFIC [17]

La France est le deuxième producteur de ciment de l'Union Européenne en 2016 avec 17 % de la production totale [18].

Le graphique de la figure suivante représente l'évolution du ratio production de clinker/consommation de ciment entre 1986 et 2013. L'indicateur diminue en raison de l'augmentation des importations mais également en raison d'une hausse de la vente des ciments à plus faible teneur en clinker, notamment les CEM II/A-LL [19].

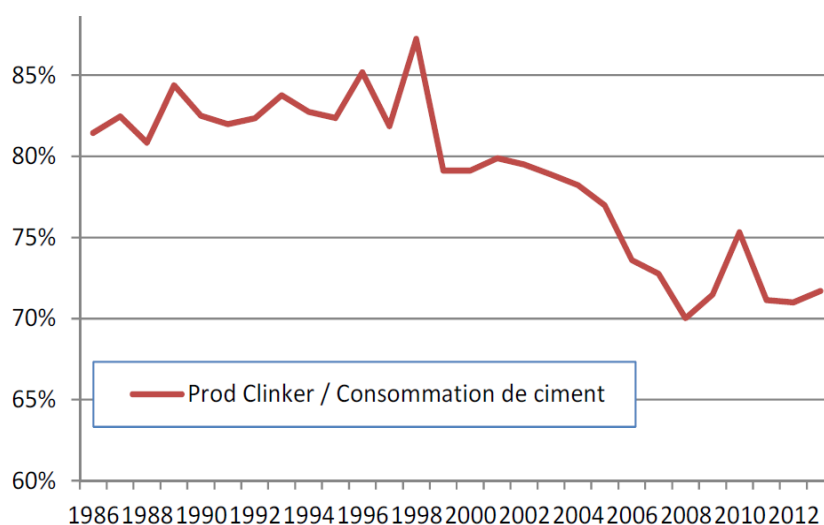


Figure 8 – Évolutions du ratio de production de clinker/consommation de ciment 1986-2013 [19]

2.5 Évolutions de la filière ciment

En 2015, les émissions de la production française de clinker sont de 10,75 millions de tonnes d'équivalent CO₂ [20]. Ces émissions proviennent pour 40 % de la combustion nécessaire à la calcination du cru et pour 60 % de la décarbonatation du calcaire lors de la calcination (transformation du carbonate de calcium (CaCO₃) en chaux (CaO) et en dioxyde de carbone (CO₂)). Les paragraphes suivants présentent les actions menées par l'industrie cimentière pour réduire son impact environnemental à court, moyen et long terme.

2.5.1 Feuille de route pour la décarbonatation de la filière ciment

En cohérence avec les orientations de la Stratégie Nationale Bas Carbone, le Conseil National de l'Industrie et la filière ciment ont établi une feuille de route pour la décarbonatation de l'industrie cimentière. Celle-ci définit des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre à deux échéances [20] :

- > d'ici 2030 : diminution de 24 % des émissions par rapport à 2015 (soit une diminution de 2,5 millions de tonnes d'équivalent CO₂) ;
- > d'ici 2050 : diminution de 80 % des émissions par rapport à 2015 (soit une diminution de 8,3 millions de tonnes d'équivalent CO₂).

Les moyens suivants sont prévus pour atteindre l'objectif fixé pour 2030 :

- > augmentation de la teneur en combustibles alternatifs pour atteindre 80 % d'utilisation en 2030 (le taux d'utilisation possible de combustibles alternatifs est néanmoins très limité pour les ciments blancs) ;
- > augmentation de la part de biomasse dans les combustibles de 400 kt en 2016 à 1 030 kt en 2030 ;
- > amélioration de l'efficacité énergétique des fours via le remplacement d'une partie des cimenteries dans les prochaines années ;
- > réduction de la teneur en clinker des ciments en augmentant et en diversifiant les ajouts, notamment en augmentant la part d'argile calcinée et de calcaire dans les ciments.

L'objectif prévu pour 2050 ne peut être atteint qu'en complétant les moyens décrits ci-dessus par l'utilisation de méthodes de captage puis de stockage ou de réutilisation du CO₂ (CCS : Carbon Capture & Storage/CCU : Carbon Capture & Usage). Aujourd'hui, ces méthodes ne sont pas encore opérationnelles mais les acteurs de la filière travaillent au développement de différentes techniques. Parmi les recherches en cours, figurent par exemple des travaux sur le stockage du CO₂ dans les sols ou sous les océans ou la transformation du CO₂ en combustible. Ces technologies très coûteuses nécessiteront l'installation d'une usine de captage de CO₂ à proximité des cimenteries. De fait, toutes les cimenteries ne sont pas susceptibles d'accueillir ces nouvelles technologies, du moins selon les mêmes rendements écologiques et économiques. Les technologies de captage et de valorisation du CO₂ pourraient être mises en place dans toutes les usines. En revanche, le stockage du CO₂ n'est pas possible sur tous les sites. Ces technologies auront un impact non négligeable sur le prix du ciment. Les premiers sites devraient être opérationnels à partir de 2025.

La figure ci-dessous illustre les différents leviers de réduction des émissions de carbone envisagés par l'industrie cimentière entre 2015 et 2050.

(en kgCO₂/T. de ciment)

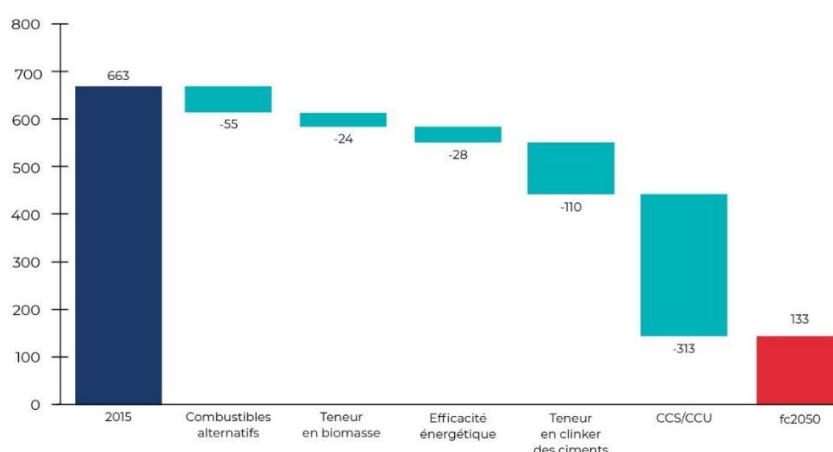


Figure 9 – Leviers de réduction des émissions de carbone [20]

2.5.2 Évolutions de l'offre cimentière à court terme

Afin d'enclencher au plus tôt la transition vers la production de béton à plus faible impact environnemental, les cimentiers élargissent leur gamme de ciments à plus faible teneur en clinker et accompagnent leurs clients dans l'utilisation de ces ciments. Des réflexions sont notamment en cours quant à l'arrêt de la distribution de ciments CEM I autres que techniques (SR/PM) par Lafarge et leur remplacement par des CEM II/A-LL [21].

D'autre part, avec la publication récente de la norme NF EN 197-5, les cimentiers prévoient la production des nouveaux ciments CEM II/C-M et CEM VI. Ces ciments contiennent une teneur réduite en clinker : entre 50 et 64 % pour les CEM II/C-M et entre 35 et 49 % pour les CEM VI [20].

3 LES CONSTITUANTS DES LIANTS CIMENTAIRES DONT L'USAGE EST NORMALISÉ

Ce chapitre décrit les matériaux utilisés comme constituants des liants cimentaires et dont l'usage en tant qu'additions ou constituants du ciment est admis par les normes de référence actuelles. On distingue d'une part les matériaux issus directement de carrière et d'autre part les co-produits industriels. Ils sont répertoriés dans le tableau ci-dessous qui indique si leur usage est autorisé en tant qu'addition pour béton ou constituant du ciment.

Tableau 2 – Constituants des liants cimentaires dont l'usage est normalisé

	Bétons NF EN 206/CN	Ciments NF EN 197-1 NF EN 197-5
<i>Matériaux issus de carrières</i>		
Calcaires	X (type I)	X
Additions siliceuses	X (type II)	
Pouzzolanes naturelles*		X
Pouzzolanes naturelles calcinées/argiles calcinées	Métakaolins (type II)	X
<i>Co-produits industriels</i>		
Laitiers de haut-fourneau	X (type II)	X
Cendres volantes siliceuses	X (type II)	X
Cendres volantes calciques		X
Fumée de silice	X (type II)	X
Schistes calcinés		X

* Ce matériau ne dispose pas d'une norme spécifique, cependant son utilisation dans le béton peut être rendue possible en tant que filler sous couvert de respecter la norme Granulats NF EN 12620 et la norme NF P18-545.

3.1 Les matériaux issus directement de carrières

3.1.1 Les fillers et additions calcaires

Origine

Les fillers et additions calcaires sont produits à partir de roches calcaires ou dolomitiques finement broyées.

Utilisation dans les bétons

En tant qu'addition pour béton, les calcaires font l'objet de la norme NF P 18-508. Les additions calcaires peuvent être utilisées pour la fabrication de béton suivant la norme NF EN 206/CN en tant qu'additions quasi-inertes chimiquement (additions de type I). Les calcaires sont

également inclus dans les normes NF EN 197-1 et NF EN 197-5 pour une utilisation dans les ciments.

Néanmoins, les exigences sur la composition des calcaires diffèrent suivant la norme considérée :

- > pour les additions calcaires, la norme NF P 18-508 requiert notamment une teneur en carbonate de calcium CaCO_3 supérieure à 95 % (type A) ou 65 % (type B) avec une teneur totale en carbonates ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$) supérieure à 95 % (type A) ou 90 % (type B) ;
- > pour une utilisation dans les ciments suivant la norme NF EN 197-1, la teneur en carbonate de calcium CaCO_3 doit être supérieure à 75 % ;
- > pour une utilisation dans les ciments suivant la norme NF EN 197-5, la teneur en carbonate de calcium CaCO_3 doit être supérieure à 40 % et la teneur totale en carbonates ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$) supérieure à 75 %.

L'utilisation des calcaires dans la composition des ciments et des bétons est très répandue. Ils ont un effet bénéfique sur la rhéologie du béton et sont très efficaces pour la production de béton autoplaçant.

Alors qu'ils sont généralement considérés comme inertes et utilisés pour leur effet filler, certaines études ont mis en évidence leur contribution à l'hydratation des liants via notamment des réactions avec les aluminates [22] [23]. D'autre part, ils contribuent à la compacité du squelette granulaire des bétons. Ces propriétés rendent leur usage particulièrement intéressant dans les mélanges ternaires, en particulier ceux contenant du laitier ou des argiles calcinées [24]. Les additions calcaires représentent en général 10 à 30 % du liant mais les récents travaux de recherche ont montré qu'elles pourraient remplacer jusqu'à 70 % du clinker [1] [23].

Empreinte carbone

L'empreinte carbone des calcaires broyés est estimée entre 30 et 60 kg eq CO_2 /tonne suivant la finesse considérée [25] [26] [27].

Disponibilité

Les roches carbonatées sont largement disponibles et réparties sur le territoire français (calcaire, dolomie, marne, craie, marbre). En 2015, la production de carbonates était de 24,3 millions de tonnes (hors granulats et matériaux pour la production de ciment), extraits de 87 carrières. La production est majoritairement destinée à l'industrie de la chaux, aux charges minérales, à la chimie, à la sidérurgie, à la verrerie ou encore à l'agroalimentaire [28].

Les gisements potentiels, exploités ou non, ainsi que les carrières sont localisées sur les cartes des figures 10 et 11.

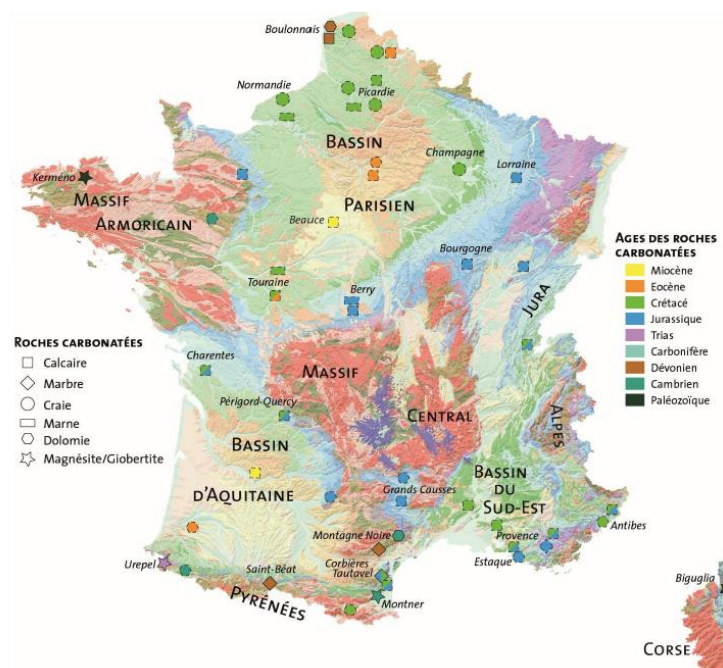


Figure 10 – Localisation des gisements potentiels de roches carbonatées [28]

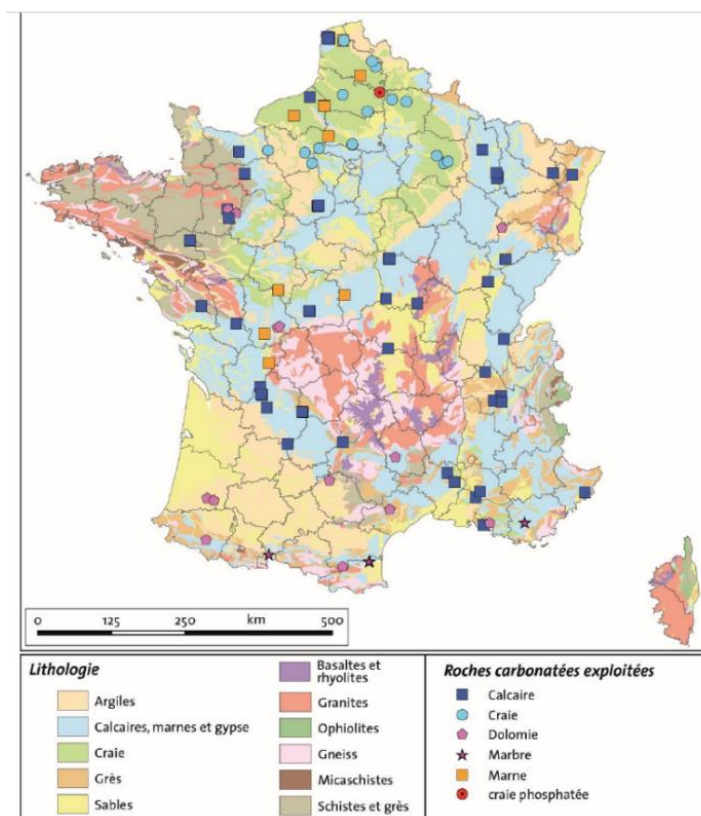


Figure 11 - Carte des carrières actives en France, exploitants de roches carbonatées en 2015, à l'exception des carbonates pour un usage en cimenterie [28]

Les producteurs d'additions calcaires sont nombreux en France (Omya, Saint-Hilaire, Carbocia, Carmeuse...). De plus en plus de fournisseurs de granulats et de cimentiers en proposent à la

vente. La société OMYA est le principal acteur sur le marché, avec 24 sites d'unités de transformation réparties sur le territoire (voir figure 12). Elle propose des produits de différentes finesses. Depuis peu, elle propose à sa gamme le Betocarb UF, carbonate de calcium pur et ultrafin à destination des bétons à faible impact carbone.



