TD n°01 : De la production du clinker à l'empreinte carbone d'un bâtiment

Objectifs du TD

À l'issue de ce TD, vous serez capables de :

- identifier les principales sources d'émissions de CO_2 associées à la fabrication du ciment ;
- quantifier les émissions de CO_2 associées à un béton courant ;
- identifier les constituants les plus contributeurs à son empreinte carbone ;
- identifier les principaux leviers de réduction de l'empreinte carbone d'un béton ;

Partie 1 : étude du ciment

Le ciment Portland CEM I contient majoritairement du clinker ($\simeq 95\ \%$). La fabrication du clinker nécessite de chauffer à haute température (1 450°C) un cru [1] constitué de matières premières, principalement constitué de calcaire (80 %) et d'argile ($20\ \%$).

Ce processus génère des émissions de CO_2 eq issue à la fois du procédé de cuisson (four) et de la décarbonatation du calcaire. Nous obtenons la décomposition suivante :

Phase 1 : Les émissions de décarbonation des matières premières :

Phase	Notation Cimentaire	Emission de $CO_{2\ eq}$ [kg/tonne]
Alite – $3C_aO \cdot S_iO_2$	C_3S	579
Bélite – $2C_aO \cdot S_iO_2$	C_2S	512
Aluminait tricalcique – $3C_aO \cdot A_{l,2}O_3$	C_3A	489
Alumino-ferrite tétracalcique – $4C_aO \cdot A_{l,2}O_3 \cdot F_{e,2}O_3$	C_4AF	362

Figure 1 - Tableau des phases majoritaires du clinker avec leur émissions de $CO_{2\ eq}$ d'après [2].

Phase 2 : Les émissions issues du four :

La température élevée nécessaire à la clinkérisation est obtenue grâce à la combustion de combustibles dans le four. Cette combustion génère des émissions de CO_2 qui dépendent fortement du mode de cuisson (voie sèche, humide…).

Question 1 : En supposant la répartition suivante des phases minérale au sein du clinker, calculer les émissions GES issues de la phase 1.

Phase en notation cimentaire	Répartition [%]
C_3S	60
C_2S	20
C_3A	10
C_4AF	10

Figure 2 - Tableau des répartitions des phases minérales du clinker. Valeurs pédagogiques moyennes issues de [3].

Les résultats d'Inventaire du Cycle de Vie (ICV) du ciment CEM I en vrac [4] mentionne une émission de GES total sur l'impact changement climatique correspondant à 791 kg.CO_2.eq/tonne de ciment.

Question 2 : Déterminer la ou les causes raisons de l'écart avec la valeur précédemment calculée.

Question 3 : En déduire les émissions moyennes issues de la phase 2 et le pourcentage de chacune des deux phases. Conclure sur les solutions de réductions des émissions.

Question 4 : A partir des résultats de l'ICV du CEM II/A-L & A-P [5]**, ce ciment émet 702 kg.CO_2.eq/tonne. Expliquer l'écart avec le CEM I en vrac.**

Question 5 : En supposant que le CEM II/A-L & A-P [5] **contient 88% de clinker, 12% d'additions minérales, déterminer les émissions de CO_2.eq émises par celles-ci. Vous supposerez que le CEM I contient 98,5% de clinker.**

Questions 6 : Conclure sur les possibilités de réductions des émissions du ciment.

Partie 2 : étude du béton

Le produit manufacturé béton prêt à l'emploi (BPE), livré sur chantier se compose d'un mélange de granulats (d'origine naturelles alluvionnaires ou bien concassés de carrière), de ciment, d'eau, d'air et d'adjuvants. La Figure 3 montre les ordres de grandeurs de composition d'un béton standard en proportion massique.

	Composition d'un béton traditionnel				
Composant	Granulats	Ciment	Eau	Air	Adjuvant
Fraction massique %	63-85	10-20	7-10	/	0,1 – 1,0

Figure 3 - Ordre de grandeur des composants d'un béton.

Pour cette partie, nous étudierons le jeu de donnée pédagogiques suivant :

- CEM II/B-M, CEM II/B-S, avec sa FDES [6]. Ce ciment génère 592 kg.CO_2.eq/tonne.
- Teneur en liant total 11,50%
- Teneur en granulat total 80,50%
- Teneur en granulat recyclé (0%).
- Vous négligerez les émissions de GES de la part de l'eau et des adjuvants.
- Masse volumique du béton étudié 2 297 kg/m^3

Questions 7 : Pour 1 m^3 de béton, calculer les émissions de CO_2 eq de la part du ciment.

