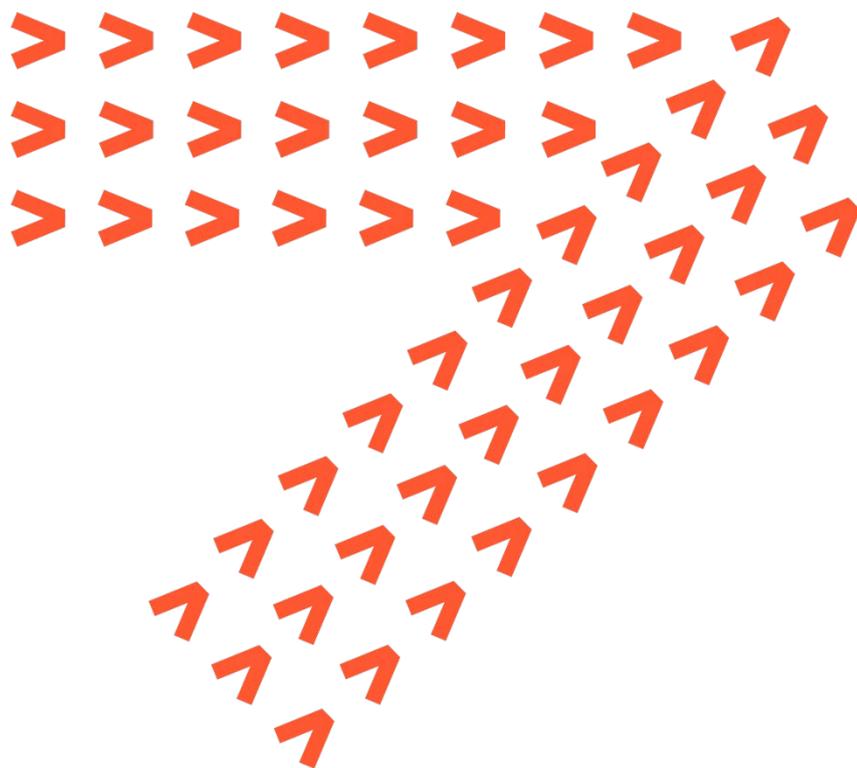


ETUDE ACV SUR LE BETON DIT BAS CARBONE

Septembre 2020



Le sens de la performance énergétique



ENVIROBATBDM

AGENCE MEDITERRANEE
1342 Avenue de Toulouse
34070 MONTPELLIER

SIÈGE
20 rue d'Athènes
75 009 PARIS

AUTRES AGENCES
LYON
RENNES

H3C
ENERGIES

Table des matières

1.	Qu'est-ce que le béton ?	3
2.	Quelles sont les caractéristiques du béton ?.....	4
2.1.	Classe de résistance.....	4
2.2.	Classe d'exposition	4
2.3.	Choix du ciment dans la composition du béton	5
2.4.	Rôle des aciers et de l'enrobage dans le béton armé.....	6
3.	L'impact environnemental du béton.....	7
3.1.	L'impact carbone du béton.....	7
3.2.	FDES et configurateur permettant de caractériser l'impact environnemental	7
3.2.1.	Les FDES	7
3.2.2.	Le configurateur BETie.....	8
3.3.	Analyse d'une FDES	8
3.4.	Répartition des impacts environnementaux dans le béton armé	10
3.4.1.	Impact des aciers de ferrailage	10
3.4.2.	Impact du ciment	10
3.4.3.	Impact des granulats.....	12
3.4.4.	Influence des distances de transport.....	13
3.5.	Enseignements sur le choix du matériau de structure	16
4.	Les caractéristiques des bétons dits bas carbone	17
4.1.	Les ciments	17
4.2.	Les granulats recyclés	18
4.2.1.	Définition	18
4.2.2.	Propriétés des GBR et conséquences sur la formulation des bétons	18
4.2.3.	Contexte normatif.....	19
5.	Cas concret d'un groupe scolaire	21
5.1.	Impact du type de ciment.....	21
5.2.	Poids de l'impact des aciers dans le béton armé.....	24
	Bibliographie	25
	ANNEXE 1 : Classement des granulats en fonction de leurs dimensions – d/D	26
	ANNEXE 2 : Les différentes natures de ciment	26
	ANNEXE 3 : Les différents adjuvants	27
	ANNEXE 4 : Classe de résistance des bétons ordinaires (norme NF EN 206-1).....	28
	ANNEXE 5 : Classe de résistance des bétons légers	29
	ANNEXE 6 : Classe d'exposition et classe de résistance minimale.....	30
	ANNEXE 7 : Différents types de granulats recyclés.....	30
	ANNEXE 8 : Etude RECYBETON.....	31

Préambule :

La prise en compte des problématiques environnementale et de l'impact des bâtiments se traduira dans la prochaine réglementation environnementale (RE2020) par un indicateur carbone, matérialisant les émissions de gaz à effet de serre générées par la construction et l'usage d'un bâtiment tout au long de son cycle de vie.

Depuis quelques années, les fabricants de béton proposent de nouvelles formulations visant à réduire l'impact carbone de leurs produits. Cette question relativement récente n'est pas encore toujours bien maîtrisée par les professionnels.

Ce document vise ainsi à les accompagner dans la bonne compréhension de cette notion qui peut encore paraître complexe et à mieux cerner les différents aspects qui rentrent en ligne de compte, tout en ayant à l'esprit que le rôle des concepteurs est de définir des performances à atteindre (structurelle, environnementale, acoustique) et pas une formulation.

Pour clarification du rôle du maître d'œuvre et du fabricant :

La majeure partie des Bétons Prêts à l'Emploi produits sont des BPS (= Bétons à Propriétés Spécifiées). Les BPS sont des bétons pour lesquels les propriétés requises et les caractéristiques supplémentaires sont spécifiées par le prescripteur au producteur ; ce dernier est alors responsable de fournir un béton satisfaisant à ces exigences.

Le prescripteur, les maîtres d'œuvre, les BE doivent avoir une approche performancielle quant au choix du béton : résistance du béton, classe d'exposition, empreinte carbone, etc. En aucun cas, il n'est du ressort du bureau d'études de prescrire une composition de béton. Le choix de la composition du béton est du seul ressort du fabricant de béton. Ce dernier devra tout mettre en œuvre pour obtenir les performances demandées par les maîtres d'œuvre.

Remerciements :

Ce document a été réalisé par H3C énergies. Une relecture a été menée par Lafarge et CEMEX.

1. Qu'est-ce que le béton ?

Le béton est un matériau constructif composé de granulats, de ciment et d'eau. Les granulats (sables, graviers) confèrent la résistance mécanique au béton, et représentent plus des 3/4 de sa composition. Le liant qui est fait de ciment réagit avec l'eau et assure l'adhérence des granulats entre eux pour obtenir un matériau solide. Des adjuvants peuvent être introduits dans la formulation du béton pour atteindre certaines performances mécaniques et/ou pour le confort de mise en œuvre.

Les granulats peuvent être d'origine naturelle, ou issus du recyclage de bétons de démolition. L'utilisation de granulats recyclés nécessite des ajustements dans la formulation car l'absorption des granulats est plus forte, l'humidité est potentiellement plus élevée, et la résistance à la fragmentation plus faible. Le taux maximal d'utilisation de granulats recyclés est fixé dans la norme NF EN 206/CN.

On distingue différentes sortes de granulats : les fillers, les sables, les graves, les gravillons et les ballasts. On classe les différents types de granulats en fonction de leurs dimensions, exprimées par la formule d/D (Cf. Annexe 1).

Le ciment qui sert de liant peut être en partie substitué par des éléments issus d'autres filières (cendres volantes, fumées de silice, laitier moulu). L'impact environnemental élevé du ciment est dû principalement à la phase de cuisson du mélange de calcaire et d'argile nécessaire à sa fabrication. Cette phase est fortement émettrice de CO₂ du fait d'une part du procédé de cuisson, et des consommations énergétiques associées, et d'autre part de la réaction chimique nécessaire à la formation du clinker¹ (qui formera le ciment après broyage). La substitution du ciment par des déchets d'autres filières est donc intéressante pour diminuer son impact environnemental. La composition du ciment peut varier en fonction des différents types de besoins, ce qui le divise en plusieurs catégories (Cf. Annexe 2).

L'eau permet d'hydrater le ciment, ce qui libère ses capacités de liant, et rend également plus facile l'application du béton. Elle ne doit pas contenir d'impuretés et elle ne doit pas être salée.

Les adjuvants sont des produits chimiques ajoutés en faible quantité (< 5%) dans la formulation du béton. Ces produits offrent la possibilité d'améliorer certaines caractéristiques du béton telles que : le temps de prise et de durcissement, diminution de la perméabilité, plasticité, compensation de bétonnage par temps froid ou par temps chaud, fluidité. (Cf. Annexe 3).

On distingue le béton structurel qui est généralement renforcé par du ferrailage pour résister aux différentes sollicitations mécaniques (appelé également béton armé), du béton non structurel, dont le type d'armature est variable. Le volume de ferrailage dans le béton structurel représente en moyenne entre 2 et 10% de la masse de béton.



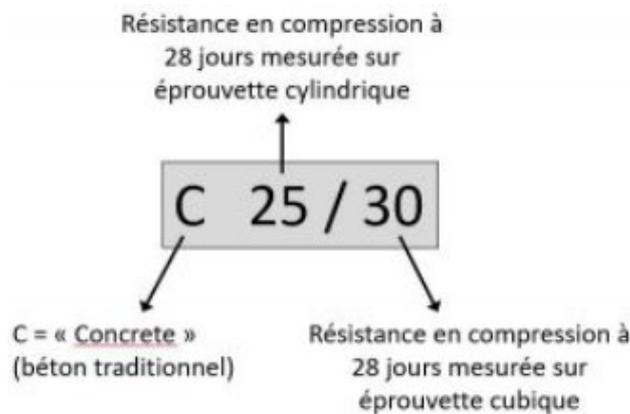
¹ Clinker : Produit de la cuisson du calcaire (80% environ) et de l'argile (aluminosilicates) dans des fours à très hautes température (1450°C). La décarbonatation (réaction chimique de fabrication : CaCO₃ -> CaO + CO₂) ainsi que la forte consommation énergétique des fours sont responsables d'émissions de CO₂ très importantes.

2. Quelles sont les caractéristiques du béton ?

2.1. Classe de résistance

Le béton doit atteindre une certaine **classe de résistance** en fonction de l'ouvrage réalisé et des charges mécaniques à supporter. La classe de résistance est définie comme suit : C X/Y (ex : C 25/30). Le X représente la valeur de la résistance en MPa à 28 jours sur une éprouvette cylindrique et le Y représente la valeur de la résistance en MPa à 28 jours sur une éprouvette cubique. Par exemple, le C 25/30 présente une résistance de 25 MPa sur une éprouvette cylindrique et 30 MPa sur une éprouvette cubique.

