

u^b

b
UNIVERSITÄT
BERN



MATÉRIAUX DE DÉCONSTRUCTION - Potentiel de valorisation des fractions fines comme matière première neutre en CO₂ dans la production de clinker et teneur en PFAS

Centre de compétences des ressources secondaires, Institut de géologie, Université de Berne

Sur mandat de la Wyss Academy for Nature, de l'office fédéral de l'environnement (OFEV), de l'Office des déchets, de l'eau, de l'énergie et de l'air du canton ZH (AWEL) et du cercle déchets (CD).

Berne, 23. décembre 2024



Impressum

Mandat

Wyss Academy for Nature
Office fédéral de l'environnement OFEV, Division Déchets et matières premières
Canton de Zurich, Office des déchets, de l'eau, de l'énergie et de l'air
Cercle déchets

Mandataire

Centre de compétences des ressources secondaires, Institut de géologie, Université de Berne

Rédaction du rapport

Mirjam Wolffers	Centre de compétences des ressources secondaires, Cheffe de projet
Ilona Bosoppi	Centre de compétences des ressources secondaires

Expert

Urs Eggenberger	Centre de compétences des ressources secondaires
-----------------	--

Essais et analyses

Centre de compétences des ressources secondaires
Bachema AG

Groupe d'accompagnement

Dominik Oetiker	Office des déchets, des eaux, des énergies et de l'air, Section gestion des déchets
Martin Moser	cercle déchets
David Hiltbrunner	OFEV, Division Déchets et matières premières
Yann Huet	Matériaux de construction circulaires Suisse

Remarque :

Cette étude a été rédigée sur mandat de la Wyss Academy for Nature, de l'office fédéral de l'environnement (OFEV), de l'Office des déchets, de l'eau, de l'énergie et de l'air du canton ZH (AWEL) et du cercle déchets (CD). Le mandataire est seul responsable de son contenu.

Table des matières

1	Contexte et objectifs de l'étude	3
2	Prélèvement et préparation des échantillons.....	4
2.1	Aperçu des sites échantillonnés	4
2.2	Prélèvement d'échantillons	5
2.3	Points de prélèvement.....	6
2.4	Préparation des échantillon.....	8
2.5	Analyse.....	8
3	Résultats	9
3.1	Flux de masse et canaux de distribution.....	9
3.2	Composition chimique	11
3.3	Composition minéralogique.....	15
3.4	Polluants organiques dans la fraction fines des granulés mixtes	16
4	Évaluation du potentiel de valorisation en cimenterie	22
4.1	Valorisation en tant que substitut de matière première	22
4.2	Potentiel en tant que matériau neutre en CO ₂	24
4.3	Valorisation en tant qu'agent de mouture	26
5	Résumé	26
6	Conclusion et perspectives.....	27
7	Références	28

1 Contexte et objectifs de l'étude

En Suisse, plus de 17 millions de tonnes de matériaux minéraux de déconstruction sont générés chaque année, traités dans des installations de valorisation et, dans la mesure du possible, recyclés comme granulats secondaires dans la construction. Le taux de traitement et de valorisation des matériaux de déconstruction varie fortement d'une région à l'autre, en fonction de la disponibilité, du coûts des ressources primaires et du volume des décharges. Le terme de matériaux de déconstruction englobe les catégories suivantes : enrobé bitumineux, coffre de routes, béton et déchets non triés de démolition (tuiles cassées et autres déchets de construction minéraux tels que le plâtre, la céramique ou le verre (Office fédéral de l'environnement OFEV, 2023). Dans cette étude, l'accent est mis sur les matériaux de déconstruction que sont les déchets de béton et les déchets non triés. En raison de l'adhérence de la pâte de ciment aux granulats et de l'hypothèse selon laquelle celle-ci s'accumule dans la fraction fine lors du concassage, les granulats de béton et de non trié pourraient constituer des matières premières prometteuses neutres en CO₂ dans la production de clinker.

Les matières premières neutres en CO₂ sont des matériaux qui, au moment de leur production, sont largement exempts de CO₂, mais qui, pendant leur utilisation, leur stockage et leur transformation en matières premières secondaires, fixent à court terme le CO₂ de l'air (Wolffers et al., 2023). Le CO₂ capté à court terme, qui est à nouveau expulsé lors de la production de clinker, ne contribue pas à l'effet de serre et peut être considéré comme neutre pour le climat (Figure 1). D'un point de vue scientifique, l'utilisation de matières premières neutres en CO₂ pour remplacer le calcaire dans la production de clinker présente un grand potentiel pour réduire durablement le bilan CO₂ du ciment. Cependant, le CO₂ lié à court terme, neutre pour le climat, ne peut pas encore être pris en compte dans la production de clinker du côté des matières premières. Leur comptabilisation serait pourtant un grand moteur pour la valorisation de matières premières neutres en CO₂ (surtout des matériaux de déconstruction et des résidus d'incinération).