Afin de prendre en compte les émissions de GES des granulats, nous considérons les valeurs issues de [7].

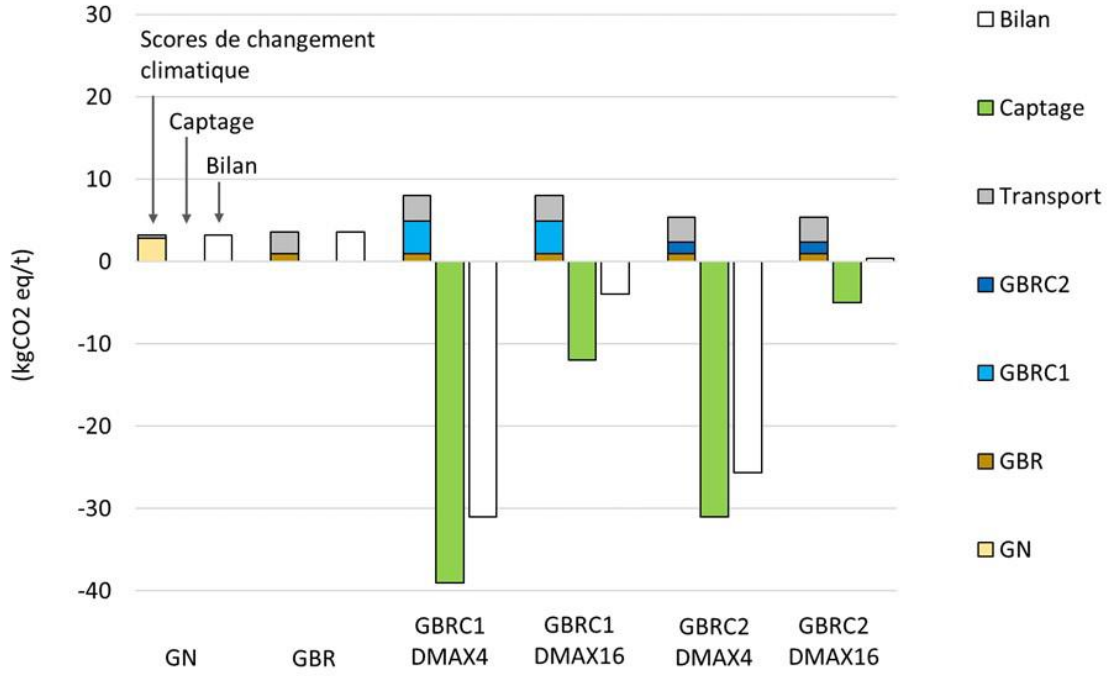


Figure 4 - Comparaison des impacts sur le changement climatique de différents scénario d'approvisionnement en granulat, pour une distance de 5 km (GN : granulat naturels) ; 20 km (GBR : granulats de béton recyclés) ; 35 km (GBRC : granulats de béton recyclé carbonaté)

Questions 8 : Pour 1 m³ de béton, calculer les émissions de CO_2 éq de la part des granulats naturel. Puis calculer celles issues de l'ensemble des constituants.

Questions 9 : Veuillez prendre en considération les émissions émises pendant le transport du BPE sur chantier. Pour cette étape, vous considérez le jeu de données pédagogique suivant extrait des FDES du fabricant LAFARGE.

Paramètre	Valeur
Type de combustible et consommation du camion malaxeur ou autre type de véhicule utilisé pour le transport	Camion malaxeur 8 m³, diesel (0,07 L/m³.km)
Distance jusqu'au chantier	18,5 km aller simple
Utilisation moyenne de la capacité (y compris les retours à vide)	50 %
Masse volumique du béton	2 297 kg/m3
Emissions CO_2 eq du gazole routier [8]	3,46 kg éq CO2/L

Figure 5 - Etape de mise en œuvre du BPE.

Questions 10 : En déduire le poste le plus émetteur pour la fabrication et la livraison d'1m³ de béton *in situ*. En déduire les leviers de réductions à enclencher préférentiellement pour réduire les émissions d'un BPE.