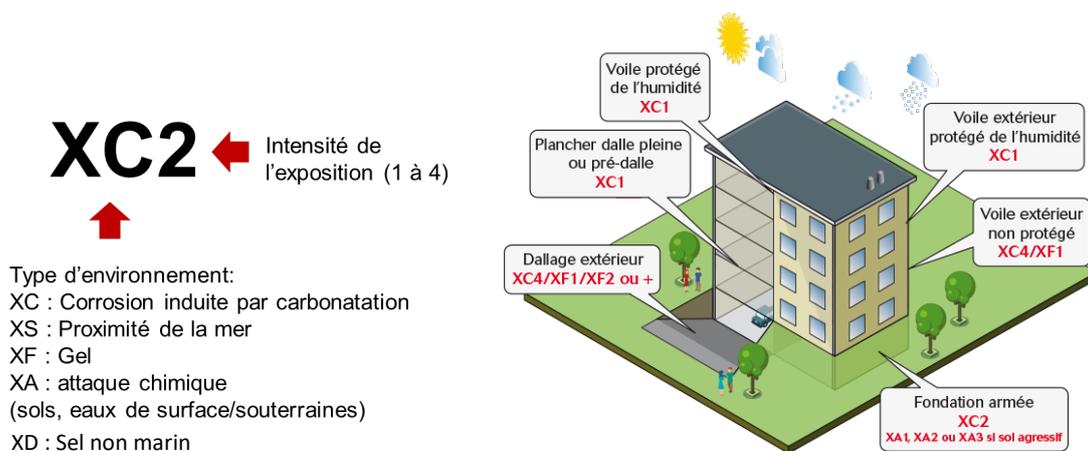
Pour les bétons ordinaires de masse volumique allant de 2000 kg/m³ à 2600 kg/m³, la norme NF EN 206-CN distingue **16 classes différentes** (Cf. Annexe 4).



2.2. Classe d'exposition

En fonction de son **exposition**, le béton est soumis à différentes agressions : le CO₂ présent dans l'atmosphère, la pluie, le gel, les sels marins, les agents chimiques. La formulation du béton doit donc permettre de le protéger de ces agressions.

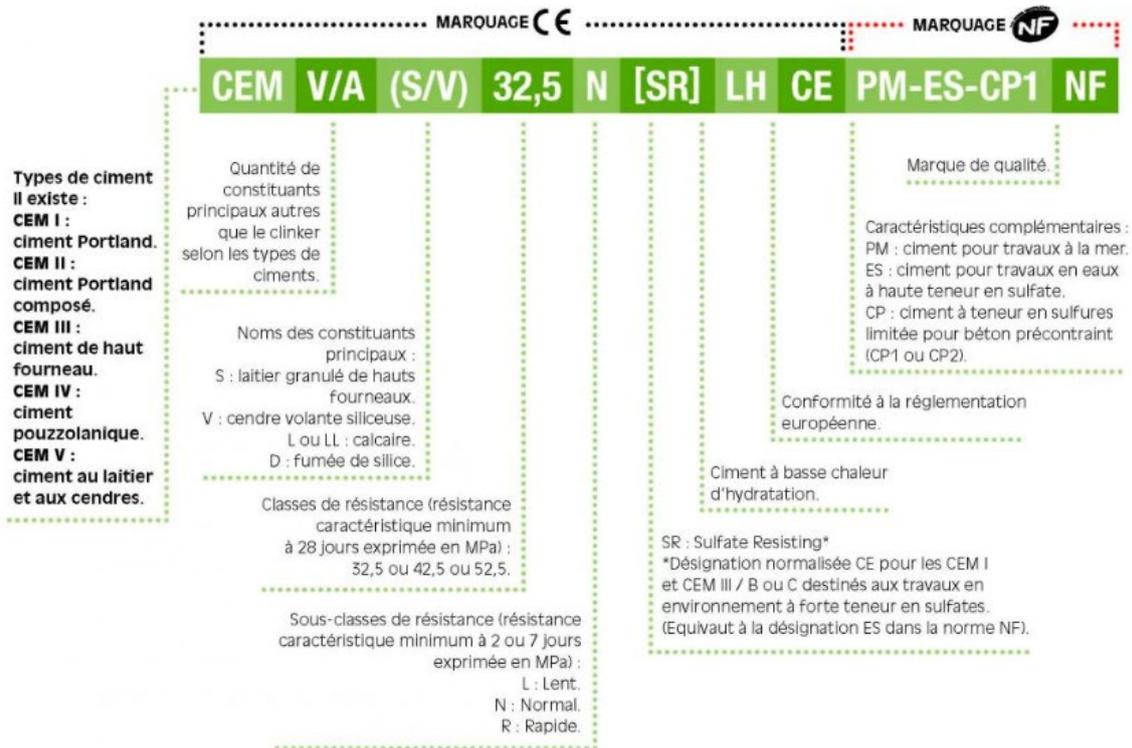
La classe d'exposition est définie selon la norme NF EN 206/CN :



Les deux classifications sont liées. La norme définit une classe de résistance minimale pour chaque classe d'exposition (Cf. Annexe 6).

2.3. Choix du ciment dans la composition du béton

Les ciments sont définis par la norme NF-EN-197-1. Comme le béton, les ciments ont une dénomination qui leur est propre :



Un ciment de nature CEM II peut avoir une classe de résistance différente et des constituants différents. En pratique, un CEM II peut convenir pour un béton C25/30 ou pour un béton C40/50, selon la classe de résistance du ciment choisie. Aussi, un CEM II en partie composé de laitiers n'aura pas les mêmes propriétés chimiques qu'un CEM II en partie composé de cendres volantes.

Un ciment de même nature peut donc avoir des propriétés mécaniques et chimiques différentes.

Aussi, le choix du ciment doit prendre en considération les paramètres suivants :

- Les contraintes d'exécution de l'ouvrage,
- L'utilisation finale du béton et le type de béton (béton armé, précontraint ou non armé),
- Les conditions de cure obligatoire,
- Les dimensions de la structure (plus un élément est massif, plus la chaleur générée par le processus d'hydratation du ciment risque d'être élevée et préjudiciable à l'ouvrage),
- La classe d'exposition,
- La réactivité potentielle des granulats aux alcalins provenant potentiellement des granulats, du ciment, de l'eau et des adjuvants.

Tous ces paramètres diffèrent d'un projet à l'autre. Ceci ne permet donc pas d'associer précisément une nature de ciment à un usage déterminé. En effet, le choix du ciment ne dépend pas de la classe mais de la résistance nécessaire. La résistance impose un rapport eau/liant et un dosage minimum en liant. Le choix du ciment est du fait du fabricant.

Cependant, on observe de manière générale des ciments plus adaptés pour certains usages (Cf. Annexe 2) : les CEM I et II sont adaptés pour les ouvrages en béton armé ou précontraints courants, les CEM III et V sont particulièrement résistants en milieux agressifs.

Des restrictions d'emploi existent : les ciments à prise rapide et particulièrement le CEM I produisent une forte chaleur d'hydratation et limitent donc leur emploi sur les ouvrages massifs ; les CEM II, III, et V intégrant en grande partie d'autres composants (laitiers, cendres volantes ...) qui limitent leur usage en béton apparent.

On remarque également que le CEM I est généralement utilisé pour des bétons bruts car il apporte une finition plus esthétique.

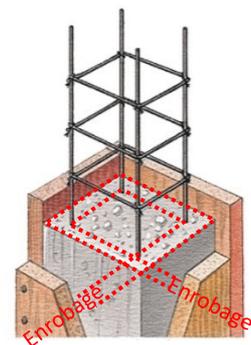
Il faut noter que le ciment n'est pas l'unique élément qui détermine la qualité apparente : le sable, les adjuvants, la fluidité, la qualité du coffrage, l'huile de décoffrage influent également sur l'apparence.

En conclusion, le choix du ciment est étudié par le bureau d'étude en fonction de performance et le fournisseur propose une formulation pour répondre aux performances visées. Certaines centrales à béton (sans certification AFNOR ISO 14001, cela concerne environ 15% des centrales) ne délivrent pas toutes les formulations notamment lorsqu'un risque existe sur la qualité du béton à la livraison ou que le process doit être revu en centrale. Il en est de même pour le coût du béton qui peut varier d'une centrale à l'autre sur une même formulation en fonction de leurs propres pratiques.

2.4. Rôle des aciers et de l'enrobage dans le béton armé

Le béton utilisé seul ne résiste qu'en compression. Il est donc associé à des aciers pour pouvoir résister aux sollicitations de flexion et de traction. Les aciers dans le béton armé, selon l'élément (poutre, voile..), représentent quasiment la moitié de l'impact environnemental total de l'élément concerné.

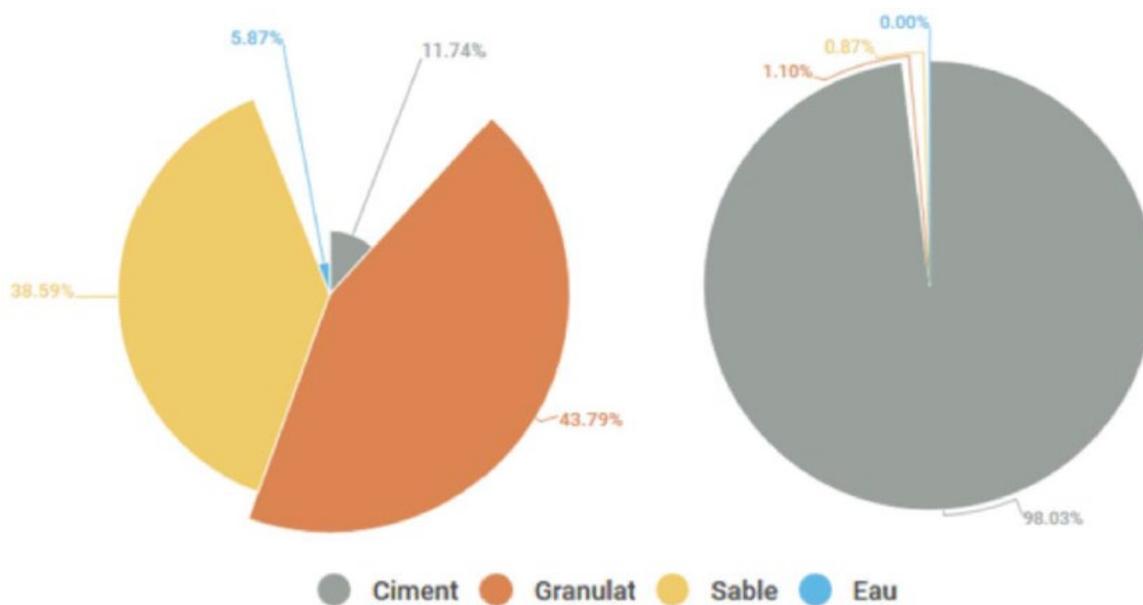
Dans le béton armé, les aciers doivent être protégés de la corrosion et de la propagation de la chaleur en cas d'incendie. C'est l'épaisseur d'enrobage (compris couramment entre 2,5 et 5 cm) qui permet la protection des aciers. L'enrobage correspond à l'épaisseur de béton entre l'armature et l'air libre comme présenté sur la figure ci-contre.