Figure 12 – Répartition des sites de production d'addition calcaire de la société OMYA en France

Perspectives

Aujourd'hui, la quantité annuelle de matériaux disponibles en tant que filler et addition calcaire pour béton se situe entre 4 et 10 millions de tonnes. La prévision de production pour les dix prochaines années est à la hausse. La demande tend à augmenter, aussi bien dans les bétons, en tant qu'addition minérale, que dans les ciments.

3.1.2 Les additions siliceuses

Origine

La norme NF P 18-509 relative aux additions siliceuses distingue les additions de minéralogie Qz, produites à partir de quartz lavé séché et les additions de minéralogie Cb, produites à partir de cristobalite calcinée. Les quartz lavés séchés doivent provenir d'un gisement reconnu et être constitués d'au moins 90 % de quartz. Le sable est d'abord lavé sous eau afin d'éliminer les argiles puis séché et broyé.

La cristobalite est une espèce minérale du groupe des silicates, composée de dioxyde de silicium de formule SiO_2 (silice) avec des traces d'autres éléments et à système cristallin tétragonal ou cubique instable à partir de 1 470 °C. La cristobalite calcinée est produite industriellement dans des fours de calcination (maintenus à une température autour de 1 500 °C) qui transforment la silice naturelle en cristobalite.

Utilisation dans les bétons

Les additions siliceuses font l'objet de la norme NF P 18-509. Leur utilisation en tant qu'additions dans le béton est autorisée par la norme NF EN 206/CN. Elles sont considérées en tant qu'additions quasi-inertes chimiquement. Leur utilisation comme constituants des ciments n'est pas prévue dans les normes en vigueur.

Elles contribuent à la compacité du béton ainsi qu'à sa résistance aux acides. Elles ont peu d'influence sur la rhéologie du béton frais.

Pour le béton non traité thermiquement, les additions siliceuses sont considérées comme inertes. Néanmoins, suivant la température et la pression auxquelles elles sont soumises, par exemple pour la fabrication de bétons à très hautes performances traités à une température supérieure à 90 °C [29] ou pour la fabrication de béton cellulaire autoclavé, elles permettent la formation de nouveaux hydrates qui entraînent une augmentation de la résistance en compression du matériau.

L'utilisation des additions siliceuses dans les bétons est moins répandue que celle des additions calcaires. Le quartz se retrouve plus généralement dans le béton sous la forme de sables correcteurs. Il s'agit de sables arrondis très fins et sans fines (généralement 0,1/0,5 mm) qui complètent le squelette granulaire du béton évitant un surdosage en liant, tout en jouant favorablement sur la rhéologie et la stabilité des bétons, en particulier les bétons pompés.

Empreinte carbone

D'après des données provenant de l'ELCD (European Life Cycle Database), l'empreinte carbone des additions siliceuses serait comprise entre 60 et 120 kg CO₂ éq./tonne selon les sources et les caractéristiques des produits.

Disponibilité

La carte de la figure 13 présente les 68 carrières produisant de la silice industrielle recensées en France par le BRGM en 2013. La production brute de sables siliceux, en sortie de carrières, était d'environ 6,37 millions de tonnes en 2012. Cette production est nettement inférieure à la production totale autorisée pour l'ensemble des carrières qui est de 18,6 millions de tonnes par an. La silice industrielle est principalement utilisée en verrerie, en fonderie et en électrometallurgie [30].

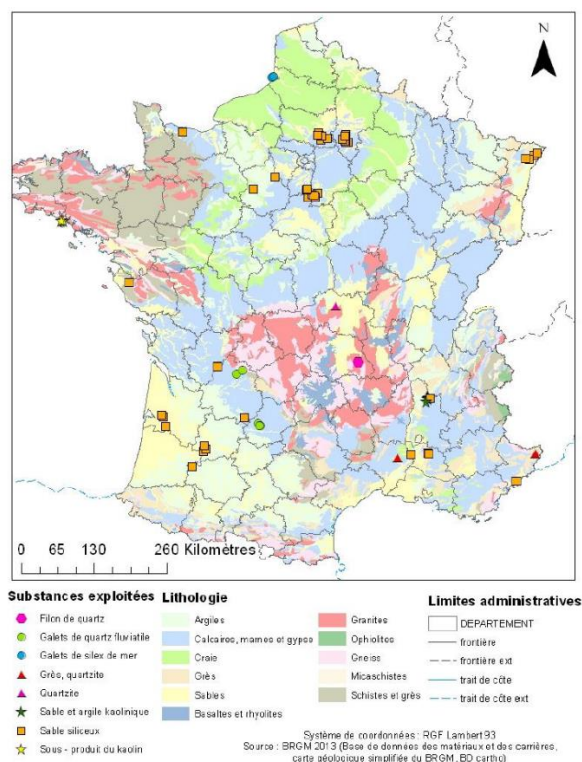


Figure 13 - Localisation des exploitations de silice industrielle (tous types) en France en 2014 [30]

La silice utilisée pour la fabrication de béton a des caractéristiques moins exigeantes que celle employée dans d'autres industries.

La société Sibelco est le principal fournisseur d'additions siliceuses pour béton conformes à la norme NF P 18-509 en France. Elle produit et commercialise des sables correcteurs et des additions siliceuses. Les additions siliceuses sont issues des sables siliceux broyés et sont disponibles en différentes finesses.

Sibelco possède 10 à 15 sites de production de sable siliceux répartis entre le Bassin parisien, le Vaucluse et le Sud-Ouest. Les additions siliceuses sont principalement produites sur le site de Compiègne dans l'Oise, à partir de sable extrait à Crépy-en-Valois. La capacité de production y est de 200 kt/an. Le site d'Entraigues-sur-la-Sorgue dans le Vaucluse produit également des additions siliceuses.

Perspectives

Au vu des importantes ressources en silice disponibles en France, l'utilisation des additions siliceuses pourrait être amenée à augmenter en réponse à la raréfaction de certains co-produits industriels.

3.1.3 Les pouzzolanes naturelles

Origine

Les pouzzolanes naturelles sont des roches d'origine volcanique à structure alvéolaire. Elles ont été formées à partir de fragments de magma projetés dans l'atmosphère lors d'éruptions volcaniques. Elles sont principalement constituées de verre volcaniques et de minéraux magmatiques [31].



Figure 14 – Carrière de pouzzolane (Dugour Pouzzolane)

Utilisation dans les bétons

En raison de leur légèreté, les granulats de pouzzolanes sont couramment employés pour la production de béton léger. En tant que liant, la pouzzolane broyée est un matériau intéressant pour le béton en raison de ses propriétés pouzzolaniques (réaction avec l'hydroxyde de calcium pour former des silicates de calcium hydratés, comparables à ceux formés lors de l'hydratation du ciment).

Les pouzzolanes naturelles peuvent être utilisées pour la production de ciment suivant les normes NF EN 197-1 et NF EN 197-5. À ce jour, la seule production de ciment contenant des pouzzolanes naturelles en France métropolitaine se situe à l'usine Vicat de Créchy (03) qui produit un ciment CEM II/A-M (LL-P) contenant 6 % de pouzzolane et un ciment CEM IV/A (P) contenant 20 % de pouzzolane (gamme NATURAT). Les pouzzolanes naturelles ne disposent pas d'une norme propre pour une utilisation en tant qu'addition pour béton.

Empreinte carbone

Il n'a pas été identifié de données précises et fiables. Dans la mesure où il s'agit d'une roche broyée, la valeur devrait être proche de celle des calcaires (entre 30 et 60 kg eq CO₂/tonne).

Disponibilité

Les gisements français exploités se situent majoritairement dans le Massif central. Dix-huit carrières sont en activité. Les réserves françaises sont importantes. À elle seule la Chaîne des Puys représenterait 700 millions de tonnes [31]. Néanmoins, le classement de la Chaîne des Puys sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO depuis 2018 pourrait constituer un frein à l'exploitation de ces ressources [32].

La production nationale métropolitaine était de 687 600 tonnes en 2013, dont environ 90 % en Auvergne [33]. Cette production est aujourd'hui essentiellement destinée à la production de granulats pour l'ornementation, le paillage, la voirie, l'assainissement ou encore les sols sportifs. Les cartes suivantes représentent la localisation des carrières de pouzzolane en France et plus spécifiquement en Auvergne (carrés rouges sur la seconde carte).



Figure 15 – Localisation des gisements français de pouzzolanes [31]

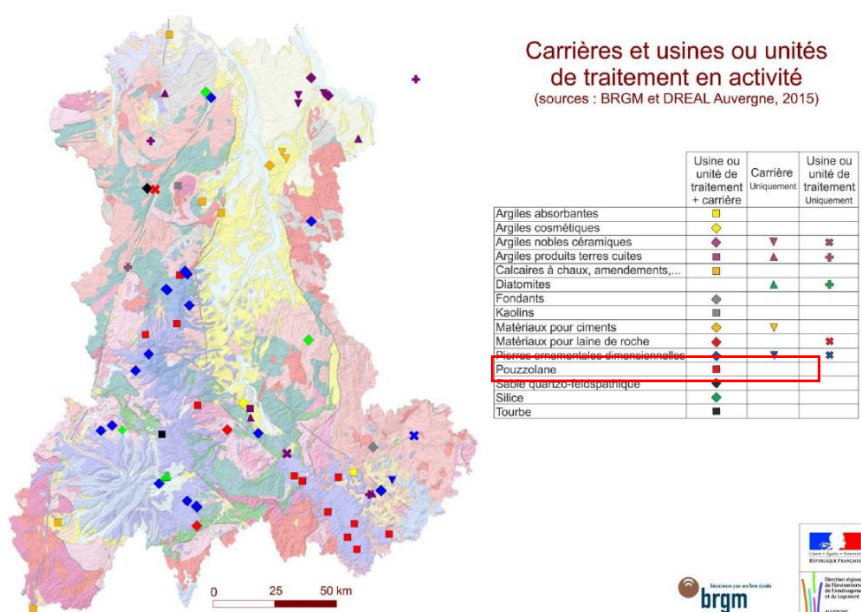


Figure 16 – Carrières de pouzzolanes exploitées en Auvergne (carrés rouges) [33]

Perspectives

Le classement de la Chaine des Puys sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO depuis 2018 pourrait entrainer l'interdiction de l'ouverture de toute nouvelle carrière et imposer à terme la fermeture des carrières de pouzzolane existantes. Ce classement pourrait compromettre les perspectives pour l'utilisation de ce matériau à moyen terme (après 2030).

3.1.4 Les argiles calcinées

Origine

Les argiles calcinées regroupent un ensemble de produits aux caractéristiques très variables (métakaolins, méta-illites, méta-palygorskite, mélanges de phases argileuses...). Lorsqu'elles sont calcinées entre 700 et 850 °C, certaines argiles présentent des propriétés pouzzolaniques recherchées pour une utilisation dans les bétons [34]. En particulier, la calcination des kaolins ou des argiles kaoliniques permet la production de métakaolin. Celui-ci peut être obtenu par calcination lente (cuisson pendant quelques heures dans un four horizontal) ou par calcination flash (cuisson pendant quelques secondes dans un four vertical) moins consommatrice d'énergie [35].

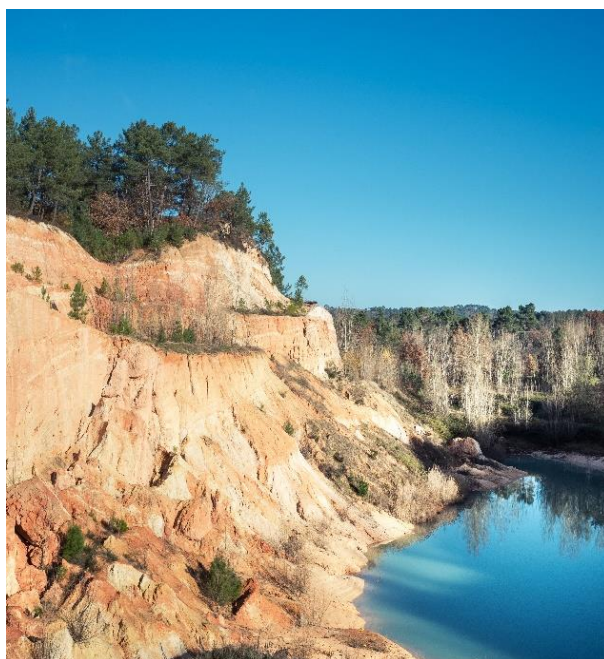


Figure 17 – Gisement d'argiles kaoliniques de Fumel (Argeco)

Utilisation dans les bétons

L'utilisation d'argile calcinée est possible comme constituant du ciment. Dans les normes NF EN 197-1 et NF EN 197-5, elles sont incluses dans la catégorie pouzzolane naturelle calcinée (Q) sous réserve d'une teneur en SiO₂ réactif supérieure ou égale à 25,0 % en masse. À ce jour, seule l'usine Lafarge basée à La Malle (13) produit un ciment à base de pouzzolane naturelle calcinée en France. Il s'agit d'un CEM V/A contenant 20 % de pouzzolane naturelle calcinée de la gamme ECOPlanet [36]. Néanmoins, les cimentiers prévoient l'élargissement de leur offre aux ciments d'argile calcinée. Par exemple, le groupe Vicat investit dans des nouvelles capacités de production d'argiles calcinées (méta-illites) qui seront utilisées en substitution partielle du clinker Portland dans son usine de Xeuilley (54) [37]. La start-up industrielle Cem'In-EU prévoit la production de CEM II/C-M et d'un CEM IV à base de métakaolin à partir de 2022 [38]. Par ailleurs, la Compagnie des Ciments Belges produit un CEM II/B-M (Q-LL), le FuturecemTM, contenant 16 % d'argile calcinée, à Gaurain en Belgique.