Questions 11 : A partir de la Figure 4, estimer la réduction maximale d'émission de CO_2 éq avec des granulats recyclés carbonatés. Vous considérez que les granulats constitutifs d'un béton respect le ratio suivant :

$$\frac{Masse\ gravier\ (particules\ de\ 16\ mm)}{Masse\ sable\ (particules\ de\ 4mm)} = 1{,}2$$

Questions 12 : Conclure.

Partie 3 : Comparaison des modes constructifs

Dans les parties précédentes, vous avez étudié les émissions de gaz à effet de serre associées au ciment, aux granulats et au transport du béton. Vous avez également étudié l'effet du recours aux granulats recyclés carbonatés. Ces résultats permettent d'identifier des leviers d'action à l'échelle du matériau.

Cependant, une autre possibilité consiste à agir directement sur la quantité de matériau nécessaire pour réaliser l'ouvrage. En effet, un béton présentant une empreinte carbone réduite par m³ n'est pas nécessairement la solution permettant de minimiser l'empreinte carbone totale d'une structure si cette solution nécessite davantage de béton.

Dans un premier temps, nous réalisons une étude comparative d'une **poutre en béton armé** au sein d'un ouvrage bâtimentaire simple. Chacune des variantes proposées permettra de supporter les **mêmes sollicitations structurelles** avec une même distance entre les appuis, *i.e.* une même unité fonctionnelle. Nous ne prendrons en considérations que des modifications dimensionnelles des sections.

Nous considérons la poutre définit par la Figure 6. Elle met en évidence un ensemble de sollicitations extérieures à supporter par la poutre. La section est supposée rectangulaire avec un ratio hauteur/largeur égal à 2. L'effort $P_{p,poutre}$ correspond au poids propre de la poutre ; la somme des charges G à l'ensemble des charges permanentes et d'exploitation de l'ouvrage. En complément, le bureau d'étude structure mentionne que $h = l_{eff}/10$.

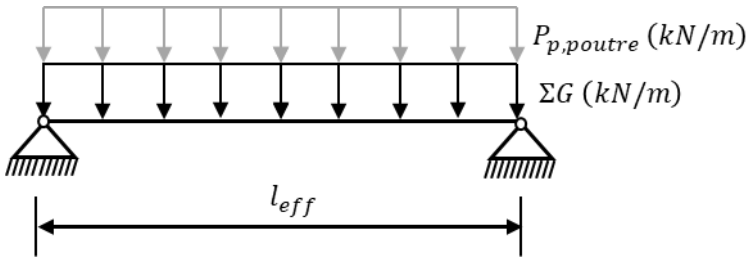


Figure 6 - Poutre d'étude. Modélisation RDM.

Questions 13 : En supposant une distance entre les appuis de 8m, obtenir les dimensions géométriques de la poutre. En déduire l'effort du poids propre de la poutre exprimé (kN/m).

Questions 14 : Le bureau d'étude indique que $\Sigma G = 56{,}8\ kN/m$. Calculer la somme des deux sollicitations et en en déduire le moment fléchissant maximal désigné M_{Ed}^{ELU} à mi-travée. [1]

Questions 15 : Calculer la section d'armature tendue en fibre inférieure selon les deux configurations suivantes à partir de l'expression ci-dessous. La Figure 7 présente deux variantes d'une même poutre. La variante 1 correspond à la poutre de référence avec un béton de résistance égale à 25 MPa en compression. La variante 2 correspond à une poutre avec un béton de résistance supérieure nécessitant moins d'armature métallique.

$$A_{st} = \frac{M_{Ed}^{ELU}}{f_{yd} \times 0{,}9 \times h \times (1 - 0{,}4 \times \alpha_l)}$$

Variante	**1**	**2**
Classe du béton	C25/30	C50/60
$f_{yd}(MPa)$	470	470
α_l	0,15	0,098

Figure 7 - Dimensions des poutres d'études.

[1] Les pondérations d'usage aux états limites ultimes sont déjà pris en considération dans les valeurs numériques.

Questions 13 : Pour chacune des variantes, calculer les émissions de CO_2 éq issues du béton et des armatures. Pour l'acier, vous considérez que ces émissions correspondent à 1,33 kg. CO_2.éq/kg d'armature en conformité avec la FDES [9]. La masse volumique de l'acier sera considérée à 7 850 kg/m^3. Les émissions du transport et des granulats étant supposées identiques pour les deux variantes, vous ne les prendrez pas en considération. Les émissions CO_2 éq du béton seront extraites des résultats précédents, la résistance en compression ne modifie pas les émissions de CO_2 éq[2].