3. L'impact environnemental du béton

3.1. L'impact carbone du béton

Le ciment représente seulement 12% de la masse du béton alors que son impact environnemental carboné lui représente 98% de l'impact carboné du béton.



Répartition massique (à gauche) et carbonée (à droite) d'un béton classique constitué de ciment CEM I.
(Source : Publication Observatoire de l'Immobilier Durable)

Le ciment semble donc être le levier majeur de réduction d'émissions de GES du béton.

3.2. FDES et configurateur permettant de caractériser l'impact environnemental

3.2.1. Les FDES

Une FDES, ou fiche de déclaration environnementale et sanitaire, est un document normalisé qui présente les résultats de l'Analyse de Cycle de Vie d'un produit ainsi que des informations sanitaires dans la perspective du calcul de la performance environnementale et sanitaire du bâtiment pour son éco-conception.

L'élaboration des FDES est encadrée par la norme ISO 14-040 à 044, son complément européen NF EN 15804+A1 et son complément national NF EN 15804/CN.

Elles prennent en compte l'ensemble du cycle de vie du produit, de l'extraction des matières premières à sa fin de vie, sans oublier les transports, la mise en œuvre et l'usage même du produit en question.

Il existe plusieurs types de FDES :

- Les **FDES collectives** portant sur un produit type fabriqué par plusieurs industriels.

- Les **FDES individuelles** portant sur un produit donné, fabriqué par un unique industriel.
- Les **FDES « sur mesure »** issues de configurateurs (outils informatiques validés par la base INIES) permettant de calculer une FDES spécifique au produit mis en œuvre sur l'ouvrage évalué.

3.2.2. Le configurateur BETie

Lancé par le SNBPE (Syndicat National du Béton Prêt à l'Emploi) à l'usage des professionnels, BETie est le premier outil de calcul des impacts environnementaux du béton reconnu par la base INIES.

Ce « configurateur » permet la création de Fiches de Déclaration Environnementales et Sanitaires (FDES) sur-mesure dans le cadre d'un projet spécifique : choix du type de béton, impacts des transports amont et aval (mode et distance), dimensions de la partie d'ouvrage considérée (unité fonctionnelle) et taux de ferrailage. BETie permet ainsi de saisir les données impactant significativement le bilan environnemental du produit BPE et de fournir un certain nombre de valeurs par défaut pour faciliter son utilisation. BETie a été vérifié par un organisme de certification agréé par l'AFNOR.

Deux types d'accès existent :

- Grand public : seules certaines caractéristiques sont modifiables (transport centrale/chantier, taux de ferrailage, caractéristiques principales du béton)
- Fournisseur : la formulation précise et complète du béton peut être renseignée, la distance de transport et le mode de transport de la matière première jusqu'à la centrale)

3.3. Analyse d'une FDES

Scénarios pris en compte pour l'évaluation des impacts environnementaux et sanitaires des bétons :

Etapas de production (A1 à A3) : prise en compte de la fabrication du BPE ; de la production des matières premières : ciment, adjuvants, ajouts, granulats ; du transport des matières premières vers le lieu de production ; de la production des énergies consommées sur les sites de production.

Remarques :

Les déchets d'autres industries utilisés comme substituant au ciment sont comptabilisés dans cette étape. Or, la comptabilisation de l'impact carbone de ces déchets autrement appelés co-produits reste floue. En effet, si l'ACV d'un produit est régit par la norme NF EN 15 804, dans le cas des co-produits, il faut choisir une méthode d'allocation : massique, économique, physique, énergétique... La norme propose des recommandations, qui restent sujettes à interprétation. Il en résulte un manque de concertation, voire de consensus.

Certains sidérurgistes considèrent les laitiers de haut fourneau comme un co-produit valorisé et leur permet de justifier la soustraction de l'impact carbone du laitier à celui de l'acier (550 kgeq CO2/t). C'est une allocation économique qui est utilisée car ce co-produit a une valeur marchande très faible. Dans ce cas, le bilan environnemental qui en découle ne prend donc en compte que peu d'éléments. Ceux-ci se résument aux seules transformations apportées au laitier de hauts fourneaux après sa sortie d'usine. Leur utilisation dans les matériaux cimentaire se limite donc à un impact de 16 kgeqCO2/t.

Certains experts considèrent qu'il serait plus cohérent de prendre en compte un autre type d'allocations afin de limiter ce type d'incohérence.

Etapes de mise en œuvre (A4 à A5) : prise en compte du transport jusqu'au chantier suivant les hypothèses suivantes.

Prise en compte de la mise en œuvre en fonction du type d'élément réalisé : dalle, poutre, mur, fondation, de leur dimension et du taux de ferrailage.

Paramètre	Valeur
Type de combustible et consommation du camion malaxeur ou autre type de véhicule utilisé pour le transport	0.08 l/m3.km
Distance jusqu'au chantier	0.0 km
Capacité du camion	8 m3
Utilisation moyenne de la capacité (y compris les retours à vide)	50%
Densité moyenne du béton	2352.6 kg/m3

Exemple d'hypothèses pour l'étape A4

Etapes de vie en œuvre (B1 à B7) : prise en compte de la carbonatation du béton pendant sa durée de vie (absorption partielle de CO2 traduisant une dégradation du matériau).

Etapes de fin de vie (C1 à C4) :

- 75% des déchets sont orientés en filières de valorisation (concassage en grave pour utilisation routière)
- 25% vont en décharge
 - o 75% des produits en décharge sont carbonatés

Une moyenne de 30 km de transport jusqu'au centre de valorisation et jusqu'à la décharge est prise en compte.

Module D (bénéfices et les charges au-delà des frontières du système étudié)²: Les revalorisations des graves et des aciers sont comptabilisées dans cette étape.

Le bénéfice comptabilisé dans le module D d'un béton armé coulé en place représente 5% de l'impact équivalent en CO2 total de l'élément.

Concernant les éléments précontraints ou simplement préfabriqué le bénéfice du module D est très faible et représente moins de 1% de l'impact équivalent en CO2 total de l'élément.

Prise en compte des granulats de béton recyclés (GBR) dans BETie : dans l'accès grand public actuel de BETie (en date de la présente étude), on ne peut pas mettre de GBR dans la formulation. Cela peut être valorisé par le fournisseur de béton via son propre accès qui lui permet de renseigner une formulation précise du béton. Le transport amont des granulats est modifiable uniquement par le fournisseur.

² Par exemple le recyclage des matériaux en fin de vie est comptabilisé comme une valeur négative dans le module D

Indicateurs environnementaux présentés dans les FDES béton : Réchauffement climatique (impact carbone), couche d'ozone, acidification des sols et de l'eau, eutrophisation, épuisement des ressources abiotiques, pollution de l'eau et de l'air, utilisation d'énergie primaire, utilisation de matière, de combustible et d'eau douce, déchets dangereux.

→ On remarque qu'il n'y a pas d'indicateurs sur l'impact lié à la biologie/écologie (extraction des sables en milieu aquatique, extraction des roches dans les carrières).

3.4. Répartition des impacts environnementaux dans le béton armé

3.4.1. Impact des aciers de ferrailage

Par calcul, en comparant des bétons armés et des bétons non armés définis sous BETie il apparaît que l'impact environnemental de l'acier de ferrailage est de 1280 $\text{kg}_{\text{eqCO}_2}/\text{t}$.

A titre de comparaison l'impact annoncé dans le MDEGD de INIES est de 3680 $\text{kg}_{\text{eqCO}_2}/\text{t}$ d'acier (soit près de 3 fois plus impactant).

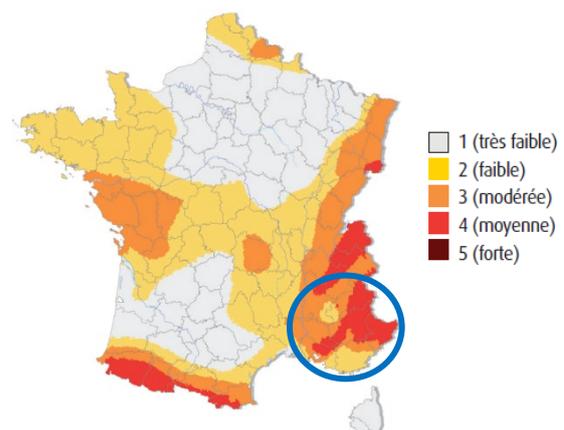
Dans un ouvrage moyennement ferrailé comme une dalle ou un voile (ferrailage proposé par défaut sur BETie de 50 kg/m^3), la proportion de ferrailage dans le béton armé est inférieure à 5% de la masse totale et inférieure à 1% du volume total.

Dans ce même cas, la part de l'impact environnemental du ferrailage est de l'ordre de 30% par rapport à l'impact total de l'élément.

Sur des poutres et des poteaux qui ont un taux de ferrailage plus important la part de l'impact environnemental du ferrailage est plus élevée et peut aller au-delà de 50% lorsque le taux de ferrailage dépasse 100 kg/m^3 .

→ La quantité de ferrailage dépend de la zone sismique mais aussi de la catégorie du bâtiment et de sa hauteur. Plus ces contraintes sont fortes plus le taux de ferrailage est important et l'impact environnemental associé aussi.

Il peut y avoir des pistes de réflexion pour diminuer le taux de ferrailage dans le béton armé : Augmentation de la classe de résistance du béton, précontrainte du béton, remplacement du ferrailage par des fibres. Ces solutions doivent être étudiées au cas par cas et engendrent un coût de conception et de fabrication plus élevé.



Carte risque sismique en France : En PACA on trouve des zones sismiques faibles à moyennes.

3.4.2. Impact du ciment

Le dosage de ciment peut varier dans la formulation de béton de 200 à 450 kg/m^3 .