En outre, des travaux de recherche portent sur le développement de ciments ternaires composés d'un mélange de clinker, d'argile calcinée et de calcaire. Des travaux ont montré

qu'un ciment fabriqué à partir d'argiles contenant environ 40 % de kaolin et avec des proportions de 50 % de clinker, 30 % d'argile calcinée, 15 % de calcaire et 5 % de gypse pouvait présenter des performances mécaniques comparables à celles d'un CEM I [39].

Les métakaolins, en tant qu'addition pour béton, font l'objet de la norme NF P 18-513. Ils peuvent être utilisés dans les bétons suivant la norme NF EN 206/CN. Leur utilisation est possible pour les environnements agressifs suivant le fascicule de documentation FD P18-011. Les autres types argiles calcinées ne sont pas considérées en tant qu'additions pour béton. Il existe moins de recul sur l'impact de la minéralogie des argiles sur leur comportement dans les bétons.

Les argiles calcinées contribuent à l'augmentation des résistances mécaniques du béton grâce à l'effet pouzzolanique (consommation de la portlandite pour former de nouveaux hydrates) ainsi qu'à l'amélioration de la durabilité du béton (densification de la matrice cimentaire). Les métakaolins sont usuellement utilisés à hauteur de 10 à 25 % de la masse de ciment. Leur utilisation couvre la totalité de la gamme des bétons depuis les C25/30 jusqu'aux BFUP.

Empreinte carbone

L'empreinte carbone des argiles calcinées est estimée entre 139 et 239 kg eq CO₂/tonne [11] [40]. Cette valeur pourrait être amenée à diminuer dans le temps, au gré des améliorations technologiques.

Disponibilité

En France, la production annuelle de kaolins et d'argiles kaoliniques est de l'ordre de 400 à 450 kt toutes utilisations confondues. La production autorisée s'élève à 4,2 millions de tonnes par an. Les gisements exploités se situent principalement dans le Massif central et le Massif armoricain. Des gisements secondaires sont exploités dans le Bassin parisien, le Bassin aquitain, le fossé de Limagne et le Bassin du Sud-Est. D'après le BRGM, il reste en France de nombreux gisements de kaolins et d'argile kaoliniques non encore exploités. Les cartes suivantes présentent la localisation des gisements et des exploitations de kaolins et d'argiles kaoliniques en France. Leur production est actuellement principalement utilisée pour la fabrication du papier, des céramiques et du verre [41].



Figure 18 – Gisements français de kaolins et d’argiles kaoliniques [41]

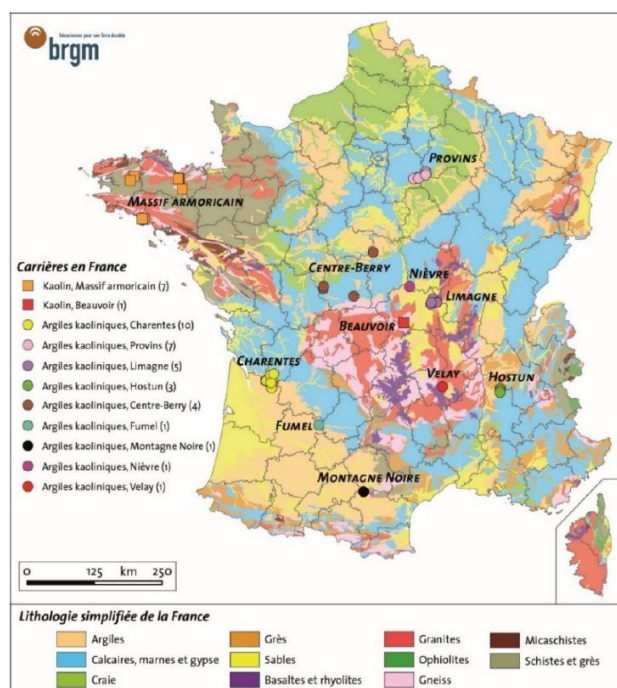


Figure 19 – Exploitations françaises de kaolins et d’argiles kaoliniques [41]

En 2017, 41 carrières exploitaient le kaolin ou l’argile kaolinique en France.

Les sociétés exploitantes de kaolins ou d’argiles kaoliniques recensées sont les suivantes : Argeco, Arvel, Aurion et fils, Fontes Refractories, Imerys, Sibelco et Soka. Parmi ces entreprises, trois produisent du métakaolin :

- Argeco Développement, filiale de Colas, produit un métakaolin flash à Fumel (47). La production actuelle est d’environ 20 kt par an. La capacité de production est de 60 kt par an. Le gisement exploité est de 5,5 millions de tonnes et l’autorisation d’exploiter

- > court pour 30 ans. Argeco distribue ses métakaolins dans le grand quart Sud-Ouest de la France, et parfois très au-delà en fonction des applications.
- > Imerys produit un métakaolin traditionnel à Clérac (17). La capacité de production est de 110 kt par an [11]. Elle produit également du métakaolin flash en faibles quantités.
- > Soka produit un métakaolin à Quessoy (22).

La filière béton représente quelques pourcents du marché des kaolins et argiles kaoliniques [41].



Figure 20 – Tour de calcination flash de Fumel (Argeco)

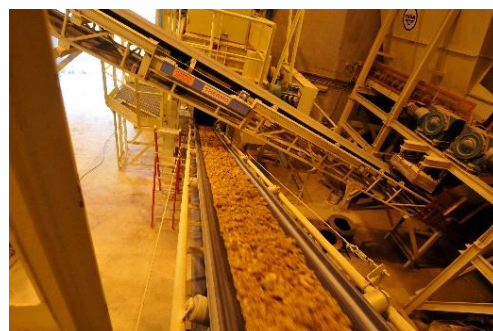


Figure 21 – Trémie d'alimentation de l'installation de calcination flash de Fumel

Perspectives

Concernant les argiles calcinées d'une manière plus générale, la carte ci-dessous représente la répartition en Europe des sols argileux appropriés pour une utilisation dans les bétons (aires en bleu). Elle est extraite d'une étude réalisée conjointement par l'École polytechnique fédérale de Zurich et l'École polytechnique fédérale de Lausanne pour le compte de la fondation européenne pour le climat et dont la visée était d'évaluer le potentiel des technologies pour la réduction des émissions de CO₂ des industries du ciment et du béton [42].

Cette étude souligne le fait que, jusqu'à présent, les argiles calcinées ont peu été utilisées dans les bétons en Europe en raison de leur manque de compétitivité économique par rapport aux laitiers et aux cendres volantes. Il est vraisemblable que cette situation évolue dans les prochaines années, pour plusieurs raisons. Tout d'abord, la disponibilité des co-produits industriels tend à diminuer en raison des évolutions au sein des industries auxquelles ils sont liés. De plus, de nombreux travaux mettent en évidence qu'il est possible de substituer des taux élevés de clinker par un mélange d'argile calcinée et de calcaire [1] [2] [39]. Les émissions de CO₂ de certains co-produits industriels sont revues à la hausse, cas des laitiers de haut-fourneau notamment. Enfin, l'utilisation dans les bétons ne requiert pas des argiles de grande pureté, contrairement à d'autres industries comme celle de la céramique.

Cependant, même si les argiles appropriées pour un usage dans les bétons sont largement disponibles en Europe, comme illustré sur la figure 22, des difficultés pourraient être rencontrées, du moins sur le court terme, en raison de la logistique nécessaire pour l'approvisionnement des cimenteries et des sites de production du fait de la taille des carrières [42].

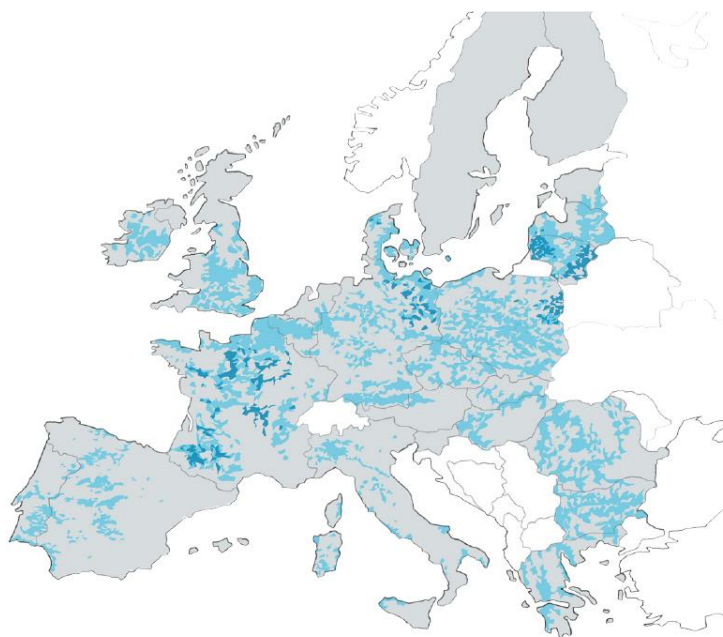


Figure 22 – Répartition en Europe des sols argileux appropriés pour une utilisation dans les bétons (hors sols contenant des smectites) [42]

3.2 Les matériaux correspondant à des co-produits industriels

3.2.1 Les laitiers de haut-fourneau

Origine

Le laitier est un coproduit de la fabrication de la fonte élaborée dans les hauts-fourneaux [43]. La première étape dans la production de l'acier est l'obtention de la fonte : le minerai de fer, est introduit avec du coke (combustible) et de la chaux (fondant) dans un haut-fourneau (four vertical, dans lequel des larges volumes d'air chaud sont soufflés dans la partie basse par des tuyères). Il s'agit d'un process continu dans lequel la colonne de matières brutes descend au fur et à mesure que le fer (sous forme de fonte) est extrait du minerai. La fonte s'accumule au fond du haut-fourneau et est recouverte par le laitier liquide en fusion dont la densité est plus faible. Le laitier et la fonte en fusion (à environ 1 500 °C) sont extraits périodiquement du haut-fourneau. Lorsque le laitier est refroidi rapidement par une trempe à l'eau sous pression, il forme du laitier vitrifié appelé laitier granulé qui est broyé pour être utilisé comme liant dans les bétons. Lorsque le laitier est refroidi lentement à l'air libre, il forme du laitier cristallisé sans activité hydraulique utilisé comme granulat pour couches de chaussées.

Une tonne de fonte génère environ 280 kg de laitier.



Figure 23 – Site de transformation du laitier de haut-fourneau (CTPL)

Utilisation dans les bétons

L'utilisation des laitiers granulés de haut-fourneau moulus en tant qu'addition dans les bétons est encadrée par la norme NF EN 15167-1. Ils peuvent être utilisés dans les bétons en tant qu'addition de type II suivant la norme NF EN 206/CN. Ils peuvent également être utilisés comme constituant du ciment suivant les normes NF EN 197-1 et NF EN 197-5.

Les laitiers de haut-fourneau présentent des propriétés hydrauliques latentes. Les réactions d'hydratation sont activées en présence de sulfates ou d'activateurs alcalins. La cinétique d'hydratation des laitiers de haut-fourneau est plus lente que celle du ciment Portland. Toutefois, l'étuvage permet d'accélérer le durcissement des bétons contenant des laitiers de haut-fourneau. En effet, étant plus sensibles à la température que le ciment CEM I, leurs cinétiques d'hydratation sont considérablement accélérées par un traitement thermique approprié. L'accélération de l'hydratation peut également être obtenue par l'utilisation d'adjuvants accélérateurs.

L'utilisation des laitiers de haut-fourneau dans les ciments et les bétons est courante. Le taux moyen de substitution du CEM I par du laitier de haut-fourneau moulu se situe entre 30 et 50 % pour des produits courants. Dans les ciments à base de laitier, la teneur en laitier se situe en moyenne entre 50 et 70 %. Pour certaines applications, comme les bétons soumis à un environnement chimiquement agressif, le niveau de substitution peut aller jusqu'à 95 % dans les ciments CEM III/C, avec cependant des augmentations des durées de prise qui peuvent être compensées dans une certaine mesure par l'utilisation d'accélérateurs appropriés.

À ce jour en France, l'usage des laitiers de haut-fourneau est limité pour la fabrication de béton précontraint en raison de leur teneur élevée en sulfures. Ces limites font actuellement l'objet de discussions au sein du groupe d'expert « Solutions Bas Carbone » évoqué précédemment.

Empreinte carbone

En mai 2022, la DHUP a publié un rapport recommandant l'intégration d'une affectation économique entre la fonte et le laitier de haut-fourneau à une hauteur de 1,4 % pour le laitier de haut-fourneau. L'impact du laitier de haut-fourneau serait ainsi de 83 kg CO₂ éq./tonne et l'impact du laitier de haut-fourneau granulé moulu de l'ordre de 100 kg CO₂ éq./tonne.

Statut réglementaire

Le laitier de haut-fourneau est un coproduit de l'industrie de la fonte. La reconnaissance de son statut de coproduit a été actée en 2016 par le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie.

Disponibilité

En 2021, la production de laitier de haut-fourneau en France était de 2,9 millions de tonnes. Environ 2,4 millions de tonnes de laitiers sous forme vitrifiée ont été produites et utilisées pour la production de ciment et de béton. En 2020, la production était en diminution d'environ 22 % par rapport aux 2 années précédentes compte tenu de la baisse d'activité de l'économie mondiale liée à la crise sanitaire du COVID-19 [44].

Les graphiques suivants illustrent l'évolution de la production de laitier en France depuis 2003. Si l'on ne tient pas compte des situations exceptionnelles de l'année 2009 (crise économique des « sub-primes ») et de l'année 2020 (crise du COVID-19) qui reflètent des situations économiques mondiales dégradées, cette production est assez stable depuis près de 15 ans.

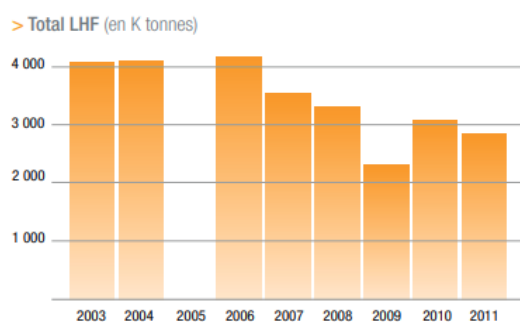


Figure 24 – Production de laitier en France entre 2003 et 2011 [45]

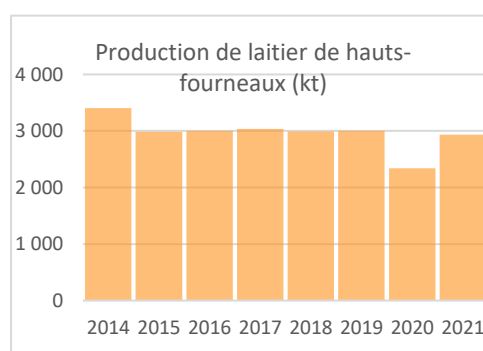


Figure 25 – Production de laitier en France entre 2014 et 2021 [44]

On estime que l'importation de laitier de haut-fourneau représente aujourd'hui environ 10 à 15 % du laitier utilisé en France.