Questions 14 : Pour chaque variante, calculer le ratio $A_{st}/(0{,}9.b.h)$. Conclure sur la pertinence de la variante n°2.

Questions 15 : Le bureau d'étude de structure propose deux autres variantes ayant les mêmes propriétés mécaniques que la solution de référence n°1 mais avec des sections différentes. Calculer leurs émissions CO_2 éq.

Variante	**3**	**4**
Classe du béton	C35/45	C50/60
Résistance du béton en compression (MPa)	35	50
Longueur poutre (m)	8	8
Largeur poutre, b (cm)	30	30
Hauteur poutre, h (cm)	50	50
Quantité d'armature tendue, Ast (cm^2)	28,35	25,85
Ratio $A_{st}/(0{,}9.b.h)$ [%]	2,10	1,91

Figure 8 - Valeurs des variantes de poutre 3 et 4.

Questions 16 : Conclure sur la pertinence d'augmenter le ratio d'armature et la résistance du béton.

Afin de comparer différentes solutions structurelles avec la meilleure proposition en béton armé, nous considérons deux variantes : l'une en charpente métallique, l'autre en charpente bois. Nous conservons une configuration identique que la Figure 6.

Questions 17 : Le bureau d'étude indique que les efforts sur la poutre correspondent à $56{,}8\ kN/m$ hors poids propre de la poutre métallique (ici négligeable). Calculer le moment fléchissant maximal désigné M_{Ed}^{ELU} à mi-travée. [3]

Questions 18 : Afin de dimensionner la section de la poutre métallique, vous exploiterez la proposition émise par l'Eurocode 3 (réglementation en vigueur). Vous considérez un acier traditionnel en nuance S235 tel que $f_{yd} = 235\ MPa$. Déterminer la valeur minimale du module de flexion plastique $W_{pl,y}$.

$$\frac{M_{Ed}^{ELU}}{W_{pl,y} \times f_{yd}} \leq 1{,}0$$

Questions 19 : A partir de la Figure 9 en déduire une désignation de section.

[2] Information extraite de l'ICV CEM II/A-L & A-P – EN VRAC par France Ciment.
[3] Les pondérations d'usage aux états limites ultimes sont déjà pris en considération dans les valeurs numériques.

Désignation		Dimensions		Valeurs statiques					
				axe fort y-y				axe faible z-z	
	G kg/m	h mm	b mm	I_y mm^4 $x10^4$	$W_{el,y}$ mm^3 $x10^3$	$W_{pl,y}$♦ mm^3 $x10^3$	A_{vz} mm^2 $x10^2$	$W_{el,z}$ mm^3 $x10^3$	$W_{pl,z}$ ♦ mm^3 $x10^3$
IPE A 80•/*	5,0	78	46	64,4	16,5	19,0	3,07	2,98	4,7
IPE 80*	6,0	80	46	80,1	20,0	23,2	3,58	3,69	5,8
IPE 100*	8,1	100	55	171	34,2	39,4	5,08	5,79	9,2
IPE 120	10,4	120	64	318	53,0	60,7	6,31	8,65	13,6
IPE 140	12,9	140	73	541	77,3	88,3	7,64	12,3	19,3
IPE 160	15,8	160	82	869	109	124	9,66	16,7	26,1
IPE 180	18,8	180	91	1317	146	166	11,3	22,2	34,6
IPE 200	22,4	200	100	1943	194	221	14,0	28,5	44,6
IPE 220	26,2	220	110	2772	252	285	15,9	37,3	58,1
IPE 240	30,7	240	120	3892	324	367	19,1	47,3	73,9
IPE 270	36,1	270	135	5790	429	484	22,1	62,2	97,0
IPE 300	42,2	300	150	8356	557	628	25,7	80,5	125
IPE 330	49,1	330	160	11770	713	804	30,8	98,5	154
IPE 360	57,1	360	170	16270	904	1019	35,1	123	191
IPE 400	66,3	400	180	23130	1160	1307	42,7	146	229
IPE 450	77,6	450	190	33740	1500	1702	50,9	176	276
IPE 500	90,7	500	200	48200	1930	2194	59,9	214	336
IPE 550	106	550	210	67120	2440	2787	72,3	254	401
IPE 600	122	600	220	92080	3070	3512	83,8	308	486

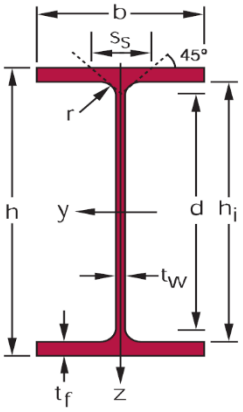


Figure 9 - Extrait du catalogue section métallique.