Le guide de recommandations et d'aide à la prescription du SNBPE établit les comparaisons entre les formulations par rapport à une référence utilisant le CEM I.

Tableau 2 : Empreinte carbone du béton en fonction de l'effort de réduction appliqué à la formulation – exemples d'applications, à titre indicatif

Exemple d'application		Plancher intérieur/ Fondation	Voile extérieur non protégé de la pluie		Fondation (sol sulfaté)
Classe d'exposition et choix des classes de résistance du béton		XC1/XC2 C20/25	XC4/XF1 C25/30	XF1 C60/75	XA3 C40/50
Effort de réduction de l'empreinte carbone en kg éq. CO ₂ /m ³	Référence *	240	255	380	330
	Jusqu'à - 10 %	215 - 240	230 - 255	340 - 380	295 - 330
	Entre - 10 % et - 20 %	190 - 215	205 - 230	305 - 340	265 - 295
	Supérieur à - 20 %**	< 190	< 205	< 305	< 265

(*) Bétons conformes aux spécifications de la norme NF EN-206/CN, formulés en CEM I

(**) Solutions non disponibles sur l'ensemble du territoire et soumises à des restrictions d'emploi en hiver

Tableau issu du guide du SNBPE

Dans le tableau ci-dessous les impacts environnementaux de chaque ciment sont répertoriés. Ces impacts sont donnés pour 1 tonne de ciment prêt à être expédié. Le transport de l'usine de fabrication à la centrale à béton n'est donc pas compris. Le CEM I est pris en référence pour comparaison aux autres ciments.

Cette comparaison permet de mettre en avant l'importance du choix du ciment dans la formulation de béton, et l'amplitude des économies de GES possibles, modulo les contraintes normatives et restrictions d'utilisation.

	FDES ATILH impact du ciment kg _{eqCO2} /t	% de réduction par rapport au CEM I	Impact du ciment kg _{eqCO2} /m ³ dans 1 m ³ de béton (dosage à 300 kg/m ³)
CEM I prêt à expédier	765	-	230
CEM II A-L prêt à expédier	676	12%	203
CEM II A-S prêt à expédier	671	12%	201
CEM II B-L prêt à expédier	579	24%	174
CEM II B-M prêt à expédier	585	24%	176
CEM III/A prêt à expédier *	400	48%	120
CEM III/B prêt à expédier *	274	64%	82
CEM V A prêt à expédier	468	39%	140
CEM III/A PM-ES prêt à expédier *	319	58%	96
CEM III/A non PM-ES prêt à expédier *	464	39%	162

* Le CEM III est 30% plus cher que le CEM II.

On remarque dans la construction de bâtiment que les Entreprises de gros œuvre utilisent plus régulièrement du ciment de type CEM II que de type CEM I, pour des raisons pratiques. Pour autant le CEM I peut être particulièrement utilisé dans le cas d'un béton apparent lisse et homogène, même s'il n'est pas le seul facteur définissant l'apparence du béton (sable, fluidité, mise en œuvre, coffrage, huile de décoffrage, ...).

3.4.3. Impact des granulats

Les MDEGD disponibles sur INIES correspondant à des gravillons pour voirie ou pour toiture donnent des impacts 100 fois plus élevés que dans les données environnementales disponibles sur le site de l'Union Nationale des Producteurs de Granulats (UNPG).

Les données environnementales développées par l'UNPG concernent uniquement la phase de production des granulats, aucun impact lié au transport n'est pris en compte.

	Impact $\text{kg}_{\text{eqCO}_2}/\text{t}$	Impact des granulats $\text{kg}_{\text{eqCO}_2}/\text{m}^3$ dans 1 m^3 de béton (dosage à $1800 \text{ kg}/\text{m}^3$)
MDEGD granulats transport <100 km*	147	265
MDEGD granulats transport <500 km*	241	434
MDEGD granulats transport >500 km*	360	648
UNPG granulats sans transport	2,5	5

* Les données des MDEGD ne sont pas celles prises en compte par le configurateur BETie et sont ici présentées uniquement pour constater la majoration appliquée.

BETie s'appuie sur les données de l'UNPG concernant les granulats. Le transport de ces derniers est pris en compte à part et les données ne sont pas modifiables à partir de l'accès grand public. Seul le fournisseur peut modifier ces distances.

transport amont des matières premières

Les valeurs amont des matières premières sont les valeurs moyennes françaises.

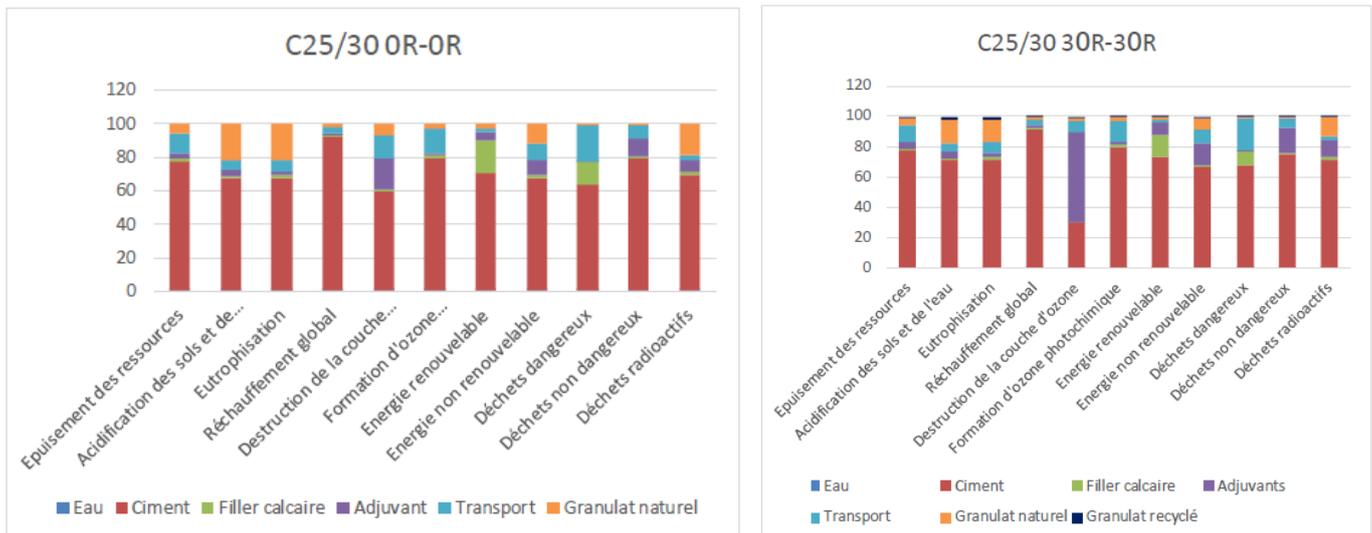
Matériaux	Transport amont des matières premières			
	Route (km)	Train (km)	Mer (km)	Fluvial (km)
Ciment	123,8	18,2	0	26
Gravier	22	0	0	22,25
Sable	22	0	0	22,25

Distances prises en compte par BETie dans le scénario de transport des granulats et du ciment jusqu'à la centrale à béton par défaut en utilisant le profil grand public.

La prépondérance des impacts liés aux consommations énergétiques est directement liée au procédé de production qui demande une quantité d'énergie importante. Cette consommation d'énergie pour la production est cependant à relativiser, selon RECYBETON, puisqu'un rajout de transport aval routier de 19 km équivaut à doubler la quantité de gaz à effet de serre émise.

3.4.3.1) Les impacts environnementaux sur différents critères avec et sans granulats recyclés

Une étude d'impact sur quelques bétons C25/30 a été réalisée dans le cadre du projet Recybéton (étude de l'utilisation de granulats recyclés dans le béton) pour identifier les étapes du processus et les constituants qui présentent un fort impact environnemental selon différents indicateurs (carbone, acidification, eutrophisation, épuisement des ressources...) :



Impacts environnementaux selon les composants pour quelques bétons C25/30 (Source : Recybéton)

0% de GR

30% de GR

> Cette étude d'impact confirme la prédominance de l'influence du ciment sur la plupart des indicateurs environnementaux, notamment celui du réchauffement climatique.

> Sur un critère d'analyse ACV des bétons, lorsque la composition est formulée à dosage volumique constant, l'utilisation de granulats recyclés (GBR) n'améliore ni ne détériore les indicateurs d'impact.

> Si le dosage en ciment du béton de GBR est plus élevé que celui du béton de GN, alors les indicateurs environnementaux sont plus pénalisants pour le béton de GBR.

3.4.4. Influence des distances de transport

Les résultats de l'ACV indiquent que de nombreux impacts environnementaux (consommation d'énergie, réchauffement global, eutrophisation, acidification, oxydants photochimiques) dépendent des conditions de transport (type et distance).

3.4.4.1) L'utilisation de granulats recyclés (GBR)

Le projet Recybéton s'est intéressé à l'influence du processus de fabrication des bétons sur les distances de transport ; en particulier l'influence du choix des scénarii de mélange granulats naturels/recyclés sur les distances de transport des granulats et du béton puis sur les indicateurs d'impacts environnementaux.

Les bétons de GBR étudiés en ACV ont fait l'objet d'une optimisation des formulations. Les compositions de bétons sont réalisées à volumes égaux de constituants (hormis le dosage en adjuvant) et quatre taux de substitution sont proposés : 0, 10%, 30% et 100% afin d'utiliser la même teneur en

ciment en utilisant des superplastifiants. Cette approche a permis d'analyser l'effet réel de la substitution de granulats naturels par des granulats recyclés.

L'application est faite pour 4 grandes villes : Strasbourg, Lille, Lyon et Bordeaux.

L'analyse a été menée au niveau du territoire et les distances parcourues pour acheminer les granulats vers les centrales à béton sont évaluées et comparées pour plusieurs circuits d'acheminement. L'analyse comparative des circuits sur l'acheminement des granulats a conduit à identifier pour la MAJORITE des villes le circuit 1 comme le circuit le moins pénalisant quel que soit le dosage de GBR. Ce circuit est celui qui consiste à préparer séparément les GBR et les GN sur leur plateforme respective puis à acheminer les granulats sur le site de la centrale BPE. Le choix d'un prémélange sur le site de production des GN pénalise le circuit, ce qui se traduit par une augmentation de la valeur t.km³.

Il faut souligner que le transport est très influent pour les indicateurs déchets dangereux et déchets inertes.

Il n'est pas possible de donner une conclusion universelle quelle que soit la ville étudiée. Une étude du territoire est indispensable pour déterminer le circuit favorable/pénalisant au taux de substitution envisagé.