Sur le territoire national, seuls les sites sidérurgiques de la société ArcelorMittal (Fos-sur-Mer (13) et Dunkerque (59)) produisent les laitiers de haut-fourneau granulés qui sont utilisés dans l'industrie des liants hydrauliques (formulation des bétons et fabrication des ciments). Le client et distributeur principal de ces matériaux est l'entreprise Ecocem (commercialisation de 1,4 millions de tonnes par an, soit environ la moitié de la production française). Les cimentiers Eqiom, Calcia, Vicat et Lafarge proposent également dans leur gamme des ciments au laitier (CEM II, CEM III, CEM II/C-M et CEM VI).

Perspectives

La production des laitiers de haut-fourneau est directement liée à celle de la fonte. D'après les informations fournies par le Centre Technique et de Promotion des Laitiers sidérurgiques (CTPL), la profession n'attend pas d'évolution majeure de la production avant 2028. L'approvisionnement devrait être assuré pour les six prochaines années. Néanmoins, la production de laitier de haut-fourneau pourra varier à la marge selon le marché de l'acier. Il

n'est pas non plus envisagé de construire ou de fermer des hauts-fourneaux d'ici cette échéance.

Au-delà de 2028, des évolutions majeures sont attendues. ArcelorMittal, et d'une manière générale la filière de production de l'acier au niveau européen, vise une réduction de 30 % de ses émissions de CO₂ d'ici 2035 et la neutralité carbone d'ici 2050. L'axe d'évolution sera celui d'un changement radical du process de production de l'acier. En effet, le procédé associant le haut-fourneau avec un convertisseur est très émetteur de CO₂ en raison de l'utilisation de coke dans le haut-fourneau et de l'oxydation du carbone de la fonte au convertisseur. Ainsi, les hauts-fourneaux devraient à terme être remplacés par des procédés moins carbonés. Des investissements très importants sont prévus pour une transition progressive à partir de 2028. D'ici dix à vingt ans, il est à prévoir que la disponibilité des laitiers de haut-fourneau tels qu'on les connaît aujourd'hui en Europe puisse baisser de moitié. L'import massif de laitier de haut-fourneau est peu probable, car la ressource se raréfie partout en Europe et dans le monde.

3.2.2 Les cendres volantes siliceuses

Origine

Les cendres volantes sont des déchets des chaudières des centrales à charbon. Il s'agit de poudres fines constituées de particules vitreuses composées essentiellement de silice et d'alumine. Elles sont obtenues par précipitation électrostatique ou mécanique des particules pulvérulentes contenues dans les gaz de combustion produits par les chaudières des centrales à charbon. Ces dernières produisent de l'électricité en brûlant de l'anthracite pulvérisée ou de la houille bitumineuse [46].

Les cendres volantes siliceuses font l'objet de la norme NF EN 450-1.

Utilisation dans les bétons

Pour une utilisation en tant qu'addition dans les bétons, les cendres volantes siliceuses doivent être conformes à la norme NF EN 450-1. Elles peuvent également être utilisées comme constituant des ciments. En France, huit ciments contenant entre 6 et 24 % de cendres volantes siliceuses sont produits à ce jour [36].

Dans les bétons, elles agissent d'abord physiquement par leur granulométrie, leur état de surface, leur forme et leur masse volumique en améliorant principalement la compacité, puis chimiquement par leurs propriétés pouzzolaniques qui améliorent la durabilité du fait des réactions avec la chaux conduisant à la formation d'hydrates. Elles sont notamment utilisées pour la fabrication de bétons à hautes performances.

Empreinte carbone

L'empreinte carbone des cendres volantes séchées extraites des stocks historiques est estimée à 47,5 kg eq CO₂/tonne [40].

Statut réglementaire

Les cendres volantes sont considérées comme des déchets non dangereux.

Disponibilité

La France ne possède plus que deux centrales à charbon encore actives sur son territoire métropolitain. Néanmoins, la centrale de Saint-Avold a fermé en mars 2022 (une réouverture potentielle pour l'hiver 2022-2023 est envisagée à ce stade en raison du contexte international) et celle de Cordemais devrait fermer au plus tôt en 2024. Il reste donc très peu de production de cendres volantes en France. Les cendres volantes disponibles en France proviennent principalement de stocks français, voire d'importation.

Les sites de production et de stocks existants les plus importants sont situés dans les régions qui ont connu l'exploitation de la houille. Les cendres volantes de charbon sont pour la plupart produites par deux grands groupes : Électricité de France (EDF) et Gazel Energie (groupe EPH). La commercialisation est assurée par les sociétés Surschiste et EDF :

- > Surschiste commercialise chaque année environ 400 kt de cendres volantes issues des sites de Gardanne, Saint-Avold et Hornaing ;
- > les quantités de cendres volantes commercialisées par EDF sont estimées à environ 200 kt par an.

L'importation représente environ 20 % du marché des cendres volantes.

Perspectives

Grâce aux stocks importants (estimés à 8 millions de tonnes [47]), la disponibilité peut être tenue sur les 10 prochaines années. À l'avenir, les importations devraient augmenter, soit à partir de stocks existants, soit issues de productions actuelles (Allemagne, Sardaigne, Italie, Turquie, voire Maroc).



Figure 26 – Stocks de cendres volantes à Hornaing (Surschiste)



Figure 27 – Unité de séchage des cendres volantes à Hornaing (Surschiste)

3.2.3 Les cendres volantes calciques

Origine

Suivant le type de combustible utilisé, les centrales à charbon peuvent également produire des cendres volantes calciques. Elles contiennent des quantités importantes d'anhydrite et de chaux vive. On y trouve également du quartz en proportion non négligeable. Du fait de leur minéralogie, de leur chimie et de leur teneur en chaux libre importante, ces cendres présentent un caractère à la fois hydraulique et pouzzolanique.

Utilisation dans les bétons

Les cendres volantes calciques peuvent être utilisés dans les ciments suivant les normes NF EN 197-1 et NF EN 197-5 mais ne sont pas considérées comme additions pour béton. Aucune usine en France ne produit de ciment contenant des cendres volantes calciques à ce jour. Ainsi, il n'y a pas d'utilisation connue des cendres volantes calciques actuellement.

3.2.4 Les fumées de silice

Origine

Les fumées de silice sont des co-produits de l'industrie du silicium. Elles sont obtenues en refroidissant les gaz de réaction qui se produisent dans les fours à arc lors de la fabrication du silicium ou de ses alliages. Elles se présentent sous forme de poudres constituées de microsphères de silice amorphe ayant un diamètre moyen de 0,1 micron [48].

Les alliages de silicium et de ferrosilicium sont fabriqués à partir d'un mélange de quartz (SiO_2), de houille (ou coke de pétrole) et de copeaux de bois. Pour la fabrication du ferrosilicium, des tournures d'acier sont ajoutées au mélange. La réduction du quartz s'effectue dans un four à arc électrique, dont la puissance peut monter jusqu'à environ 30 MW. Le métal en fusion est ensuite affiné par injection d'air et d'oxygène pour oxyder l'aluminium et le calcium. Les réactions intermédiaires conduisant à la réduction du silicium produisent aussi une très fine poussière de silice amorphe qui est entraînée par les gaz chauds émis par le four ; ces gaz sont filtrés pour recueillir la poussière de silice amorphe. Pour une tonne de silicium fabriquée, 350 kg de fumées de silice sont produits.

Utilisation dans les bétons

La fumée de silice est utilisée comme addition pour béton suivant la norme NF EN 13263-1. Son usage est possible en tant que constituant des ciments suivant les normes NF EN 197-1 et NF EN 197-5 mais elle n'est pas utilisée à cet effet à l'heure actuelle en France.

L'action des fumées de silice sur les bétons porte essentiellement sur la diminution de la porosité et sur la fixation de la chaux grâce à son caractère pouzzolanique.

Le dosage de la fumée de silice est généralement de l'ordre de 8 à 10 % du poids de ciment (soit environ 30 à 40 kg par m^3 de béton). Son usage est souvent dédié aux bétons à très hautes ou ultra hautes performances.

La fumée de silice se présente généralement sous forme de poudre mais elle est aussi disponible sous forme de slurry, suspension aqueuse contenant environ 50 % en masse de fumée de silice.

Empreinte carbone

L'empreinte carbone des fumées de silice est évaluée à 354 kg eq CO_2 /tonne [11] [43]. Des discussions seraient en cours et pourraient conduire à une valeur significativement plus faible.

Statut réglementaire

La fumée de silice est considérée comme un coproduit de l'industrie du silicium.

Disponibilité

En France, le silicium est produit par la société FerroPEM, filiale du groupe FerroGlobe. La distribution des fumées de silice est assurée par la société Condensil. Il existe en France six sites de production, localisés dans le Sud-Est. La pérennité de l'un d'eux est incertaine.

La production annuelle de fumée de silice est estimée à 50 000 tonnes. La société norvégienne Elkem importe également de la fumée de silice en France. La fumée de silice est utilisée dans la composition des bétons mais également dans celle du fibro-ciment et du plâtre.

Perspectives

Le maintien d'une production de l'ordre de 50 000 tonnes par an peut être assuré pour les prochaines années. Le marché du silicium étant très fluctuant, il est difficile d'évaluer la disponibilité à plus long terme. Le silicium est un matériau stratégique et sa production est un marché d'avenir au niveau mondial. La situation au niveau de la France pourrait toutefois être plus incertaine.

3.2.5 Les schistes calcinés

Origine

Le schiste calciné, et en particulier le schiste bitumineux calciné, peut être utilisé dans la composition du ciment. Il est produit dans un four à une température de 800 °C environ. Les schistes bitumineux sont des roches sédimentaires contenant des substances organiques appelées kérogènes qui peuvent être exploitées pour produire du pétrole et du gaz combustible.

Le schiste calciné contient des phases similaires à celles du clinker (silicate bicalcique, aluminat monocalcique, chaux libre, sulfate de calcium) ainsi que du dioxyde de silice qui lui confère des propriétés pouzzolaniques.

Utilisation dans les bétons

Les schistes calcinés peuvent être utilisés comme constituants des ciments suivant la norme NF EN 197-1 ou la norme NF EN 197-5. Ils ne disposent pas d'une norme spécifique d'addition pour béton.

Les ciments qui contiennent du schiste calciné moulu sont caractérisés par un développement modéré de chaleur d'hydratation, une excellente capacité de rétention d'eau et de stabilité avant la prise ainsi que par une durabilité élevée.

En France, la société Holcim produit deux ciments à base de schiste calciné à l'usine d'Altkirch (68) : un CEM II/B-M 52,5 N et CEM II/B-M 42,5, contenant respectivement 17 % et 18 % de schiste calciné [36].

3.3 Conclusion

La figure 28 présente la disponibilité potentielle estimée dans le monde de différents matériaux pouvant être utilisés comme constituants des liants cimentaires en comparaison avec la quantité de ciment produite. L'utilisation réellement possible de ces matériaux dépendrait notamment de la logistique, des compositions minéralogiques exactes ou encore

de la disponibilité locale. Ce graphique met en évidence une forte disparité entre les matériaux. On observe notamment que les quantités de calcaire et d'argiles sont particulièrement importantes.

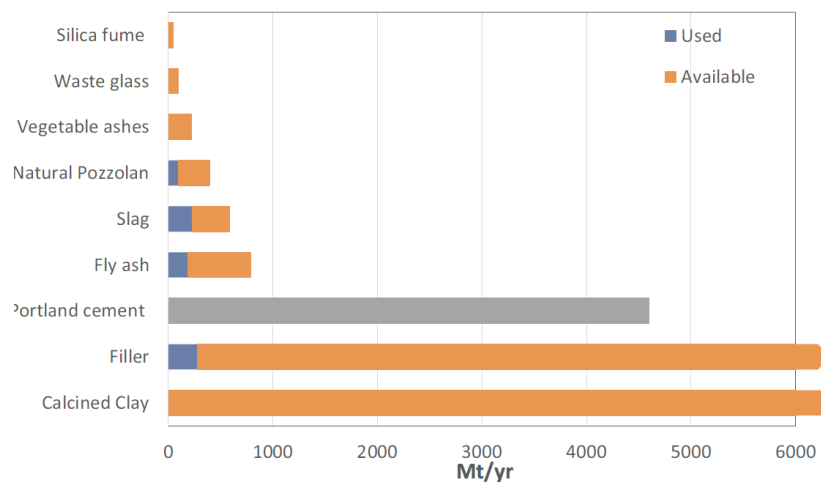


Figure 28 – Utilisation et disponibilité estimée dans le monde des potentiels constituants des liants cimentaires [1]

Les réserves en matériaux issus de carrières sont très élevées. Néanmoins, une partie importante de ces ressources ne peut être exploitée pour diverses raisons (accessibilité, zones urbaines, sites classés ou protégés...). Leur extraction est soumise à des autorisations préfectorales souvent longues à obtenir (10 ans) et valables pour une durée maximale de 30 ans à renouveler.

4 INTÉRÊT DES CONSTITUANTS NON TRADITIONNELS POUR LES LIANTS CIMENTAIRES

4.1 Les matériaux issus directement de carrières

4.1.1 La diatomite

La diatomite est une roche sédimentaire siliceuse biogénique légère et poreuse constituée entièrement ou essentiellement de squelettes de diatomées fossilisées [49].

Deux gisements sont actuellement exploités en France :

- > gisement de la Montagne d'Andance en Ardèche qui approvisionne une usine de la société Chemviron, et dont le volume total est estimé 10 millions de m³, pour une production annuelle en 2013-2014 de 50 000 tonnes par an ;
- > gisement de Virargues/Foufouilloux dans le Cantal, qui alimente une usine Chemviron et une usine Imerys à Murat, et dont le volume est estimé à 4,4 millions de m³, pour une production annuelle en 2013-2014 de 40 à 45 000 tonnes par an (soit 130 à 140 000 tonnes de matériaux extraits) pour les deux usines confondues.

La France est le deuxième producteur mondial de diatomite avec 100 000 tonnes par an de produit fini en 2013-2014 (soit 200 à 250 kt de matériaux extraits) [33].

La diatomite est principalement utilisée comme matériau de filtration, charges minérales et absorbants. Elle est calcinée entre 700 et 1 000 °C pour obtenir les produits commercialisés. Il s'agit d'un produit à haute valeur ajoutée.