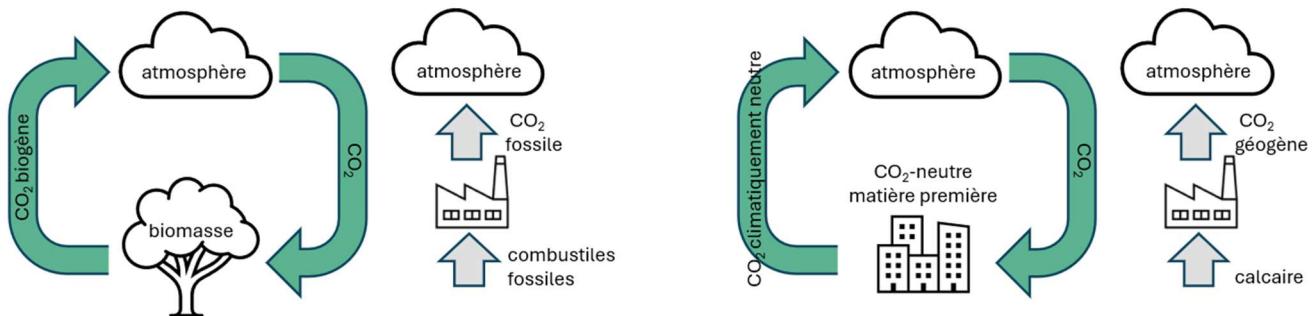


Figure 1: Comme pour les combustibles biogènes utilisés pour la production de clinker (à gauche), l'utilisation de matières premières neutres en CO₂ émettrait du CO₂ lié à court terme dans l'atmosphère, qui peut être considéré comme climatiquement neutre puisqu'il ne contribue pas à l'effet de serre. Une substitution partielle systématique de la pierre calcaire par des matériaux bruts neutres en CO₂ permettrait donc de réduire les émissions de CO₂ géogène dans l'atmosphère, qui contribuent à l'effet de serre.

Les quantités de béton de démolition produites aujourd'hui sont estimées à environ 5 millions de tonnes (Hiltbrunner, 2017). Les quantités indiquées sont des chiffres modélisés qui sont liés à une incertitude. Le béton de démolition est transformé en granulats de béton et les granulats de béton produits sont principalement utilisés sous forme liée, comme granulats recyclés, ou sous forme non liée, comme gravier recyclé dans la construction routière. Selon des estimations, le taux de recyclage des déchets de béton est d'environ 85% (Matasci et al., 2019). Des entretiens avec des producteurs de béton ont montré que la fraction fine de 0 à 4 mm des granulats de béton est utilisée comme filler dans le béton, mais que sa forte capacité d'absorption d'eau, due à la pâte de ciment adhérente, a un effet négatif sur la production.

La quantité de déchets de démolition non tirés produite chaque année est estimée à environ 2,4 millions de tonnes (Rubli, 2020). Plus de 70% de cette quantité est acheminée vers des installations de traitement pour la production de granulats mixtes. Les granulats mixtes produits sont soit utilisés sous forme liée

comme granulats recyclés dans du béton de construction, du béton maigre ou du béton projeté, soit, de plus en plus, comme agent de mouture dans la production de ciment. Le module «Valorisation des matériaux de déconstruction minéraux» (Office fédéral de l'environnement OFEV, 2023) exige, lors de la production de granulats mixtes destinés à des applications non liées, un pré-criblage de la fraction fine de 0 à 8 mm en cas de traitement à sec pour une utilisation non liée. La fraction fine tamisée doit être valorisée ou éliminée conformément aux dispositions de l'ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets (ordonnance sur les déchets, OLED).

Comme la base de données sur les qualités matérielles des fractions fines des granulats de béton et des granulats mixtes est très limitée, cette étude a pour but de relever les qualités matérielles des fractions fines des granulats de béton (0 à 4 mm) et des granulats mixtes (0 à 8 mm) et d'examiner leur potentiel de valorisation comme substitut de matière première en cimenterie. En ce qui concerne les granulats mixtes, l'objectif initial de cette étude était d'échantillonner les qualités matérielles du pré-criblage. Mais comme celui-ci n'est pas séparé par criblage sur les sites visités, c'est la fraction fine 0 à 8 mm des granulats mixtes qui a été échantillonnée, car elle contient le pré-criblage. Les données obtenues constituent en outre une base importante pour évaluer le potentiel de pollution en cas de mise en décharge.

L'étude s'inscrit dans le projet de recherche pluriannuel «Ersatzrohstoffe in der Kreislaufwirtschaft» (matières premières de substitution dans l'économie circulaire) de la Wyss-Academy for Nature de l'Université de Berne, dans le cadre duquel les qualités matérielles et le potentiel de valorisation de divers déchets minéraux de Suisse sont examinés.