L'augmentation du taux de recyclés nuit aux circuits d'acheminement des granulats (augmentation de la valeur t.km) sauf pour la ville de Lille du fait de l'éloignement des sites de GN.

> Sous réserve de proposer des formulations de bétons pour lequel le dosage en ciment n'est pas « prohibitif » au regard des indicateurs d'impact, il est possible de trouver soit le circuit optimal pour un dosage en granulat recyclé donné, soit le dosage en granulats recyclés maximal au-delà duquel l'utilisation des granulats recyclés impacte trop fortement les indicateurs (valeur t.km maximale). Mais ces valeurs optimales sont fonction des compositions de bétons et de la territorialisation, et aucune réponse universelle ne peut être formulée pour tout le territoire.

Ces études font aussi ressortir l'influence toujours prédominante du ciment. L'utilisation d'un ciment à teneur en clinker réduit serait une préconisation à indiquer pour l'utilisation de bétons de granulats recyclés, à condition de réussir à atteindre les résistances mécaniques voulues sans augmenter le dosage en ciment.

Le bénéfice principal apporté par l'utilisation de GBR est de limiter l'épuisement des ressources naturelles et de limiter l'impact de l'extraction sur la biodiversité.

3.4.4.2) Répartition des carrières et des centres de granulats recyclés en PACA

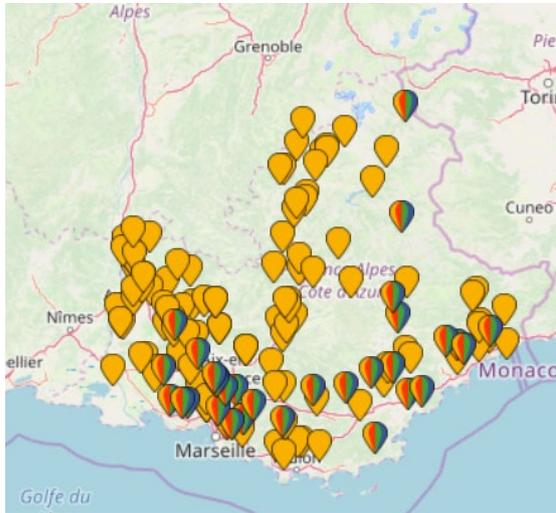
Les carrières de granulats naturels sont réparties sur l'ensemble du territoire avec une concentration sur l'arc méditerranéen de Nice à Avignon et sur l'axe d'autoroute A51 montant jusqu'à Gap.

Les centres de granulats de recyclage sont moins nombreux et concentrés sur l'arc méditerranéen de Nice à Avignon. Seul un centre se trouve dans les Alpes de Haute Provence.

³ t.km : on s'intéresse à la fois à la quantité transportée et aux kilomètres parcourus.

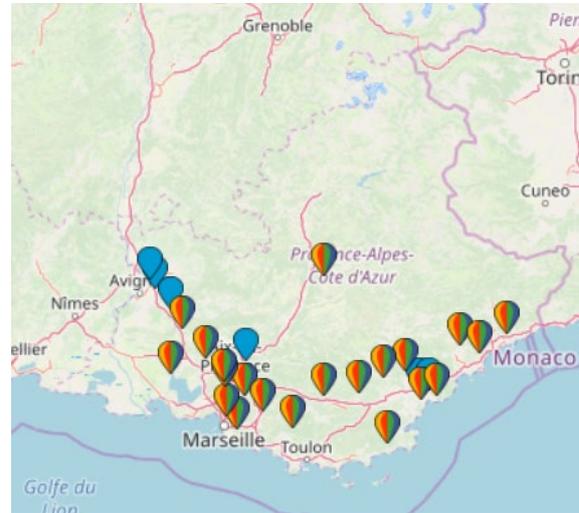
Ces éléments nous permettent d'apprécier les zones dans lesquelles le béton aura un impact environnemental plus important en raison du transport nécessaire en pratique pour sa mise en œuvre sur site.

Source : UNICEM.fr



LEGENDE

- GRANULATS NATURELS
- GRANULATS NATURELS ET AUTRES ACTIVITES



LEGENDE

- GRANULATS DE RECYCLAGE
- GRANULATS DE RECYCLAGE ET AUTRES ACTIVITES

3.4.4.3) Quels bénéfices pour une centrale à béton sur chantier ?

Au-delà de 7 000 m³ de béton l'installation d'une centrale à béton sur le chantier peut être intéressante. Cela correspond à une livraison totale de plus de 875 camions toupie de 8 m³ sur chantier. Au-delà de ce volume de béton, l'installation d'une centrale est conditionnée aussi par d'autres paramètres comme la typologie de chantier, la nature des bétons, et l'implantation sur site.

Dans le cas de l'installation d'une centrale à béton sur site des installations provisoires sont à réaliser :

- des travaux de fondation pour implanter la centrale et les différents silos ;
- terrasser une plateforme plus ou moins grande et prévoir éventuellement des rampes ;
- prévoir des voies de circulation pour les camions ;
- traitement des eaux usées ;
- évacuation des boues.

En pratique, la majorité des centrales à béton sont implantées sur site à cause du manque d'accessibilité du chantier : centre-ville, routes étroites et sinueuses.

Ce type d'installation permet de supprimer l'impact environnemental de la livraison de béton prêt à l'emploi sur chantier.

Pour autant, leur impact environnemental est a priori plus élevé. En effet, les installations provisoires, le processus de traitement des eaux usées et d'évacuation des déchets sont moins performants qu'en usine.

En conclusion, l'utilisation d'une centrale à béton sur chantier ne permet pas de diminuer l'impact environnemental du béton dans la construction.

3.4.4.4) Le recours à des éléments en béton préfabriqués

Prenons l'exemple des prédalles qui sont des éléments en béton préfabriqués en usine et mis en œuvre sur le chantier en lieu et place d'un coffrage traditionnel. L'utilisation des prédalles permet principalement de diminuer le temps de mise en œuvre et la quantité d'étais. Selon les caractéristiques des prédalles (quantité de ferrailage et précontrainte), la quantité de ferrailage peut être diminuée, de manière plus ou moins significative, dans la dalle coulée en place.

Nous savons que l'impact environnemental lié au transport de matériau est important. Dans le cas où une préfabrication foraine des prédalles n'est pas possible sur chantier, l'acheminement des prédalles de l'usine au chantier peut représenter un poste d'émission de GES important.

En ce qui concerne les données environnementales disponibles pour le béton prêt à l'emploi dans le configurateur BETie, la distance entre la centrale et le chantier est ajustable et par défaut elle est de 18,5 km. Tandis que la distance prise en compte dans la donnée environnementale de type collective pour les prédalles est de 115 km.

L'indicateur de réchauffement climatique sur cette étape de transport est de 1,12 kgeq.CO₂/m² de prédalle de 8 cm d'épaisseur et il est de 0,58 kgeq.CO₂/m² de dalle de 8 cm d'épaisseur. La comparaison se fait sur des éléments de même épaisseur pour que l'indicateur soit dans la même unité et donc comparable.

On remarque alors que le transport est près de 2 fois plus élevé pour une prédalle que pour une dalle coulée en place.

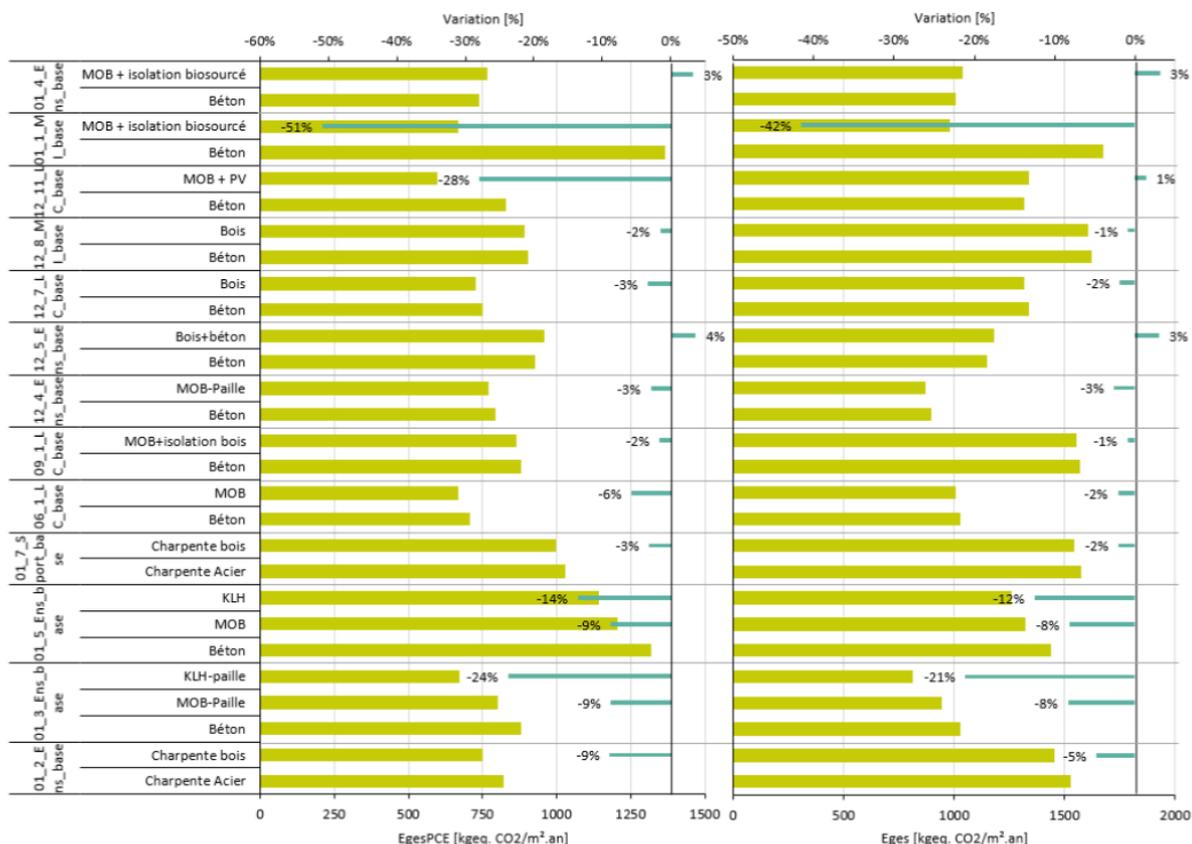
En conclusion, l'utilisation des prédalles a de nombreux avantages sur chantier notamment en termes de mise en œuvre. D'un point de vue environnemental leur utilisation doit être réfléchie de manière globale. En effet, la donnée environnementale disponible pour les prédalles ne donne pas de précision quant à la formulation du béton. Le seul critère mis en avant ici reste donc le transport.