Questions 20 : Le configurateur en ligne SAVE-Construction permet de créer des profils environnementaux personnalisés (tableaux d'indicateurs environnementaux) à partir de Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES). La FDES de la section IPE 500 mentionne les informations ci-dessous **Unité fonctionnelle : 1 mètre.** Calculer les émissions de GES CO_2.eq pour cette variante métallique.

Indicateurs d'impact / de flux	Unité	Étape de production	Étape de construction	Étape d'utilisation	Étape de fin de vie	Total cycle de vie	Bénéfices et charges au-delà des frontières du système
Changement climatique - Total	kg CO2 éq./UF	151	9,67	0	6,09	167	-43,4

Figure 10 - Extrait de la FDES d'un IPE 500 En conformité avec la norme NF EN 15804+A2:2019 et son complément national NF EN 15804+A2/CN:2022. FDES générée avec le configurateur en ligne SAVE, version 2.4.

Questions 21 : Nous nous focalisons sur une poutre en bois lamellé-collé (matériau adapté aux charpentes d'ouvrages d'envergure). A partir d'un critère de contrainte de résistance en flexion simple en négligeant le poids propre de ladite poutre, déterminer le module de flexion minimal, désigné $W_{min} = I/(h/2)$. La résistance de la poutre en bois sera calculée en conformité selon l'Eurocode 5 telle que :

$$f_{md} = 0{,}8\frac{f_{m,k}}{1{,}25} \; ; \; f_{m,k} = 28\ MPa$$

Questions 22 : Les sections commerciales des poutres en bois lamellé collée permettre de considérer des sections rectangulaires de largeur égale à 240 mm. Calculer la hauteur minimale pour valider la résistance en flexion simple.

Questions 23 : Le configurateur en ligne DE-BOIS permet de créer des profils environnementaux personnalisés (tableaux d'indicateurs environnementaux) à partir de Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES). La FDES d'une poutre en bois lamellé collé avec fixation mentionne les informations ci-dessous **Unité fonctionnelle : 1 mètre cube**. Calculer les émissions de GES CO_2.eq pour cette variante en bois.

Agrégation des différents modules pour réaliser un « Total d'étape » ou « Total Cycle de vie »							
		Etape de production	Etape de construction	Etape d'utilisation	Etape de fin de vie	Total cycle de vie	Bénéfices et charges au-delà des frontières du système
INDICATEURS D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE RÉFÉRENCE							
Changement climatique - total	*kg CO_2 éq. / UF*	-5,28E+02	5,48E+01	0,00E+00	7,52E+02	2,79E+02	-2,45E+02

Figure 11 - Extrait de la FDES d'un élément porteur en bois lamellé-collé avec fixation, fabriqué en France En conformité avec la norme NF EN 15804+A2 et son complément national NF EN 15804+A2/CN. FDES générée avec le configurateur en ligne DE BOIS, version 1,1

Partie 4 : Du matériau à l'ouvrage : peut-on réduire les émissions en utilisant moins de béton ?

Dans un dernier temps, nous considérons un projet de construction d'une résidence neuve de 25 logements locatifs. En phase projet, les études techniques préliminaires propose une solution de fondation semi-profonde (en conformité avec les capacités géotechniques du site). La Figure 12 présente les caractéristiques de cette proposition.

Désignation	Quantité	Unités	Commentaires
Longrines	64,7	m^3	Un m^3 de semelle filante de dimensions 0,4 x 0,8m, en béton C25/30 XC1 CEM II/A-L ou LL
Armature des longrines	4 529	kg	Acier de ferraillage (70 kg/m^3 de longrine)
Semelles isolées	87,7	m^3	Un m^3 de semelle filante de dimensions 0,6 x 0,8m x 0,4m, en béton C25/30 XC2 CEM II/A-L ou LL
Armatures des semelles isolées (+15 kg/m3)	1 315	kg	Acier de ferraillage (15 kg/m^3 de semelle)
Gros béton sous puits et massifs	241,2	m^3	C30/37 XA1 CEM III/B, sans armature

Figure 12 - Fondation version 1 avec solution sur puit en phase projet.