Les travaux menés sur l'utilisation de la diatomite en substitution du clinker jusqu'à 15 % ont mis en évidence ses propriétés pouzzolaniques. Elle aurait un effet bénéfique sur la durabilité en raison de la diminution de l'absorption d'eau du béton mais pourrait réduire la résistance au gel [50] [51]. Néanmoins certains travaux recommandent de ne pas dépasser 5 % de substitution du ciment [52].

Les perspectives d'utilisation de la diatomite dans les bétons sont incertaines car les gisements actuels arrivent en fin d'exploitation et il semble difficile d'envisager l'ouverture de nouvelles carrières.

4.1.2 La phonolite

La phonolite est une roche magmatique effusive, grise à verdâtre. Elle est principalement composée de feldspath alcalin et de feldspathoïdes. Sous forme de dalles, elle est employée comme lauzes. Une carrière de lauzes phonolitiques est exploitée par la société La Lauzière du Pertuis, au Pertuis (43). Il s'agit du seul site français de production de ce type de matériau, qui voit ses utilisations se développer. La seule exploitation en Auvergne et en France de phonolite, autre que pour la production de pierres ornementales et de construction, est celle de Roche-en-Régnier (43), gérée par la société SAMIN, filiale à 100 % du groupe Saint-Gobain. La phonolite extraite est concassée et broyée. Elle est destinée à la fabrication de verre creux [33].

La phonolite présente des propriétés pouzzolaniques. La société allemande Hans G. Hauri commercialise de la phonolite, sous l'appellation Hydrolith®, produite à partir de ressources

extraites dans la région du Kaiserstuhl, à quelques kilomètres de Fribourg en Allemagne. Cette ultrafine a été utilisée pour des essais expérimentaux qui ont montré son intérêt pour la fabrication de béton à très hautes performances. En particulier, l'utilisation de la phonolite a un impact positif sur le plan rhéologique ce qui permet de diminuer la quantité de superplastifiant comparativement au dosage utilisé pour les bétons avec fumées de silice [53].

4.2 Les co-produits industriels

4.2.1 Les laitiers d'aciérie de conversion

Les laitiers d'aciérie de conversion, ou laitiers de convertisseurs sont obtenus lors de l'affinage de la fonte sidérurgique dans les convertisseurs. La fonte, en sortie du haut-fourneau, est riche en carbone et trop fragile. Afin de réduire le taux de carbone et produire de l'acier, la fonte en fusion est placée dans un convertisseur dans lequel le carbone se combine à l'oxygène. Le laitier d'aciérie de conversion est constitué des minéraux qui étaient présents dans la fonte et de la fraction minérale qui a été ajoutée pour obtenir la nuance d'acier élaborée. Une fois l'acier écoulé en partie basse du convertisseur, le laitier d'aciérie de conversion liquide surnage. Après un refroidissement lent et progressif à l'air puis à l'eau, on obtient une roche artificielle qui peut être concassée et criblée pour produire des granulats ou broyée pour la production d'un liant. Chaque tonne d'acier génère environ 100 kg de laitier de conversion [54].

Le laitier d'aciérie de conversion est utilisé principalement sous forme de matériaux granulaires pour les travaux de terrassement. Il est également utilisé depuis de nombreuses années dans le domaine agricole comme amendement minéral basique. Il a également démontré des propriétés intéressantes dans la fabrication de liants hydrauliques routiers comme constituant principal (SIDMIX®). Des travaux sont en cours pour évaluer la possibilité de son utilisation de manière plus importante dans la fabrication de liants hydrauliques.

En 2019, la production de laitier de convertisseur en France était de 1,15 millions de tonnes. Il existe des stocks historiques importants de ces matériaux dans le sud et l'est de la France, mais qui ne peuvent être exploités que sous certaines conditions [55].

4.2.2 Les laitiers de cubilot

Le cubilot est un four vertical de fusion de métaux, généralement des ferrailles. Dans ce four, le métal à fondre est en contact direct avec le combustible (le coke). Ce contact à haute température entraîne une carburation importante (à des niveaux de 2 à 3 % de carbone) et l'on réserve pour cela le cubilot à la production de fonte. Comme il s'agit d'une deuxième fusion, la fonte produite est moins pure que de la fonte de première fusion. Ce processus de fabrication génère également des co-produits tels que du laitier de cubilot ou des fumées chargées en poussières. En raison de sa densité inférieure, le laitier flotte sur le métal fondu, permettant son évacuation avant le prélèvement de la fonte. Après trempe, le laitier se vitrifie. Avant de pouvoir l'utiliser, une étape de broyage est toutefois nécessaire (à l'origine, le laitier est sous forme de blocs). Une fois broyés en particules fines ($< 63 \mu\text{m}$), les laitiers de cubilot semblent posséder des propriétés proches de celles obtenues avec du laitier de haut-fourneau. L'étape de broyage reste à ce jour le frein principal (frein économique) [56] [57].

En 2011, la production de laitier de cubilot en France était estimée à 56 500 tonnes provenant de 26 fonderies. La répartition des sites de production est présentée sur la figure suivante.

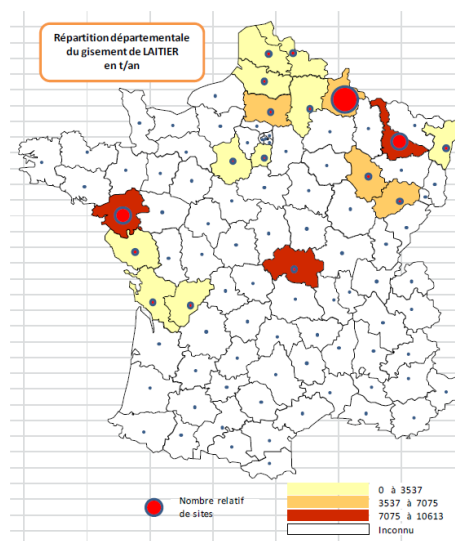


Figure 29 – Répartition du gisement de laitier de cubilot [56]

4.2.3 Autres typologies de laitier

D'autres typologies de laitiers existent aujourd'hui sur le territoire français et pourraient être des sources potentielles exploitables pour la fabrication de liants hydrauliques à faible émission carbone :

- > laitiers d'aciérie de four électrique ;
- > laitiers d'aciérie de métallurgie secondaire (ou laitiers de poche).

Cependant, la faisabilité de l'utilisation de ces ressources reste encore à valider à l'échelle industrielle.

Compte tenu des évolutions attendues à l'échéance de 2030 et de la disparition progressive et partielle des laitiers de haut-fourneau, la production de nouvelles typologies de laitiers pourrait voir le jour, sans doute en quantités moindres, mais avec des caractéristiques qui pourraient en faire des candidats potentiels intéressants pour la formulation des bétons.

4.2.4 Les fines de fonderie

La fonderie est un procédé de réalisation de pièces de fonte obtenues en coulant un métal fondu dans une empreinte. La fonte peut provenir d'un haut-fourneau ou d'un cubilot. La poussière est générée à toutes les étapes du procédé (fabrication du moule en sable, coulée et parachèvement) et possède une composition variable d'une étape à l'autre. Les systèmes d'aspiration permettent d'aspirer la grande majorité des fines générées, réduisant ainsi les rejets diffus. Ces dernières sont ensuite filtrées à l'aide de dépoussiéreurs à manches dans la majorité des cas.

Les fonderies sont présentes sur tout le territoire français. En 2011, 129 sites de fonderie ont été recensés produisant un volume annuel de fines de sable estimé à 120 500 tonnes. Leur répartition géographique est présentée sur la carte suivante [56].

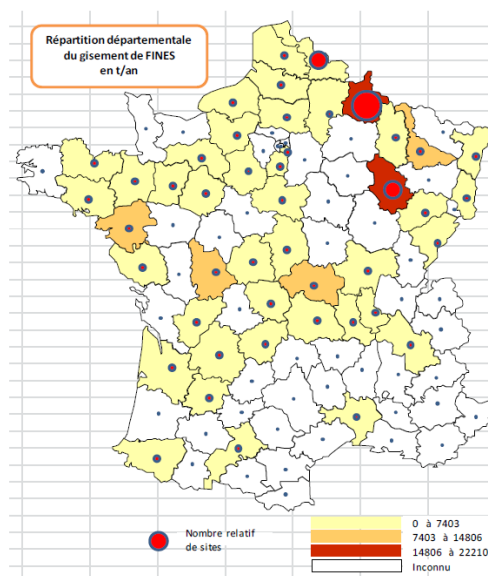


Figure 30 – Répartition du gisement de fines de sables [56]

Une étude réalisée en 2016 au Cerib en collaboration avec le CTIF (Centre Technique des Industries de la Fonte) dans le cadre du projet « Valorisation Croisée » a montré qu’en fonction de leur provenance, les fines de fonderie ont des propriétés très diverses et leur utilisation potentielle dans le béton peut s’avérer très différente [56]. Ces matériaux ne semblent pas présenter de réactivité dans le béton et peuvent parfois retarder son durcissement. La présence de bentonite dans certaines fines de sablerie de sable à vert semble diminuer la fluidité du béton frais et entraîner une baisse de l’indice d’activité. Les fines de sablerie de sable à prise chimique contiennent des composés organiques (provenant du liant) qui ne semblent pas nuire aux performances du béton pour des taux d’incorporation inférieurs à 10 %. Les fines de dessablage peuvent être utilisées en substitution de granulats de coupure granulométrique similaire. La couleur noire de ces co-produits peut également être un paramètre intéressant pour une utilisation dans les bétons en tant que pigments [56].

4.2.5 Les cendres de boues de papeterie

On désigne par « boues de papeterie » les suspensions plus ou moins concentrées issues des traitements des effluents liquides des différentes étapes de la fabrication du papier. La composition des boues dépend essentiellement des opérations de traitement des effluents liquides.

La transformation des boues de papeterie en pouzzolanes utilisables en cimenterie consiste en la production, entre autres, de métakaolins par un traitement thermique approprié. Ce traitement thermique doit être soigneusement contrôlé de façon à obtenir la destruction totale de la matière organique contenue dans les boues et à minimiser la décarbonatation de la calcite.

Certains travaux ont montré que la calcination de boues de papeterie entre 650 et 700 °C permettait d’obtenir un matériau pouzzolanique de performances assez proches de celles du métakaolin et pouvant être utilisé à des taux de substitution du ciment jusqu’à 25 % [58].

En France, deux papeteries incorporent dans leurs chaudières des boues de papeteries. Ces boues sont issues du nettoyage du papier recyclé utilisé pour la fabrication de nouveau papier. Une fois calcinés dans les chaudières, elles produisent des cendres réactives.

Des essais sur des mortiers et des bétons contenant ce type de cendres en substitution partielle de ciment font ressortir la réactivité de ces dernières. Néanmoins, en raison de leur teneur en chaux vive, elles peuvent être à l'origine de variations dimensionnelles importantes. Les cendres ont été utilisées pour la fabrication de pavés les incorporant à hauteur de 15 % en substitution massive du ciment et sur des formulations de béton à démoulage différé jusqu'à 25 % et 50 % au maximum pour des bétons de résistance mécanique inférieure à respectivement 50 MPa et 30 MPa [56]. Des essais à plus long terme sont néanmoins nécessaires afin d'évaluer l'influence de leur présence vis-à-vis de la durabilité et des performances techniques du béton les incorporant [56] [59].

4.2.6 Les cendres de chaudières biomasse

La biomasse est une ressource renouvelable qui permet la production de chaleur par les chaufferies biomasse, voire la production d'électricité en cas de cogénération. Les ressources utilisées sont des plaquettes forestières, des broyats de palettes non traitées, des sous-produits issus de la transformation du bois ou encore des déchets (bois fin de vie et bois déchet). La production thermique annuelle à partir de biomasse est supérieure à 6 TWh par an. Cette production est vouée à augmenter [60] en raison du développement de l'utilisation des ressources renouvelables défini dans Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte et grâce au soutien alloué par le Fonds Chaleur géré par l'Ademe.

Les chaudières biomasse produisent environ 250 kt de cendres chaque année. Aujourd'hui ces cendres sont principalement enfouies ou utilisées en épandage agricole ou forestier. La composition chimique des cendres de biomasse est variable suivant les combustibles utilisés, les traitements, le type de chaudière utilisée ou encore la provenance des cendres (volantes ou sous-foyer) [61].

Différents projets ont porté sur l'incorporation des cendres de biomasse dans les bétons. Ils ont mis en évidence que les matériaux étudiés n'ont pas de réactivité dans le béton. Il est possible de les utiliser en tant que filler [62] [56].

La société Surschiste a développé un mélange de cendres volantes et de cendres de biomasse conforme à la norme NF EN 450-1 et dont le nom commercial est la Silicoline C.

4.2.7 Le verre broyé

En France, 3 millions de tonnes de verre sont consommées chaque année dont environ 76 % étaient recyclés en 2016 [63].

Des travaux de recherche sur des bétons incorporant jusqu'à 30 % de poudre de verre en substitution du ciment ont montré que celle-ci possède des propriétés pouzzolaniques qui entraînent une amélioration des performances mécaniques et de la durabilité du béton. Elle est également favorable à l'ouvrabilité du béton frais [64] [65].

4.3 Contexte normatif

Du point de vue normatif, deux types d'application peuvent être distingués : les ouvrages structurels en béton et les réalisations non structurelles. Chaque application dispose d'un corpus normatif propre. Pour les bétons destinés aux structures, et à l'exception des blocs de maçonnerie, on utilise pour ce qui concerne le matériau la norme NF EN 206/CN. Pour les blocs de maçonnerie et les applications non structurelles, il existe dans le cas des produits préfabriqués des normes spécifiques autoportantes qui comprennent l'ensemble des spécifications nécessaires basées essentiellement sur la performance des produits, ce qui laisse davantage de possibilités sur la formulation des bétons.

Concernant les bétons destinés aux ouvrages structurels, le groupe d'experts « Solutions Bétons Bas Carbone », rattaché à la commission de normalisation AFNOR/P18B (NF EN 206/CN) et mentionné au § 2.3.1, travaille actuellement à la rédaction d'un fascicule de documentation dont l'objectif est de constituer une base commune pour valider l'aptitude à l'emploi de constituants non normalisés dans les bétons. Cela pourrait permettre par exemple de valoriser les matériaux non traditionnels cités dans ce paragraphe comme additions dans un béton. De telles démarches existent déjà à l'étranger. C'est le cas en Amérique du Nord avec le guide ASTM C1709-11 « Standard Guide for Evaluation of Alternative Supplementary Cementitious Materials (ASCM) for use in Concrete ». Son approche précise de façon pragmatique les 5 étapes à réaliser pour évaluer des matériaux cimentaires alternatifs en vue d'une utilisation dans les bétons : une caractérisation du matériau, la détermination de la finesse optimale, la détermination des critères similaires aux cendres volantes ou au laitier de haut-fourneau ou aux fumées de silice, des essais de performance sur béton et la réalisation de démonstrateurs pour étudier la durabilité à long terme.