3.5. Enseignements sur le choix du matériau de structure

A l'échelle de bâtiment, le choix du matériau de structure peut faire varier l'impact carbone global du bâtiment.

Dans le cadre du programme OBEC, différentes variantes ont été étudiées sur les matériaux de structure.

Le travail de synthèse de ces différents travaux réalisé par le CEREMA a fait ressortir que le choix de la donnée environnementale engendre une grande variabilité dans les résultats. Les résultats sont donc difficilement interprétables. Il en ressort de manière générale qu'une construction en ossature bois est moins impactante qu'une construction en béton. La différence d'impact varie de 5 à 50% sur l'indicateur EGES PCE selon les projets et les données environnementales choisies.



Variante en ossature bois issue du document de synthèse des travaux OBEC établi par le CEREMA

4. Les caractéristiques des bétons dits bas carbone

4.1. Les ciments

Il existe 3 types de ciment :

- Les ciments normés ;
- Les ciments sous avis technique,
- Les ciments hors normes.

Pour réduire l'impact carbone du ciment on peut utiliser des ciments normés qui, pour certain, permettent d'obtenir jusqu'à 60% de réduction carbone du béton.

On peut utiliser des ciments sous avis technique et des ciments hors norme sous réserve de justifier que les caractéristiques demandées sont atteintes. Ces ciments permettent de réduire l'empreinte carbone du béton en recomposant les bétons avec des ajouts de laitiers ou de cendres volantes (diminution de la quantité de ciment).

Par exemple, HAUFFMAN propose de nouveaux ciments, en cours de normalisation, qui intègrent au clinker différents composés cimentaires finement broyés (calcaire, laitier, cendres volantes, pouzzolanes ou argiles calcinées).

Aussi ECOCEM propose des laitiers à incorporer dans la formulation de béton pour diminuer le dosage en ciment. Un site de fabrication se trouve dans les Bouches-du-Rhône.

Pour aller plus loin

Des recherches sont actuellement menées pour développer de nouveaux clinkers, se caractérisant par une température de formation plus basse, et permettant une baisse de l'empreinte carbone de l'ordre de 30%.

Parmi ces projets, on compte le Projet européen de recherche **EcoBinder**, qui regroupe 14 partenaires, cimentiers, laboratoires et bureaux de contrôles techniques. A ce jour, les résultats permettent d'envisager, pour une réduction de 30% de l'empreinte environnementale, 20% de gain sur les propriétés d'isolation thermique et une capacité accrue de résistance au feu.

Sur le plan normatif, il faudra une norme spécifique, à laquelle le Projet EcoBinder travaille déjà en liaison étroite avec le comité de normalisation européen CEN/TC51.

Il y a aussi le développement de ciment **CEM VI** qui compte une part de clinker de seulement 35 à 50%. Les performances mécaniques et de durabilité sont analogues aux ciments actuels avec une réduction d'empreinte environnementale de 35 à 65% par rapport au CEM I.

La recherche en cours sur la carbonatation des bétons avec **FastCarb** permet de mettre en avant le pouvoir de stockage de manière accélérée du CO₂ dans les granulats de béton recyclé (GBR) en améliorant leur qualité par le colmatage de la porosité.

4.2. Les granulats recyclés

4.2.1. Définition

La production de granulats est assurée en majeure partie par extraction de matériau dans les carrières, mais elle peut aussi être issue de la déconstruction de bâtiment. On parle alors de granulats recyclés.

La création d'une filière de béton recyclé nécessite la mise en place de plateformes de recyclage des matériaux inertes de démolition du BTP et surtout un tri préalable sur chantier lors de la déconstruction.

4.2.2. Propriétés des GBR et conséquences sur la formulation des bétons

Les GBR sont plus hétérogènes que les GN et présentent donc des propriétés qui diffèrent sensiblement de celles des GN.

Le béton recyclé se distingue des bétons de granulats naturels par la présence de deux générations de pâte de ciment : celle, adhérente aux GBR, qui provient de l'ancien béton dont le concassage a produit les GBR et celle qui provient de l'hydratation du nouveau ciment ajouté aux GBR pour constituer le béton de seconde génération :

Les principales propriétés chimiques, physiques et mécaniques des GBR ont été mesurées avec différentes techniques dans le cadre du Projet National RECYBETON dont l'étude est en annexe du présent document.

Lors de la substitution des granulats naturels par des GBR, la morphologie et la rugosité des GBR conduit à **augmenter l'eau efficace et/ou la dose de plastifiant/superplastifiant** (adjuvants améliorant la maniabilité du béton) ce qui a pour effet de diminuer la résistance du béton et implique donc une plus grande quantité de ciment.

La demande en ciment augmente de façon non linéaire avec le taux de recyclage, pour un affaissement et une résistance donnée. Cet effet est négligeable pour les faibles taux de recyclage, mais il devient important pour les forts taux de recyclage (une légère augmentation de la teneur en ciment de 5 % est en général nécessaire pour le béton de GBR).

4.2.3. Contexte normatif

En Europe, l'organisation générale de la normalisation se traduit par des normes européennes accompagnées de dispositions nationales. Par exemple, en France, la norme EN 206 traitant du béton est transposée en norme NF EN 206/CN.

La norme EN 206 - 2013 permet l'utilisation de granulats recyclés, car elle se réfère pour leur acceptation à la norme européenne des granulats pour béton (EN 12620), dans laquelle la classification des granulats recyclés est donnée. Les GBR peuvent alors être utilisés dans le béton à condition d'être conformes aux normes [NF EN 12620+A1, 2008] et [NF P 18-545, 2011].

Type de granulat recyclé	Classe d'exposition selon [NF EN 206/CN, 2014]*			
	X0	XC1, XC2	XC3, XC4, XF1, XD1, XS1	Toutes les autres classes d'exposition
Gravillons recyclés de type 1	60	30	20	0
Gravillons recyclés de type 2	40	15	0	0
Gravillons recyclés de type 3	30	5	0	0
Sable recyclé	30	0	0	0

* Définition des classes d'exposition : X0 : Aucun risque de corrosion ou d'attaque, XC : Corrosion induite par la carbonatation, XS : corrosion induite par les chlorures de l'eau de mer, XD : Corrosion induite par chlorures autres que de l'eau de mer. Plus l'indice est élevé, plus l'environnement est sévère.

Taux maximum de substitution des sables et gravillons de GBR selon la norme [NF EN 206/CN, 2014] en % de la masse totale de sable ou de gravillons, respectivement

On constate que les directives fixées par la norme NF EN 206/CN, 2014 sont plutôt restrictives et que les taux de recyclage sont limités. Cette approche prudente est justifiée par le manque de connaissances sur la durabilité des bétons incorporant des GBR.

Toutefois, les études réalisées dans le cadre du Projet National RECYBETON et de l'ANR ECOREB confirment que des bétons peuvent être fabriqués avec des GBR, même à des taux de substitution importants. Les caractéristiques physico-chimiques intrinsèques des GBR et leur taux de substitution sont des facteurs déterminants vis-à-vis des propriétés de durabilité du nouveau béton.

5. Cas concret d'un groupe scolaire

Le groupe scolaire pris en exemple est construit en béton armé. L'ensemble des éléments en béton représente 38% de l'impact environnemental des produits de construction et équipements du bâtiment. Intéressons-nous aux éléments les plus impactant du béton armé : le ciment et le ferrailage.

5.1. Impact du type de ciment

Le groupe scolaire a été construit avec une formulation de béton utilisant un CEM III/B.

Le CCTP imposait une réduction minimale de 20% de l'impact carbone du béton par rapport à une formulation utilisant un CEM I en lien avec la démarche BDM suivie. La formule choisie par le bureau d'études a permis d'atteindre une réduction de **60%** de l'impact carbone du béton.

L'étude comparative a été faite sur 1 m³ de béton livré sur chantier, sans tenir compte de la mise en œuvre (les aciers de ferrailage n'ont pas été pris en compte). Aucun granulats recyclés n'a été utilisé dans la formulation.

Ainsi l'ordre de grandeur de réduction de l'impact carboné observé à l'échelle de l'ensemble des éléments béton équivaut à celui de la comparaison entre l'impact d'un CEM I et celui d'un CEM III/B (64% selon tableau ci-dessous). Cela montre bien que l'élément le plus impactant d'un point de vue des émissions de GES est le ciment.

	FDES ATILH impact kg _{eq} CO ₂ /t	% de réduction par rapport au CEM I
CEM I prêt à expédier	765	-
CEM II A-L prêt à expédier	676	12%
CEM II A-S prêt à expédier	671	12%
CEM II B-L prêt à expédier	579	24%
CEM II B-M prêt à expédier	585	24%
CEM III/A prêt à expédier	400	48%
CEM III/B prêt à expédier	274	64%
CEM V A prêt à expédier	468	39%
CEM III/A PM-ES prêt à expédier	319	58%
CEM III/A non PM-ES prêt à expédier	464	39%

Regardons l'impact du choix du ciment à l'échelle d'un projet :

Avec l'optimisation de la formulation de béton le projet est tout juste classé C1 dans le cadre de l'expérimentation OBEC en région Provence-Alpes-Côte d'Azur.

L'utilisation d'un CEM II A-S à la place du CEM III/B engendrerait un impact supplémentaire de 152 kg_{eq}CO₂/m²_{SDP} à l'échelle du projet. Le bâtiment ne serait alors plus classé C1 en raison du dépassement du seuil EGES PCE max.