Suite à des optimisations structurales, le bureau d'étude structure propose une variante de fondation à partir de micro pieux. La Figure 13 présente les nouvelles quantités de matériaux nécessaire à reprendre les charges du bâtiment.

Désignation	Quantité	Unités	Commentaires
Pieux	2201,6	ml	Pieux typique de diamètre 0,1 m, en béton C25/30 XC1 CEM II/A-L ou LL, CEM II/A-P
Armature de pieux	1 037	kg	Acier de ferraillage (60 kg/m^3 de longrine)

Massifs sur pieux	23,7	m³	Béton C30/37 XA1 CEM III/B
Armature des massifs de pieux	3 555	kg	Hypothèse 150 kg/m³ de massif

Figure 13 - Fondation version 2 en phase exécution

Questions 24 : Pour chacune des variantes de fondations proposées, calculer les émissions de CO_2 éq. Vous prendrez en considération les mêmes hypothèses de formulation que la partie 2 pour le béton C25/30 XC1 ou XC2 CEM II/A-L ou LL, CEM II/A-P. Pour le béton C30/37 XA1 CEM III/B :

- Sa FEDS mentionne une émission de 330 kg.CO_2.eq/tonne.
- Teneur en en liant total 16,0 %,
- Teneur en granulat total 75,0 %,
- Teneur en granulat recyclé (0%),
- Vous négligerez les émissions de GES de la part de l'eau et des adjuvants,
- Masse volumique du béton étudié 2 334 kg/m³.

Conclure.

Une évaluation environnementale pertinente doit donc prendre en compte à la fois les **performances du matériau**, les **quantités mises en œuvre** et les **autres impacts environnementaux**. Cette logique conduit progressivement d'une approche « matériau bas carbone » vers une approche de **conception soutenable de l'ouvrage**.

Plusieurs niveaux d'actions existent :

Niveau 1 – Le matériau	Réduire la teneur en clinker	Réduire le dosage en ciment	Utiliser des granulats recyclés	Optimiser la formulation
Niveau 2 – La conception	Optimiser les sections	Réduire les volumes de béton	Optimiser les portées et les systèmes structuraux	Éviter les surdimensionnements
Niveau 3 – L'ouvrage	Prolonger la durée de vie	Favoriser la maintenance et la réparabilité	Envisager le réemploi ou la réutilisation	Limiter les besoins de construction neuve et recourir à la réhabilitation

Bibliographie

[1] Infociment, «Composition et fabrication des ciments courants,» 08 2026. [En ligne]. Available: https://www.infociments.fr/composition-et-fabrication-des-ciments-courants. [Accès le 09 2026].

[2] E. Gartner, «Industrially interesting approaches to ''low-CO2'' cements,» *Cement and Concrete Research,* vol. 34, pp. 1489-1498, 2004.

[3] P. GUIRAUD, «Norme ciment NF EN 197-1 : Constituants des ciments,» 12 2020. [En ligne]. Available: https://www.infociments.fr/ciments/norme-ciment-nf-en-197-1-constituants-des-ciments. [Accès le 09 2026].

[4] F. CIMENT, «CEM I – EN VRAC Ciment courant Francçais,» 05 2025. [En ligne]. Available: https://www.infociments.fr/sites/default/files/articles/pdf/2025_05_15_ICV_FRANCE%20CIMENT_CEM%20I_v4.2.pdf. [Accès le 09 2026].

[5] I. Ciment, «CEM II/A-L & A-P – EN VRAC,» 09 2025. [En ligne]. Available: https://www.infociments.fr/sites/default/files/articles/pdf/2025_06_10_ICV_FRANCE%20CIMENT_CEM%20II%20A-L%20%26%20A-P_v4.2.pdf. [Accès le 09 2026].

[6] F. Ciment, «Infociment,» 05 2025. [En ligne]. Available: https://www.infociments.fr/sites/default/files/articles/pdf/2025_05_15_ICV_FRANCE%20CIMENT_CEM%20II%20B-M%20%26%20B-S_v4.2.pdf. [Accès le 09 2026].

[7] T. D. M. S. A. Feraille, «L'ACV dans le domaine de la construction : le cas du matériau béton,» *AJCE,* vol. 40, 2022.

[8] ADEME, «Base Empreinte,» [En ligne]. [Accès le 2026].

[9] «Base INIES,» [En ligne]. Available: https://base-inies.fr/consultation/infos-produit/39267. [Accès le 10 2026].