5 TECHNOLOGIES ALTERNATIVES

5.1 Ciments sursulfatés

Le ciment sursulfaté bénéficie aujourd'hui d'une norme européenne (NF EN 15743). Son utilisation n'est pas récente puisqu'il a été normalisé en France dès 1958. À l'origine, ses applications étaient principalement destinées aux fondations et aux structures massives.

Il s'agit d'un liant hydraulique principalement constitué de laitier granulé de haut-fourneau et de sulfate de calcium (tableau 3). Dans le ciment sursulfaté, à la différence des ciments courants selon l'EN 197-1, le laitier granulé broyé de haut-fourneau est principalement activé par le sulfate de calcium. D'autres constituants peuvent être ajoutés pour accélérer l'activation du laitier et son hydratation à court terme.

Tableau 3 - Composition du ciment sursulfaté selon la norme NF EN 15743

Type	Notation		Composition (pourcentage en masse) ^{a)}			
			Constituants principaux		Autres constituants	
			Laitier granulé de haut fourneau	Sulfate de calcium	Clinker Portland	Constituants secondaires
			S	Cs	K	A
SSC	Ciment sursulfaté	SSC	≥ 75	5 ≤ Cs ≤ 20	0 < K ≤ 5	0 ≤ A ≤ 5
<i>a) Les valeurs du tableau se réfèrent à la somme des constituants principaux et autres constituants.</i>						

Le ciment sursulfaté bénéficie aujourd'hui de la norme française et européenne NF EN 15743 « Ciment sursulfaté - Composition, spécifications et critères de conformité ». En France, son aptitude à l'emploi est établie dans la norme NF EN 206/CN sous réserve de certaines précautions décrites dans l'Annexe A de la NF EN 15743 (mélange avec d'autres liants, utilisation d'additions, effets des conditions météorologiques, du décoffrage et de la cure, traitement thermique).

Le principal produit d'hydratation est le C-S-H. C'est lui qui est principalement responsable du développement de la résistance à long terme. L'autre produit d'hydratation est l'ettringite qui contribue, pour sa part à la résistance au jeune âge. L'ettringite est entièrement formée, en une période de 0 à 7 jours, qui correspond au temps de réaction de l'ensemble du sulfate de calcium présent dans ce ciment. L'ettringite, stabilisée, ne s'associe à aucun phénomène d'expansion. La consommation totale de la portlandite au cours de l'hydratation rend le ciment sursulfaté particulièrement résistant aux agents agressifs.

En lien avec sa faible teneur en clinker, le ciment sursulfaté permet une réduction d'environ 90 % des émissions de CO₂ comparativement à un ciment CEM I, en retenant un scénario sans affectation de la production de la fonte sur le laitier.

Le ciment sursulfaté est connu pour ses bonnes propriétés de durabilité (en particulier vis-à-vis des sulfates, des acides, des chlorures, de la réaction alcali-granulats), sa faible chaleur d'hydratation et sa cinétique de montée en résistance assez lente. Il présenterait également une moindre propension aux efflorescences.

Ainsi, le ciment sursulfaté trouve des applications pour les ouvrages de génie civil et de bâtiment tels que les stations d'épuration, les ouvrages de grande masse et fondations, bâtiments agricoles ou bâtiments de bureaux

La disponibilité des ciments sursulfatés (classe de résistance 32,5) en France est la suivante :

- > Un ciment marqué NF par Lafarge (usine de La Malle) ;
- > H-IONA de Hoffman Green Cement Technologies disponible essentiellement en sacs via la distribution ;
- > Un ciment qui va être lancé sous peu par ECOCEM France (mi 2022).

5.2 Ciments sulfoalumineux

Les ciments sulfoalumineux ont été développés en Chine dans les années 1970. Leur principal produit d'hydratation est l'ettringite. Il existe plusieurs types de ciments sulfoalumineux qui diffèrent suivant leur composition [8].

En France, le type de ciment commercialisé est le ciment sulfoalumineux belitique. Il est obtenu par calcination à 1 250-1 350 °C dans des fours rotatifs d'un mélange de bauxite, de calcaire et de sulfate de calcium. Le clinker obtenu est ensuite co-broyé avec du gypse ou de l'anhydrite.

Le sulfate de calcium utilisé pour la fabrication du ciment sulfoalumineux peut être d'origine naturelle (carrières à ciel ouvert ou exploitation minière) ou synthétique (coproduit d'autres industries comme les engrais phosphatés).

Le ciment sulfoalumineux a une empreinte carbone plus faible que celle du ciment Portland pour plusieurs raisons :

- > la température de calcination est plus faible de 100 à 200 °C ;
- > la quantité de calcaire dans le cru est plus faible ce qui entraîne une réduction des émissions de CO₂ liées à la décarbonatation du calcaire ;
- > l'énergie nécessaire au broyage est plus faible.

Les bétons à base de ciment sulfoalumineux sont caractérisés par un durcissement rapide et une résistance au jeune âge très élevée. Ils présentent une bonne résistance mécanique à long terme, une faible perméabilité, une bonne durabilité en environnement agressif, en milieu marin ou en milieu sulfaté notamment. Toutefois, leur hydratation s'accompagne d'un fort dégagement de chaleur susceptible d'engendrer une fissuration des structures massives si aucune mesure préventive n'est prise [66]. Par ailleurs, la résistance à la corrosion des aciers par carbonatation est encore peu documentée.

La majeure partie du ciment sulfoalumineux est produite en Chine où plus d'un million de tonnes de ce ciment sont consommées par an. En Europe, des gammes de ciment sulfoalumineux belitiques ont été développées ou sont en cours de développement :

- > Ternacem de Heidelberg en Allemagne : en cours de développement ;
- > Alipre d'Italcementi en Italie : déjà commercialisé ;
- > Alpenat de Vicat en France : déjà commercialisé.

En France, le cimentier Vicat produit l'Alpenat R², ciment sulfoalumineux bélite (clinker sulfoalumineux et 18 % de gypse) et l'Alpenat CK, clinker sulfoalumineux broyé. Le ciment Alpenat R² bénéficie d'une évaluation technique européenne ETA-16/0850 qui destine son emploi aux bétons de structure [8].

ECO-binder est un projet de recherche sur 4 ans, co-financé par la Commission européenne via le programme Horizon 2020 et regroupant 13 partenaires industriels dont deux français (Lafarge et Vicat). Il vise à développer des systèmes constructifs isolants utilisant les ciments sulfoalumineux. Des éléments préfabriqués démonstrateurs sont installés dans différentes conditions climatiques (Espagne, Royaume-Uni, Roumanie) et serviront à valider les performances [67]. Ces recherches ont vocation à augmenter le niveau de connaissance sur ce type de ciment ce qui devrait permettre d'accélérer leur normalisation.

5.3 Liants obtenus par activation alcaline

Ces liants sont obtenus par la réaction d'un matériau à base d'aluminosilicate dans des conditions alcalines. Ils peuvent être produits à partir de constituants et d'activateurs divers, impliquant des propriétés variables [68].

On distingue deux grandes familles de liants obtenus par activation alcaline :

- > les géopolymères, généralement produits par l'activation alcaline de cendres volantes ou de métakaolins ;
- > l'activation alcaline du laitier de haut-fourneau.

5.3.1 Les géopolymères

Le terme « géopolymère » a été donné par Joseph Davidovits qui fut l'un des premiers à travailler sur ce matériau dans les années 1970. Depuis une vingtaine d'années, de nombreux travaux scientifiques ont vu le jour pour mieux comprendre et caractériser les géopolymères. L'ouvrage « Geopolymers – Structure, processing, properties and industrial applications » présente un état de l'art sur les géopolymères [8].

Les géopolymères sont généralement obtenus par l'activation de cendres volantes ou de métakaolins par la soude ou le silicate de sodium.

La soude, appelée également hydroxyde de sodium, est un solide ionique de formule chimique NaOH. Elle se présente généralement sous forme de pastilles, de paillettes ou de billes blanches, corrosives et hygroscopiques. Elle est très soluble dans l'eau. Il s'agit d'un produit chimique extrêmement courant. Son utilisation implique de fortes contraintes industrielles en termes de sécurité et de protection de l'environnement.

Le silicate de sodium (« waterglass » en anglais) est le nom générique pour une série de composés de formule $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$. Le procédé d'obtention du silicate de sodium est tel que son impact environnemental est à prendre en considération (indicateur de changement climatique supérieur à celui du ciment Portland). Par ailleurs, sa disponibilité en France est relativement faible.

Les propriétés des géopolymères sont fonction de nombreux paramètres tels que la nature des matières premières et des activateurs, la concentration en activateur, le ratio eau/liant ou encore l'historique de température.

Les résistances en compression d'un béton de géopolymère correctement formulé peuvent être équivalentes voire supérieures à celles d'un béton à base de ciment Portland. Les géopolymères semblent être très sensibles à la température de cure. Par ailleurs, les géopolymères montrent des propriétés de retrait significativement plus élevées que le ciment Portland.

Outre leur faible empreinte carbone, il semble que le principal intérêt des géopolymères réside dans leur excellente performance de durabilité vis-à-vis des attaques acides et de leur bon comportement à haute température (jusqu'à 600 °C environ). La question de leur résistance à la carbonatation et leur résistance au gel reste à approfondir [68].

5.3.2 L'activation alcaline du laitier de haut-fourneau

L'activation alcaline du laitier est basée sur les mêmes principes que les géopolymères. La première utilisation d'alcalins dans les matériaux cimentaires date des années 1930, quand Kuhl entreprit des recherches sur la prise de mélanges de laitier moulu et de potasse. Chassevent mesura la réactivité des laitiers en utilisant de la potasse ou de la soude en 1937. Purdon fit la première étude expérimentale significative en 1940 sur des ciments sans clinker constitués de laitier et de soude [8].

Depuis leur découverte, les liants alcali-activés et les bétons associés ont été produits commercialement et utilisés dans une grande variété de projets de construction dans l'ex-Union Soviétique, la Chine et quelques autres pays. Plus de 60 spécifications et normes en lien avec les liants alcali-activés et les bétons associés ont été développés dans l'ex-Union Soviétique. Ces textes couvrent les matières premières, les liants, les bétons, les structures et leur mise en œuvre. L'ouvrage « Alkali-Activated Cements and Concrete » présente un très large état de l'art de l'activation alcaline des laitiers.

Le laitier est un liant à hydraulicité latente, il a besoin d'un activateur chimique pour s'hydrater. Il existe différents types d'activations chimiques telles que l'activation calcique, l'activation alcaline, l'activation sulfatique et l'activation par le ciment Portland.

Pour ce qui est de l'activation alcaline, l'activateur alcalin le plus étudié est le silicate de sodium (en mélange avec la soude). Cet activateur alcalin est très performant techniquement mais il est peu disponible en France et présente certains inconvénients qui rendent son utilisation industrielle difficile notamment vis-à-vis de la dangerosité de la soude.

Comme pour les géopolymères, les propriétés des laitiers activés sont fonction de nombreux paramètres tels que la nature du laitier et des activateurs, la concentration en activateur, le ratio eau/liant, l'historique de température...

Il est généralement admis que le laitier activé par le silicate de sodium peut permettre d'obtenir d'excellentes performances mécaniques voire de dépasser la résistance obtenue avec un ciment Portland.

Des travaux du Cerib [69] ont mené à l'étude de l'activation par le carbonate de sodium. Ces travaux ont conduit à la mise au point d'une famille de liants Lowcarbotys protégés par les brevets FR 3 026 739 A1 et EP 3 006 416 B1.

Le carbonate de sodium est très courant et économique et ne présente pas la même dangerosité que la soude ou le silicate de sodium. L'activation alcaline du laitier par le carbonate de sodium couplée à une activation thermique a permis d'atteindre et parfois même de dépasser l'objectif d'obtenir des résistances à court terme équivalentes à celles obtenues sur des mortiers à base de ciment Portland de type CEM I 52,5. Cependant, les performances mécaniques à plus longs termes plafonnent à un niveau inférieur à celui du ciment Portland. Enfin, une évaluation environnementale et économique de certaines solutions développées a été réalisée de manière comparative. Les solutions proposées conduisent à une empreinte environnementale significativement plus faible que la référence à base de ciment Portland. L'évaluation économique montre également que les compositions étudiées n'induisent pas de surcoût. Les solutions développées sont en plusieurs points plus avantageuses que la référence à base de ciment Portland de type CEM I 52,5.

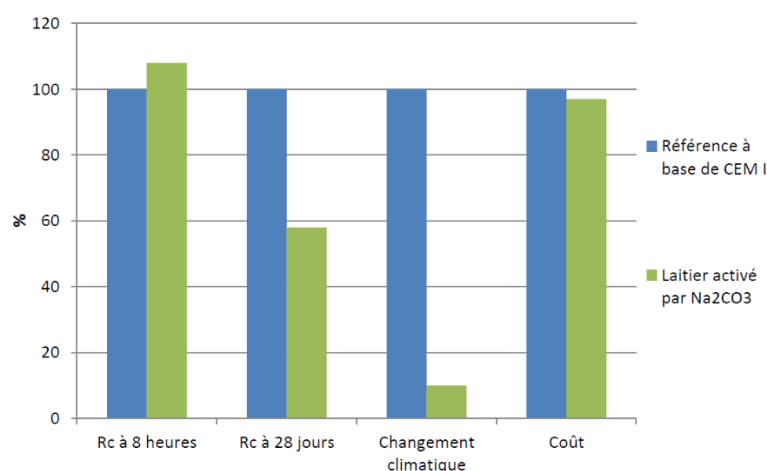


Figure 31 – Évaluation technico-économique de l'activation du laitier par le carbonate de sodium comparativement à une référence de mortier à base de ciment CEM I [69]

Ecocem a lancé en 2021 un liant alcali-activé au carbonate de sodium en coopération avec Vinci Construction. Ce liant est couvert par une Evaluation Technique Européenne obtenue par Ecocem en octobre 2021 et Vinci le met en œuvre depuis sur plusieurs chantiers dans une offre de béton bas carbone.

5.3.3 Les liants Hoffmann Green Cement Technologies

Le procédé d'Hoffmann Green Cement Technologies repose notamment sur le brevet « Composition for metakaolin construction material, related method for manufacturing said composition, and use for producing construction elements » (WO 2016/156722 A1, US 2018/0111878 A1). Il est basé sur la récupération et la valorisation de co-produits issus de l'industrie et de la construction qui sont mélangés, sans apport de chaleur externe, à des activateurs formulés par Hoffmann Green Cement Technologies. La première usine Hoffmann Green Cement Technologies a été inaugurée le 22 novembre 2018. La seconde usine est en cours de construction et sera mise en service début 2023. Une troisième usine est prévue au nord de l'Île de France. Ainsi, progressivement, les capacités de production passeront de 50 000 T à 300 000 T en 2023, puis 550 000 T d'ici 2026.