Avec une utilisation de CEM III/B, le lot superstructure représente 23% des émissions de GES du bâtiment et les fondations représentent 15% des impacts sur l'ensemble des lots. L'utilisation d'un

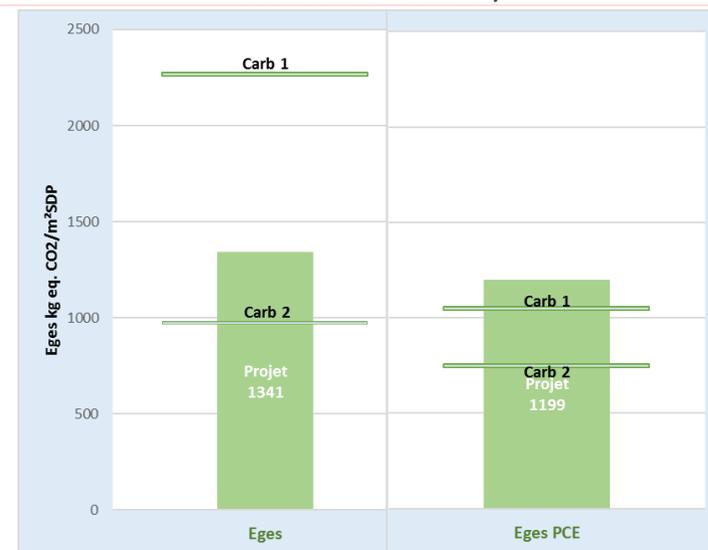
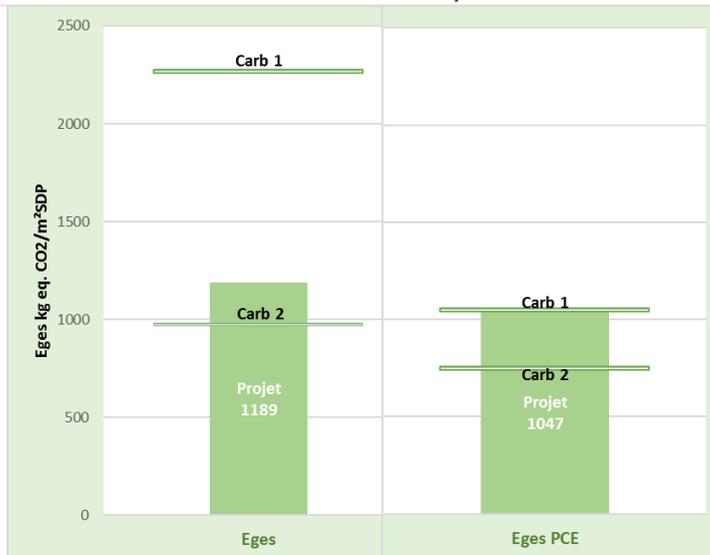
CEM II A-S augmenterait la part de ces lots respectivement de 3% et de 5%. Cette augmentation est significative sur le lot fondations car la majorité des éléments contenus dans ce lot correspondent aux pieux. Tandis que dans le lot superstructure des éléments très impactants indépendants de la formulation de béton (car non pris en compte avec BETie) sont comptabilisés comme par exemple les prédalles et les escaliers en béton armé.

Le choix du type de ciment est un des leviers pour faire baisser l'impact carbone du béton, mais le choix et l'intégration de certains adjuvants permet également de modifier la composition du béton et de diminuer l'impact carbone.

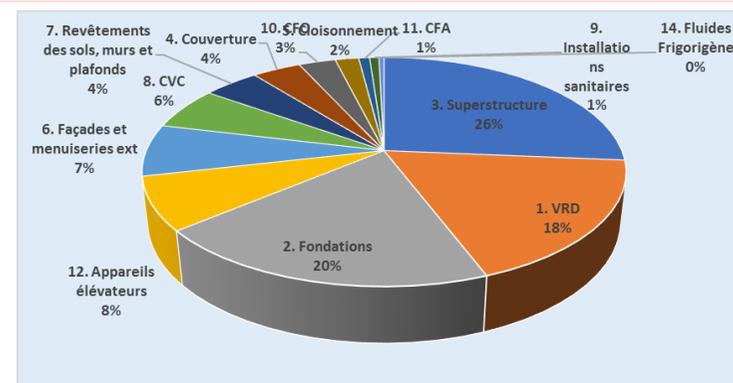
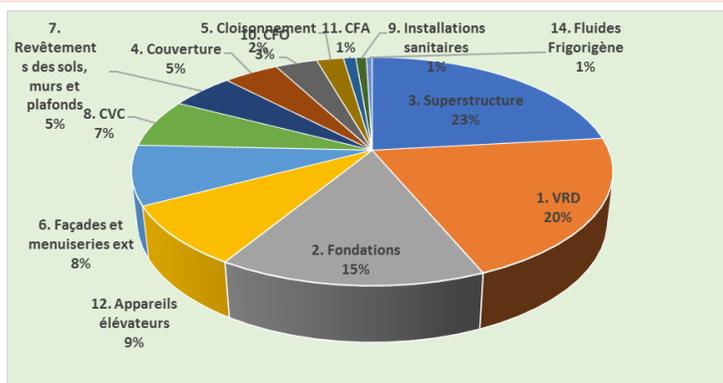
Utilisation d'un CEM III/B (20 à 34% de clinker et 66 à 80% de laitier de haut fourneau)

Utilisation d'un ciment CEM II A-S (80 à 94% de clinker et 6 à 20% de laitier de haut fourneau)

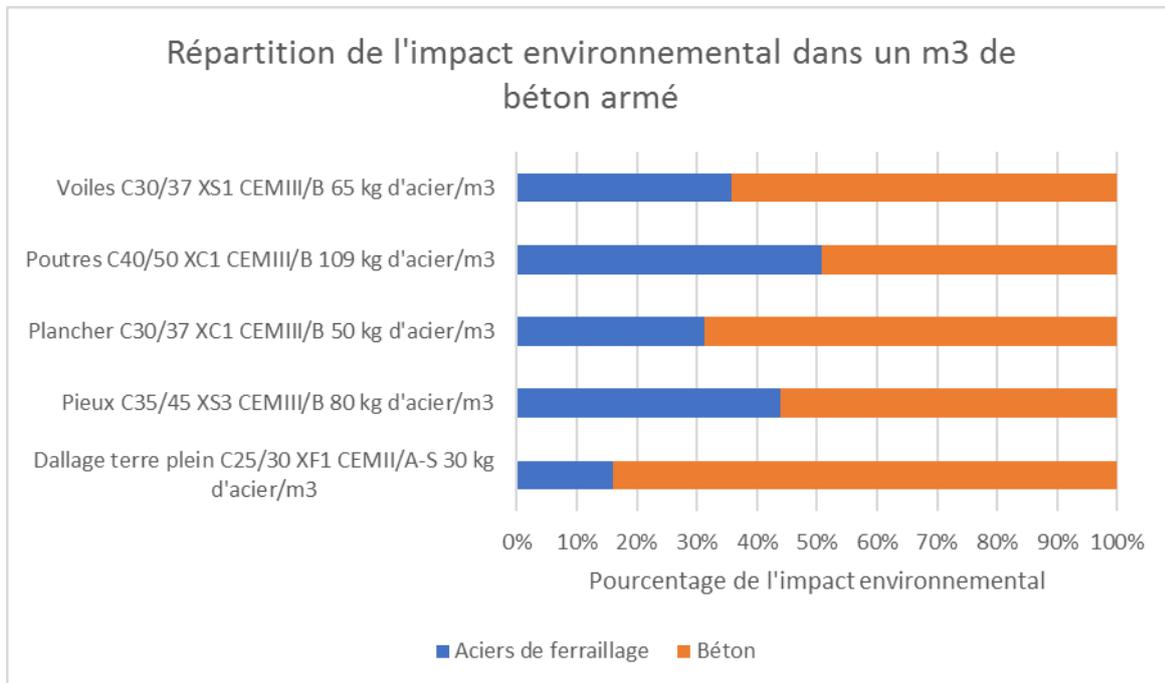
Niveau Carbone



Répartition des impacts d'émissions de GES par lot au sens du référentiel E+C-

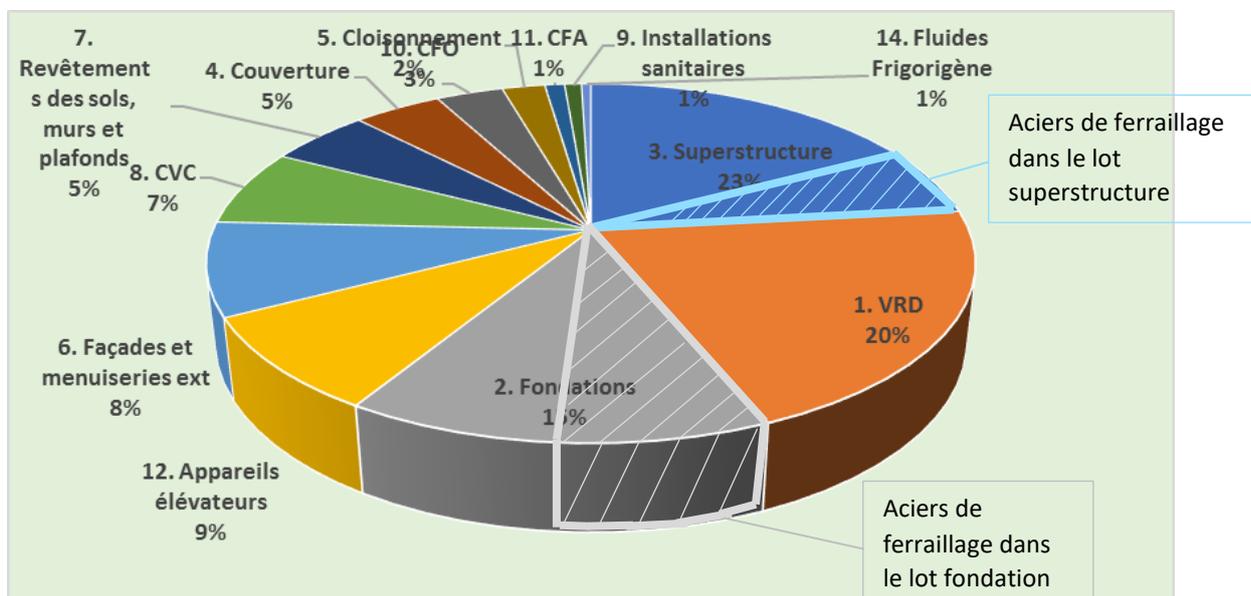


5.2. Poids de l'impact des aciers dans le béton armé



A l'échelle du projet les aciers de ferrailage compris dans les éléments de béton armés coulés en place (hors prédalles et escaliers en béton armé) représentent $131 \text{ kg}_{\text{eqCO}_2}/\text{m}^2_{\text{SDP}}$ soit 13% de l'impact total EGES PCE.

Les aciers de ferrailage représentent donc 48% des impacts du lot fondation et 23% du lot superstructure. Ces éléments peuvent cependant difficilement être plus optimisés dans la mesure où ils conditionnent strictement la durabilité de l'ouvrage. A ce jour, les bureaux d'études et Entreprises travaillant sur le sujet réalisent déjà des optimisations économiques et matérielles strictes qui correspondent aux enjeux de réduction des impacts environnementaux.



Bibliographie

Bétons et empreinte carbone des bâtiments. Guide de recommandations et d'aide à la prescription à l'attention des maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre :

FDES ciments : <https://www.infociments.fr/ciments/ciments-declaration-environnementale-inventaire-analyse-du-cycle-de-vie>

De granulats : <https://www.unpg.fr/accueil/dossiers/environnement/analyse-de-cycle-de-vie-des-granulats/>

« *Le béton recyclé* » de François de Larrard et Horacio Colina, Ifsttar 2018.