Hoffmann Green Cement Technologies a développé quatre ciments sans clinker : H-UKR, H-EVA, H-P2A et H-IONA [70].

- > Le ciment H-UKR est une solution basée sur l'activation de laitier de haut-fourneau. Le béton à base de ciment H-UKR fait l'objet d'une ETPM visant sa durabilité et d'ATEX de type A délivrés par le CSTB validant l'utilisation du béton pour des applications de structure et son dimensionnement selon les Eurocodes 2 et 8.
- > Le ciment H-EVA est une technologie ettringitique par voie alcaline. À l'argile flashée, mélangée avec du phosphogypse/désulfogypse, sont ajoutés des activateurs et suractivateurs formulés par Hoffmann Green. Les essais visant à présenter l'ETPM et les premiers ATEX sont en cours.
- > Le ciment H-P2A (Haute Performance Activation Alcaline) est une alternative au ciment Portland pour une utilisation en mortier colle. Des activateurs et suractivateurs formulés par Hoffmann Green sont ajoutés à l'argile flashée mélangée avec du silicate pour obtenir du ciment H-P2A.

La quatrième technologie d'Hoffmann Green Cement Technologies est un ciment sursulfaté fabriqué principalement à partir de laitier de haut-fourneau et de sulfate de calcium, voir paragraphe 5.1 [71].



Figure 32 : Site de production d'Hoffman Green Cement Technologies

5.4 Ciment et technologie Solidia

Le ciment Solidia, développé par la start-up américaine Solidia et produit par Lafarge, est un liant non hydraulique, fabriqué dans un four de cimenterie traditionnel, à partir des mêmes matières premières utilisées pour fabriquer du ciment Portland. Les principales différences sont, d'une part, que le liant Solidia est produit en utilisant moins de calcaire, compensé par une source de silice, et d'autre part, qu'il est calciné à des températures de four inférieures [8].

Le processus de durcissement est basé sur l'absorption du dioxyde de carbone (CO_2) par le ciment (carbonatation), injecté dans des chambres de cure spéciales. Le ciment (silicate de calcium) réagit avec le CO_2 dissout dans l'eau pour former du carbonate de calcium (CaCO_3) et un « gel » de silice (SiO_2), qui durcissent ensemble et forment une matrice durable.

Le procédé de fabrication du ciment permet de réduire ses émissions de CO_2 de 30 % par rapport à un ciment Portland. Selon les données du fabricant, les quantités de CO_2 émises lors de la fabrication du ciment Solidia sont de l'ordre de 570 kg de CO_2 /tonne. Le processus de durcissement capture ensuite jusqu'à 300 kg de CO_2 par tonne de ciment utilisé.

À ce jour, il faut noter que le CO₂ utilisé pour la cure n'est pas un CO₂ atmosphérique mais un CO₂ produit industriellement (par Air liquide). Des travaux de recherches sont en cours pour développer des techniques permettant de capturer le CO₂ émis lors de la fabrication du ciment et le recycler. La technologie de cure au CO₂ de Solidia réduit la consommation d'eau dans la production, à travers le recyclage de 60 à 80 % d'eau utilisée.

Le ciment Solidia se caractérise par un durcissement très rapide. En effet, il atteint sa résistance au bout de 24 heures au lieu de 28 jours pour le ciment Portland ordinaire. Les éléments préfabriqués produits présenteraient une meilleure esthétique que ceux produits à base de ciment Portland (pas d'efflorescence et une meilleure pigmentation). Des tests sur les bétons Solidia sont en cours aux États-Unis et en Europe pour valider leur durabilité.

La société américaine Solidia Technologies® a pu collecter environ 80 millions de dollars des investisseurs tels que : Lafarge, BASF, Total, Air liquide, etc., à travers des accords de partenariat qui visent à industrialiser cette nouvelle génération de liant.

Dans le cadre d'un projet collaboratif entre Solidia Technologies®, Lafarge et le Cerib, une étude a été réalisée en 2019 sur des pavés et des blocs de béton en utilisant une presse industrielle et le procédé Solidia. Les éléments suivants ont été constatés :

- > la méthode de production des produits en béton Solidia est similaire à celle couramment utilisée pour la production avec un ciment traditionnel en ce qui concerne les étapes de malaxage et de vibro-compactage ;
- > lors de ces essais et pour certaines formules, il s'est avéré nécessaire d'augmenter légèrement le dosage en ciment Solidia par rapport à un ciment CEM I pour obtenir les performances mécaniques attendues ;
- > les performances autres que mécaniques sont similaires à celles des produits témoins. On observe notamment des variations dimensionnelles faibles dans le cas des blocs de béton Solidia ;
- > les bétons Solidia sont peu sensibles à la formation d'efflorescences ou autres remontées susceptibles de modifier l'aspect du béton.

5.5 Liants à base d'oxyde de magnésium

Les liants à base d'oxyde de magnésium (MgO) sont généralement produits en calcinant de la roche magnésienne naturelle (MgCO₃). L'oxyde de magnésium s'hydrate dans l'eau pour produire de l'hydroxyde de magnésium (Mg(OH)₂). Mélangé avec des sels de magnésium, l'oxyde de magnésium peut permettre la production de ciments présentant de bonnes résistances mécaniques [72].

5.5.1 Sorel

Le ciment Sorel a été mis au point en 1855 par le français Stanislas Sorel. Il s'agit d'un ciment d'oxychlorure ou d'oxysulfate de magnésium produit en mélangeant l'oxyde de magnésium avec du chlorure de magnésium ou du sulfate de magnésium. Il est utilisé depuis longtemps pour la production pour des applications spécifiques telles que les panneaux légers pour le bâtiment qui présentent de meilleures performances que les plaques de plâtre. Ce matériau présente une tenue à l'eau limitée [72].

5.5.2 Novacem

Le liant Novacem a été développé par l'Imperial College of London. La technologie a été vendue à la société australienne Calix en 2012. Il utilise des silicates et des carbonates de magnésium.

Le processus de production de Novacem utilise la carbonatation accélérée des silicates de magnésium sous des niveaux élevés de température et de pression (180 °C et 150 bars). Les carbonates produits sont chauffés à des températures relativement basses (700 °C) pour produire de l'oxyde de magnésium (MgO) et le CO₂ produit est recyclé dans le procédé. L'utilisation de silicates de magnésium élimine les émissions de CO₂ provenant de la transformation des matières premières. En outre, les basses températures requises permettent l'utilisation de combustibles à faible teneur en énergie (par exemple la biomasse), ce qui réduit encore les émissions de CO₂.

5.5.3 TecEco

TecEco est une société australienne qui a développé plusieurs nouveaux liants hydrauliques qui comprennent de l'oxyde de magnésium réactif préparé par calcination à basse température. Ils sont fabriqués en mettant de la magnésite au four à 600 - 750 °C. On obtient de l'oxyde de magnésium réactif qui se présente sous forme de poudre et qui est mélangé au clinker et aux autres composés du mélange final dans les proportions voulues. Les liants de TecEco sont composés d'oxyde de magnésium (au moins 5 % en poids), de liant hydraulique (de préférence du clinker de ciment Portland) et si possible d'au moins 10 % de pouzzolanes.

5.5.4 Calix

Les liants proposés par Calix sont fabriqués à partir d'un four à calcination rapide qui convertit la calcite (CaCO₃), la dolomite (CaMg(CO₃)₂) ou la magnésite (MgCO₃) en leurs oxydes respectifs. Les minéraux sont chauffés en présence de vapeur d'eau, qui agit comme un catalyseur, ce qui permet de séparer les processus de calcination et de combustion. Les émissions de CO₂ peuvent être capturées à l'aide d'un système de lavage.

5.6 Liant d'hydrosilicate de calcium

À ce jour, il existe un liant à base d'hydrosilicate de calcium : Celitement. Ce liant a été développé par le groupe allemand SCHWENK. Il est fabriqué à partir des mêmes constituants qu'un ciment Portland, mais avec différentes proportions de matières premières : moins de calcaire qu'un ciment Portland traditionnel. Il contient également de l'oxyde de calcium et des silicates dans un rapport ¼ [8].

Le processus de production du Celitement peut être divisé en trois étapes principales : la préparation des matières premières, le procédé hydrothermique en autoclave et le broyage d'activation. Dans le processus de fabrication de ce ciment, l'autoclave remplace le four rotatif. Les oxydes de calcium et les silicates sont chauffés en autoclave à une température comprise entre 150 et 300 °C sous une pression d'environ 12 bars, ce processus conduit à un silicate de calcium hydraté non réactif. Pour l'activer, ce dernier sera ensuite co-broyé avec un matériau riche en silicates, tel que du sable.

Pendant l'hydratation, Celitement se transforme en gel de silicate de calcium hydraté C-S-H qui est le principal produit d'hydratation du ciment portland traditionnel. Un mortier normalisé réalisé avec ce ciment peut atteindre une résistance à la compression de plus de 80 MPa après 28 jours. Grâce à ses hydrates et sa faible porosité, ce ciment présenterait une bonne durabilité. Néanmoins, l'inconvénient de Celitement est un dosage conséquent en superplastifiant pour obtenir de telles performances.

La production du ciment Celitement nécessite une faible demande en énergie et un faible besoin en carbonate de calcium et son bilan carbone est meilleur que celui du ciment Portland, avec 50 % d'émissions de CO₂ en moins.

La disponibilité des matières premières nécessaires à la fabrication du ciment Celitement est la même que celles du ciment Portland, étant donné que les mêmes ressources sont employées.

Depuis 2011, il est fabriqué dans une installation pilote située en Allemagne (5 tonnes par semaine) [73].

6. CONCLUSION - PERSPECTIVES

Les enjeux environnementaux et l'évolution de la réglementation (RE 2020 notamment) entraînent pour la filière béton la nécessité de faire évoluer ses pratiques afin de réduire son impact carbone. Les modes de production de clinker évoluent pour diminuer les quantités de CO₂ émises : utilisation dès à présent de combustibles alternatifs et optimisation des process, à plus long terme, nouveaux clinkers et captage de CO₂. Parallèlement, l'utilisation de plus grandes quantités d'additions minérales dans les liants ou dans des ciments à plus faible teneur en clinker apparaît comme une voie essentielle et prometteuse pour réduire l'impact CO₂ des solutions constructives en béton.

L'intérêt technique d'utiliser des additions minérales dans les bétons, directement dans les ciments composés ou en substitution partielle aux ciments au moment du malaxage, est connu depuis longtemps. Ces matériaux peuvent améliorer notamment la compacité des bétons, leurs propriétés rhéologiques à l'état frais ainsi que leurs propriétés mécaniques et leur durabilité.

Les matériaux pouvant remplacer en partie le clinker peuvent être des co-produits industriels ou bien des matériaux issus de carrières. La disponibilité de certains co-produits industriels dont l'usage est répandu aujourd'hui dans les bétons pourrait diminuer à moyen terme du fait des évolutions stratégiques en cours au sein des industries dont ils dépendent. Il s'agit en particulier des laitiers de hauts-fourneaux, co-produits de l'industrie sidérurgique et des cendres volantes, co-produits des centrales à charbon.

La France dispose de ressources importantes de calcaire, d'argile, de pouzzolanes naturelles et de roches siliceuses. Ces ressources sont très prometteuses pour le développement de solutions bas carbone robustes et durables dans le temps compte tenu des ressources importantes. Les calcaires et les roches siliceuses sont utilisés sous forme finement broyée. Ils ne présentent pas ou peu de réactivité chimique dans les bétons mais ont un effet bénéfique sur la compacité et l'ouvrabilité des bétons. Certaines argiles, après calcination, possèdent des propriétés pouzzolaniques qui induisent une amélioration des performances mécaniques et de la durabilité du béton. Les pouzzolanes naturelles ont un réel intérêt (additions naturellement pouzzolaniques et émissions de CO₂ faibles) et mériteraient d'être davantage prises en considération d'un point de vue normatif et réglementaire (accès aux gisements). Il est essentiel de poursuivre les travaux de recherche sur le développement de l'incorporation de ces matériaux dans les bétons et de faire évoluer les pratiques.

Il existe par ailleurs un certain nombre de matériaux dont l'usage n'est pas normalisé actuellement mais qui peuvent présenter un réel intérêt dans les bétons. Une évolution du contexte normatif permettrait une plus large utilisation de ces matériaux dans le béton. Même s'ils ne sont pas toujours disponibles en quantités très importantes, ils représentent un intérêt pour une utilisation au niveau local dans les régions où ils sont disponibles.

Enfin, des ciments alternatifs dont l'utilisation est encore relativement récente ou en cours de développement constituent également des solutions pertinentes à étudier.

Afin de favoriser l'utilisation de solutions décarbonées pour les bétons, des travaux sont en cours au niveau des commissions de normalisation. Il s'agit notamment de reconsidérer les pratiques actuelles concernant l'utilisation des liants et les règles de formulation des bétons.

Ce rapport met en avant la diversité des solutions potentielles permettant de diminuer les quantités de clinker et réduire ainsi l'impact environnemental des systèmes constructifs en béton. Ces solutions doivent être sélectionnées au cas par cas en fonction des exigences requises pour les applications visées, des systèmes constructifs, des process et de la disponibilité locale des matériaux.

Le tableau 4 ci-après présente un récapitulatif des données exposées dans le rapport. Une appréciation, basée sur les données disponibles lors de la rédaction du présent rapport, est donnée sur leur intérêt vis-à-vis des différents paramètres considérés.

Tableau 4 –Récapitulatif des ressources minérales utilisées dans les bétons décarbonés

Production							Contexte normatif	
		Nature des gisements	Actuelle	Future à horizon 2030	Empreinte carbone	Constituant des ciments	Addition	
LEGENDE	*		≤ 200 kt/an	Risque de diminution	> 300 kg eq. CO ₂	Pas de norme		
	**		200 kt à 2 Mt/an	Maintien	150-300 kg eq. CO ₂	Normalisation en cours		
	***		> 2 Mt/an	Augmentation	≤ 150 kg eq. CO ₂	Une norme existe		
	-		Données non disponibles					
		Constituants dont l'usage est normalisé						
Calcaires		Naturels	***	***	***	***	***	
Additions siliceuses			*	**	***	*	***	
Pouzzolanes naturelles			*	**	***	***	*	
Argiles calcinées			*	***	*** (four flash) **(four rotatif)	***	*** (métakaolin)	
Laitiers de haut-fourneau		Liés à une industrie	***	*	***	***	***	
Cendres volantes siliceuses			* (stocks disponibles)	**	***	***	***	
Cendres volantes calciques			*	-	-	***	*	
Fumées de silice			*	**	* (juillet 2022)	***	***	
Schistes calcinés			*	-	-	***	*	
		Constituants non traditionnels						
Diatomite		Naturels	*	*	-	*	*	
Phonolite			*	**	-	*	*	
Laitiers d'aciérie de conversion		Liés à une industrie	**	*	-	*	*	
Laitiers de cubilot			*	*	-	*	*	
Fines de fonderie			*	**	-	*	*	
Boues de papeterie			-	-	-	*	*	
Cendres de biomasse			**	***	-	*	*	
Verre broyé			**	**	-	*	*	

7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Karen L. Scrivener, Vanderley M. John, Ellis M. Gartner**
Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry
Cement and Concrete Research 114 (2018) 2–26
- [2] **Cyr M., Lawrence P., Ringot E.**
Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength
Cement and concrete Research Vol 36, 2006
- [3] **Neville, A.M.**
Properties of Concrete
2011
- [4] **H.F.W. Taylor**
Cement chemistry
2nd edition, 1997
- [5] <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>
- [6] L’empreinte carbone des Français reste stable, Commissariat Général au Développement Durable
Janvier 2020
- [7] **Aïtcin P.C.**
Cements of yesterday and today: concrete of tomorrow
Cement and Concrete Research Vol 30, Issue 9, 20002
- [8] **François Jacquemot, Patrick Rougeau**
Bétons bas carbone : Focus sur les nouveaux liants
Rapport 428.E, mars 2020
- [9] Béton bas carbone, Définition, SNBPE
Avril 2021
- [10] Béton bas carbone, Perspectives et recommandations
Agence Qualité Construction, septembre 2021
- [11] Éléments de connaissance et de compréhension pour maîtriser l’empreinte carbone des bâtiments et des ouvrages de génie civil en béton
Mines & Carrières n° 295, octobre 2021
- [12] <https://www.infociments.fr/ciments/ciments-declaration-environnementale-inventaire-analyse-du-cycle-de-vie>

- [13] **François Jacquemot**
Ciments
Fiche Mémento Cerib 083, 2015
- [14] <https://www.unicem.fr/wp-content/uploads/2021/12/snbpe-chiffres-2019-web.pdf>
- [15] <https://www.fib.org/industrie-du-beton-chiffres-cles/>
- [16] <https://www.unicem.fr/wp-content/uploads/2021/12/snbpe-chiffres-2019-web.pdf>
- [17] L'essentiel 2021
Infociments janvier 2022
- [18] La production de ciments en France : une industrie très concentrée
Insee Focus n° 121, juillet 2018
- [19] Marché actuel et offre de la filière minérale de construction et évaluation à échéance 2030
PIPAME, 2016
- [20] Décarbonation de l'industrie
Feuille de route de la filière ciment, mai 2020
- [21] Investissements et innovations : Lafarge accélère sa transformation bas carbone
Communiqué de presse, Lafarge, 10 mars 2022
- [22] **Yosra Briki, Maciej Zajac, Mohsen Ben Haha, Karen Scrivener**
Impact of limestone fineness on cement hydration at early age
Cement and Concrete Research 147 (2021) 106515
- [23] **Vanderley M. Johna, Bruno L. Daminelia, Marco Quattrone, Rafael G. Pileggi**
Fillers in cementitious materials — Experience, recent advances and future potential
Cement and Concrete Research 114 (2018) 65–78
- [24] **Yuvaraj Dhandapani, Manu Santhanam, Gopakumar Kaladharan, Sivakumar Ramanathan**
Towards ternary binders involving limestone additions — A review
Cement and Concrete Research 143 (2021) 106396
- [25] Dry ground calcium carbonate (GCC-Dry) Coarse - Sector EPD
Calcium Carbonate Association – Europe, 1^{er} décembre 2021
- [26] Dry ground calcium carbonate (GCC-Dry) Fine - Sector EPD
Calcium Carbonate Association – Europe, 1^{er} décembre 2021
- [27] Dry ground calcium carbonate (GCC-Dry) Ultrafine - Sector EPD
Calcium Carbonate Association – Europe, 1^{er} décembre 2021

- [28] Carbonates calciques et magnésiens
Mémento, BRGM/RP-67125-FR, octobre 2017
- [29] **Mounira Chadli**
Étude des performances des bétons de poudres réactives fibrés
Thèse de doctorat soutenue le 18 avril 2019
- [30] Mémento Silice industrielle
Rapport final, BRGM/RP-66167, mars 2016
- [31] Mémento roches et minéraux industriels, Ponces et pouzzolanes
BRGM, décembre 1992
- [32] <https://whc.unesco.org/fr/decisions/7123/>
- [33] Projet PROMINAUV : Panorama des ROches et Minéraux INdustriels en région Auvergne
Rapport final, BRGM/RP-65229-FR, octobre 2015
- [34] **Eric Garcia-Diaz**
Réactivité pouzzolanique des métakaolinite : Corrélations avec les caractéristiques minéralo-gitologiques des kaolinites
Thèse de doctorat, 1995
- [35] **Philippe Hauza**
Le métakaolin flash atout des bétons décarbonés performants et durables
Mines & Carrières n° 278, mars 2020
- [36] Marque NF-Liants hydrauliques
AFNOR Certification, 24 septembre 2021
- [37] Argilor : des nouveaux ciments bas carbone
DECA, Vicat, Communiqué de presse, juin 2021
- [38] Cem'In'Eu : Deux nouveaux ciments pour 2022
Béton[s] le Magazine n° 98, janvier 2022
- [39] **Karen Scrivener, Fernando Martirena, Shashank Bishnoi, Soumen Maity**
Calcined clay limestone cements (LC3)
Cement and Concrete Research 114 (2018) 49–56
- [40] Base de données DIOGEN, <http://www.diogen.fr/>
- [41] Kaolin et argiles kaoliniques,
Mémento, Rapport final, BRGM/RP-67334-FR, février 2018
- [42] **Aurélié Favier, Catherine De Wolf, Karen Scrivener, Guillaume Habert, ETH Zürich**
A sustainable future for the European cement and concrete industry, Technology assessment for full de carbonisation of the industry by 2050
École Polytechnique Fédérale de Lausanne

- [43] **Jacques Bresson**
Laitiers
Fiche Mémento Cerib 121, , 2015
- [44] Flux de laitiers de haut-fourneau (France)
Enquête nationale CTPL, 2016 à 2021
- [45] **Jérémie Domas**
Des chiffres et des lettres (de noblesse) pour les laitiers...
Laitiers sidérurgiques n° 100, octobre 2012
- [46] **Philippe Francisco**
Additions – Les cendres volantes
Fiches Mémento Cerib 258, 2015
- [47] Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière – Les cendres de centrale thermique au charbon pulvérisé
Cerema, 2019
- [48] **Philippe Francisco**
Additions – Les fumées de silice
Fiche Mémento Cerib 261, 2015
- [49] **Ph. Roger**
Mémento roches et minéraux industriels – Diatomite
BRGM, décembre 1995
- [50] **Arezki Tagnit-Hamou, Nikola Petrov, Karen Luke**
Properties of concrete containing diatomaceous earth
Aci Materials Journal, janvier 2003
- [51] **Carlos Rodriguez, Isabel Miñano, Carlos Parra, Pedro Pujante, Francisco Benito**
Properties of Precast Concrete Using Food Industry-Filtered Recycled Diatoms
Sustainability 2021
- [52] **Arin Yilmaz, Nurhayat Degirmenci**
Use of diatomite as partial replacement for Portland cement in cement mortars,
Construction and Building Materials 23 (2009) 284–288
- [53] **Patrick Rougeau, Béatrice Borys**
Réaliser des produits en béton à très hautes performances ou fibrés à ultra hautes performances avec des ultrafines autres que les fumées de silice
Rapport DDP 114, mai 2004 (attention, dans un rapport « E » nous ne pouvons pas noter une référence en « P »)
- [54] Laitier d'aciérie de conversion
CTPL, avril 2004
- [55] Flux de laitiers d'aciérie (France)
Enquête nationale CTPL, 2019-2020

- [56] **Marjorie Petitpain**
Économie circulaire – Projet de valorisation croisée de co-produits industriels
Rapport 364.E, , décembre 2016

- [57] **Marjorie Petitpain, Sylvain Dehaudt, Patrick Rougeau**
Économie Circulaire – Réutilisation de matières premières secondaires dans les bétons
Rapport 383.E_V2, , juin 2016

- [58] **A. Bouamrane, D. Chahidi ELOuazzani, L. Tiruta Barna, K. Mansouri**
Valorisation des boues de papeterie comme matières premières secondaires dans les mortiers de ciment Portland : incidence des conditions d’incinération sur la résistance mécanique des mortiers
Journal of Material and Environmental Science 5 (2) (2014) 605-614

- [59] **Marjorie Petitpain, François Jacquemot, Martine Bortolotti, Yannick Louazel, Arnaud Aubigny**
Valocendres
Rapport final, janvier 2018

- [60] <https://www.ademe.fr/expertises/energies-renouvelables-enr-production-reseaux-stockage/passer-a-l'action/produire-chaleur/dossier/bois-biomasse/chaufferies-biomasse-entreprises-lindustrie>

- [61] **D. Boulday, F. Marcovecchio**
Valorisation des cendres issues de la combustion de biomasse, Revue des gisements et des procédés associés
Étude Record n° 14-0913/1A, rapport final, février 2016

- [62] Valorisation des cendres de biomasse dans l’élaboration de matériaux composites pour le génie civil
Rapport final, 2021

- [63] Déchets chiffre clés
Édition 2020, Adème

- [64] **Omran, A., Soliman, N., Zidol, A., Tagnit-Hamou** \$Performance of Ground-Glass Pozzolan as a Cementitious Material—A Review
Advances in Civil Engineering Materials, Vol. 7, No. 1, 2018, pp. 237–270

- [65] **Fabien Frohard**
Durabilité des éco-bétons : Impact des additions cimentaires alternatives sur la corrosion des armatures dans les bétons armés
2014

- [66] **Stéphane Berger**
Étude des potentialités des ciments sulfo-alumineux bélitiques pour le conditionnement du zinc De l’hydratation à la durabilité
2009

- [67] <http://www.buildup.eu/en/explore/links/eco-binder-project-innovative-prefabricated-concrete-systems>
- [68] **John L. Provis**
Alkali-activated materials
Cement and Concrete Research 114 (2018) 40–48
- [69] **François Jacquemot**
Accélération du durcissement des liants à base de laitier de haut-fourneau pour les produits préfabriqués en béton
2014
- [70] <https://www.ciments-hoffmann.fr/technologies/solutions/>
- [71] <https://www.ciments-hoffmann.fr/actualites/lancement-commercial-hiona-ciment-decarbone-europe/>
- [72] **Ellis Gartner, Tongbo Sui**
Alternative cement clinkers
Cement and Concrete Research 114 (2018) 27–39
- [73] <https://celitement.de/en/about-us/>

RESSOURCES MINÉRALES POUR LES LIANTS DES BÉTONS DÉCARBONÉS : DISPONIBILITÉ, PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION ET D'INNOVATION



/ Cerib - CS 10010
28233 Épernon cedex

/ 02 37 18 48 00
cerib@cerib.com

RESSOURCES MINÉRALES POUR LES LIANTS DES BÉTONS DÉCARBONÉS : DISPONIBILITÉ, PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION ET INNOVATIONS

Les enjeux environnementaux et l'évolution de la réglementation (RE 2020 notamment) impliquent de décarboner fortement les systèmes constructifs. Concernant les bétons et les produits en béton, l'utilisation de plus grandes quantités d'additions minérales dans les liants ou dans les ciments à plus faible teneur en clinker apparaît comme une voie essentielle et prometteuse pour réduire l'impact CO₂ des solutions constructives en béton.

Ce rapport présente un bilan de la disponibilité à court terme des additions minérales et des constituants des ciments autres que le clinker ainsi que les perspectives d'évolution à moyen terme de ces matériaux. Il met en avant la diversité des solutions potentielles permettant de réduire l'impact environnemental du béton. Ces solutions doivent être sélectionnées au cas par cas en fonction des exigences requises pour les applications visées, des systèmes constructifs, des process et de la disponibilité locale des matériaux.

Ce rapport réunit des données sur les principales additions minérales utilisées aujourd'hui. Il s'agit tout d'abord des additions calcaires et siliceuses, des pouzzolanes naturelles et des argiles calcinées. Ces constituants correspondent à des ressources naturelles en quantités importantes en France et sont issus de process de fabrication qui leur sont dédiés. D'autres, comme les cendres volantes, les fumées de silice et les laitiers de haut-fourneau, sont des co-produits industriels. Pour ces derniers, les quantités disponibles sur le marché sont dépendantes des fluctuations éventuelles et des évolutions des industries auxquelles elles sont liées. Il est donc essentiel pour l'intérêt général et la satisfaction des enjeux environnementaux, d'anticiper de telles évolutions et de mener les actions qui permettront d'accroître la résilience des filières béton et construction.

Il existe par ailleurs un certain nombre de matériaux dont l'usage n'est pas normalisé actuellement mais qui peuvent présenter un réel intérêt dans les bétons ainsi que des ciments alternatifs dont l'utilisation est encore relativement récente ou en cours de développement.

MINERAL RESOURCES FOR THE BINDERS OF LOW-CARBON CONCRETES: AVAILABILITY, PROSPECTS FOR THE FUTURE AND INNOVATIONS

Environmental issues and evolutions of the regulations (including the French environmental regulation RE2020) imply to strongly decarbonate building systems. Regarding concretes and precast products, using more mineral additions in concrete binders or low clinker cements appears to be a necessary and promising way to reduce the carbon footprint of concrete systems.

The report presents short-term availability of supplementary cementitious materials other than clinker and medium-term evolution prospects for these materials. It highlights the diversity of possible solutions for the reduction of the environmental impact of concrete. These solutions must be selected on a case-by-case basis depending on the requirements for the expected applications, the building systems, the manufacturing processes and the local availability of materials.

This document provides information on supplementary cementitious materials that are mainly used today. First of all, limestone and silicious additions, natural pozzolans and calcined clays are natural resources largely available in France and produced by processes dedicated to them. Other materials, such as fly ashes, silica fumes and blast-furnace slag are industrial by-products. Their market availability depends on the fluctuations and evolutions of the industry they are related to. For the general interest and environmental concerns, it is essential to anticipate such evolutions and to act in order to increase resilience of concrete and construction sectors.

Finally there are materials that are not included in current standards but may be of real interest in concrete. Some alternative cement without Portland clinker have been also recently developed or are in development.