« *Comment recycler le béton dans le béton – Recommandations du projet national Recybeton* » - Novembre 2018.

<https://www.infociments.fr/ciments/les-nouveaux-ciments-bas-carbone>

Le béton recyclé en route vers sa recarbonatation – Le Moniteur article du 19/11/2019

<https://www.lemoniteur.fr/article/le-beton-recycle-en-route-vers-sa-recarbonatation.2062769>

Pathologie La Carbonatation de Christophe Carde (Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Matériaux), 2006

<http://doc.lerm.fr/wp-content/uploads/2013/08/carbonatation-carde.pdf>

<https://www.ciments-hoffmann.fr/>

<https://www.inies.fr>

<https://www.lemoniteur.fr/article/le-beton-cherche-a-limiter-ses-emissions-de-co2.2060869>

<https://www.lemoniteur.fr/article/quand-installer-une-centrale-a-beton-mobile.813654>

ANNEXE 1 : Classement des granulats en fonction de leurs dimensions – d/D

Types	Dimensions	Caractéristiques
Fillers	0/D	D<2mm
Sables	0/D	D≤4mm
Graves	0/D	D≥6,3mm
Gravillons	d/D	d≥2mm et D≤125mm
Ballasts	d/D	d=25mm et D=50 ou 63mm

ANNEXE 2 : Les différentes natures de ciment

La composition du ciment peut varier en fonction des différents besoins, ce qui le divise en plusieurs natures :

Nature	Composition	Usage courant	Contre-indication
CEM I (ciment Portland)	Minimum 95 % de clinker et au maximum 5 % de constituants secondaires	Béton armé, Béton précontraint	Forte chaleur d'hydratation qui risque de conduire à une température excessive lors de la réalisation des ouvrages massifs
CEM II (ciment Portland composé)	Minimum 65 % de clinker et au maximum 35 % d'autres constituants comme le laitier de haut-fourneau, « la fumée de silice » (limitée à 10 %), la pouzzolane naturelle, les cendres volantes, les calcaires, etc.	Béton armé, Béton précontraint, Ouvrages massifs	En béton apparent, il faut éviter l'emploi de certains CEM II avec des proportions importantes de constituants pouvant entraîner des variations importantes de teinte marquées (ex : cendres volantes)
CEM III A, B ou C (ciment de haut-fourneau)	5 à 64 % de clinker avec 36 à 95 % de laitier de haut-fourneau	Travaux hydrauliques, souterrains, fondations et injections en milieu agressif	Idem CEM II, Est sensible à la dessiccation, il faut le maintenir humide pendant la prise (utilisation de produits de cure). Restriction d'emploi par temps froid.
CEM V A ou B (ciment composé)	20 à 64 % de clinker, 18 à 50 % de laitier de haut-fourneau et 18 à 50 % de cendres volantes siliceuse et/ou de pouzzolanes.		

ANNEXE 3 : Les différents adjuvants

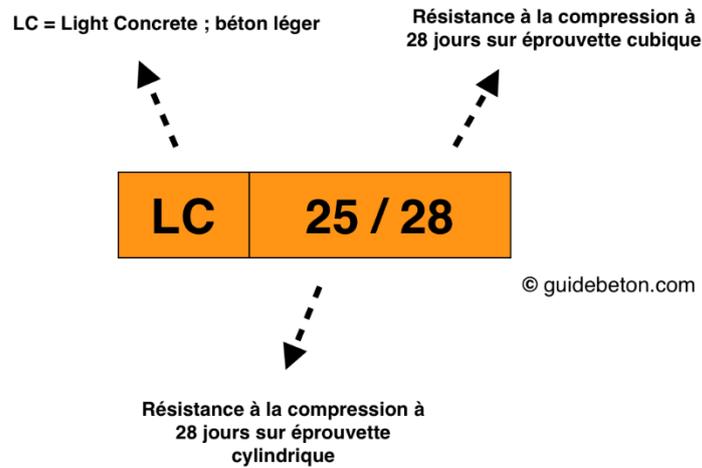
Nature	Effets
Prise et durcissement	<p><u>Accélérateur de prise</u> : accélère le temps de prise du béton.</p> <p><u>Accélérateur de durcissement</u> : accélère le temps de durcissement du béton.</p> <p><u>Retardateur de prise</u> : ralentit le temps de prise du béton sans l'altérer.</p>
Ouvrabilité du béton	<p><u>Plastifiant</u> : améliore la maniabilité du béton sans l'altérer.</p> <p><u>Plastifiant réducteur d'eau</u> : réduit la teneur en eau dans le but d'augmenter la résistance du mélange, tout en ayant une bonne maniabilité.</p> <p><u>Superplastifiant</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> - <u>Fonction fluidifiant</u> : (dosage en eau normal) améliore la maniabilité mais diminue la résistance. - <u>Fonction réducteur</u> : (très faible dosage en eau) entraîne une forte réduction en eau dans le mélange tout en conservant une bonne maniabilité.
Modification de certaines propriétés	<p><u>Entraîneur d'air</u> : permet la formation de petites bulles d'air réparties de manière homogène. Ce qui augmente la maniabilité et la résistance au gel du béton à l'état solide.</p> <p><u>Hydrofuge</u> : améliore l'imperméabilité du béton en obturant les pores.</p> <p><u>Les pigments</u> : offrent la possibilité de modifier la couleur du béton.</p>
Les produits de cure	<p>Produits appliqués à la surface du béton frais, ils ont pour rôle de protéger le béton contre d'éventuels risques de dessiccation.</p>

ANNEXE 4 : Classe de résistance des bétons ordinaires (norme NF EN 206-1)

Type de béton	Classe de résistance à la compression	Exemples
Béton ordinaire	C8/10	Usage décoratif seulement
	C12/15	Usage décoratif seulement
	C16/20	Béton de propreté (non armé)
	C20/25	Fondations légères (semelle filante ou isolée) Dallage sur vide sanitaire
	C25/30	Dalle/plancher interne à une maison Dalle extérieure classique et dallage sur terre-plein, sans contraintes particulières Voile intérieur ou extérieur, sans contraintes particulières
	C30/37	Dallage sans contraintes particulières, avec emploi de fibres structurales
	C35/45	Béton pour hangar agricole (élevage, fumier...)
	C40/50	
Béton à hautes performances	C45/55	Elément soumis à des efforts importants (poutres de très grande portée ou plancher très chargé) – béton de haute résistance
	C50/60	Béton haute résistance
	C55/67	Béton haute résistance
	C60/75	Béton haute résistance
Béton à très hautes performances	C70/85	Béton haute résistance
	C80/95	Béton haute résistance
	C90/105	Béton haute résistance
	C100/115	Béton haute résistance

ANNEXE 5 : Classe de résistance des bétons légers

La norme NF EN 206-CN distingue **14 classes de résistance** chez les bétons légers :



Béton léger	Exemples
LC 8/9	Béton de remplissage, permet de remplir d'anciens planchers et leur redonner de la résistance sans trop les alourdir
LC 12/13	Béton de remplissage, permet de remplir d'anciens planchers et leur redonner de la résistance sans trop les alourdir
LC 16/18	Béton de remplissage, permet de remplir d'anciens planchers et leur redonner de la résistance sans trop les alourdir
LC 20/22	Béton pour chape de ragréage légère (possible en béton structural)
LC 25/28	Béton pour chape de ragréage légère (possible en béton structural)
LC 30/33	Béton pour chape de ragréage légère (possible en béton structural)
LC 35/38	Béton pour chape de ragréage légère (possible en béton structural)
LC 40/44	Béton pour chape de ragréage légère (possible en béton structural)
LC 45/50	Ouvrages particuliers peu courants (possible en béton structural)
LC 50/55	Ouvrages particuliers peu courants (possible en béton structural)
LC 55/60	Ouvrages particuliers peu courants (possible en béton structural)
LC 60/66	Ouvrages particuliers peu courants (possible en béton structural)
LC 70/77	Ouvrages particuliers peu courants (possible en béton structural)
LC 80/88	Ouvrages particuliers peu courants (possible en béton structural)

ANNEXE 6 : Classe d'exposition et classe de résistance minimale

La norme NF EN 206-CN définit des valeurs limites spécifiées relatives à la composition et aux propriétés du béton en fonction de chaque classe d'exposition :

Classe d'exposition	Classe de résistance minimale
X0	-
XC1 - XC2	C20/25
XC3 - XC4 - XD1 - XF1 - XF2	C25/30
XD2 - XS1 - XS2 - XF3 - XF4 - XA1	C30/37
XD3 - XS3 - XA2	C35/45
XA3	C40/50

ANNEXE 7 : Différents types de granulats recyclés

La norme NF EN 206-CN définit différents types de granulats recyclés en fonction de leur composition en éléments principaux et secondaires ainsi que de la fréquence des essais associée.

Les 3 types de gravillons recyclés sont définis en fonction de leurs caractéristiques :

- Type 1 : toutes les caractéristiques sont CR_B
- Type 2 : toutes les caractéristiques sont CR_B ou CR_C
- Type 3 : toutes les caractéristiques sont CR_B ou CR_C ou CR_D

Code	Constituants principaux selon NF EN 12620	Constituants secondaires				Type de fréquence d'essai	
		Catégories NF EN 12620				Temporelle	Quantitative
CR _B	Rcu ₉₅		Rb ₁₀	XRg _{0,5}	FL _{0,2}	2/mois	1/2000 tonnes
CR _C	Rcu ₉₀	Rb ₁₀	Ra ₁	XRg ₁	FL ₂		
CR _D	Rcu ₇₀	Rb ₃₀	Ra ₁₀	XRg ₂	FL ₂		

Tableau NA.2 : Constituants des granulats recyclés

Eléments contenus dans un granulat recyclé :

- Rc : béton, mortier, élément de maçonnerie en béton contenus dans un granulat recyclé
- Ru : granulats non liés, pierre naturelle, granulats traités aux liants hydraulique contenus dans un granulat recyclé
- Rcu = Rc + Ru.
- Rg : verres contenus dans un granulat recyclé
- Ra : matériau bitumineux contenus dans un granulat recyclé
- Rb : éléments en argile cuite (briques, tuiles), éléments en silicate de calcium, béton cellulaire non flottant
- X : argiles, sols, métaux, bois, plastiques, caoutchouc, plâtre,
- FL : matériau flottant

ANNEXE 8 : Etude RECYBETON