2 Prélèvement et préparation des échantillons

2.1 Aperçu des sites échantillonnés

Pour l'étude, 18 installations ont été visitées dans toute la Suisse, leur répartition géographique est représentée sur la Figure 2. Il s'agit d'installations avec des systèmes de concassage mobiles, qui sont parfois équipées d'une infrastructure supplémentaire pour le traitement par voie humide (installation de lavage, installation de flottement). Les détails concernant les sites des installations en termes de taille et d'infrastructure de traitement supplémentaire sont présentés dans le Tableau 1.

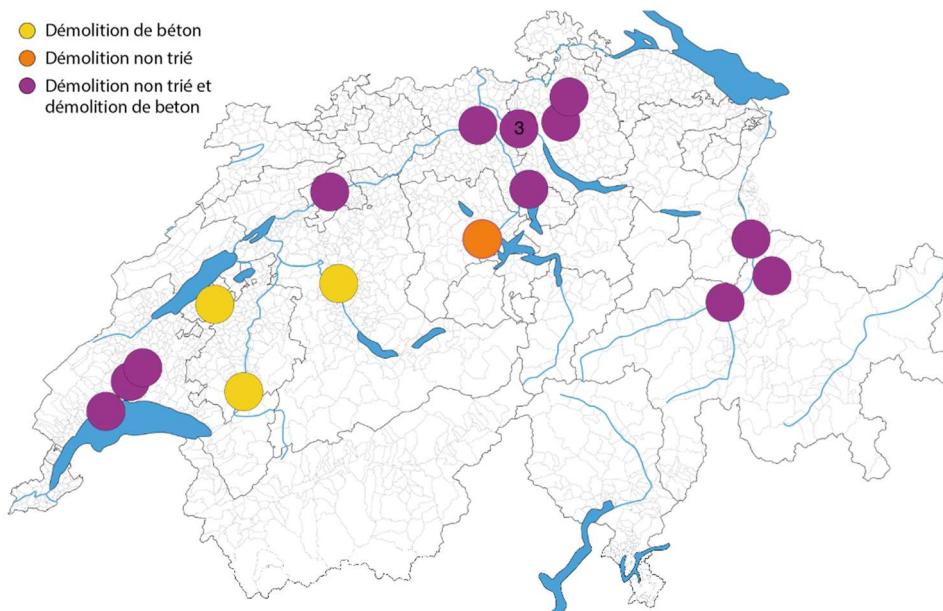


Figure 2: Aperçu de la répartition régionale des installations échantillonnées. Dans la région de Zurich, 3 installations échantillonnées se situent dans la même région géographique (indiqué par le chiffre 3). La couleur des cercles indique les sites sur lesquels les échantillons ont été prélevés. Cercles jaunes : Échantillonnage de granulats de béton ; cercles orange : Échantillonnage de granulats mixtes ; cercles violets : Échantillonnage de granulés de béton et de granulés mixtes.

Tableau 1: Liste des installations avec indication de la taille de l'installation : petite installation <40'000 t/an, installation moyenne 40-80'000 t/an, grande installation > 80'000 t/an de béton de démolition ou de démolition non trié traitée.

N° d'installa-tion	Taille de l'installation		Remarques
	Démolition mixte (t/an)	Démolition du béton (t/an)	
1	Petite	Moyenne	
2	Petite	Petite	
3	Pas de données	Petite	
4	Petite	Petite	
5	Petite	Moyenne	Dispose d'un système de flottaison
6	Petite	Petite	
7	-	Petite	
8	Petite	Petite	Le pré-tamisage est traité dans une installation de lavage
9	Petite	Petite	
10	Moyenne	Moyenne	Le pré-tamisage est traité dans une installation de lavage
11	Moyenne	-	Dispose d'un système de flottaison
12	Moyenne	Moyenne	
13	-	Petite	
14	Moyenne	Grande	
15	Petite	Petite	Le pré-tamisage est traité dans une installation de lavage
16	Petite	Moyenne	Le pré-tamisage est traité dans une installation de lavage
17	Moyenne	Petite	Les déchets de démolition mixtes sont traités dans une installation de lavage
18	-	Moyenne	

2.2 Prélèvement d'échantillons

Les échantillons ont été prélevés entre mars et mai 2023, après avoir été mélangés au préalable par une chargeuse sur pneus. Environ 30 incrément de 5 kg chacun ont été mélangés pour former un échantillon global (Figure 3). Après homogénéisation de l'échantillon global, la fraction fine (granulats mixtes 0 – 8 mm, granulats de béton 0 – 4 mm) a été tamisée à travers un crible de sable et les fractions respectives ont été pesées. Un sous-échantillon représentatif d'environ 25 kg a été prélevé sur la fraction fine.



Figure 3: Photo du prélèvement d'échantillons.

2.3 Points de prélèvement

Les sites échantillonnés disposent pour la plupart d'une installation de traitement à sec pour la fabrication de granulats de béton et mixtes. Pour le traitement à sec, on utilise des installations de concassage et de criblage mobiles, tandis que le traitement par voie humide des déchets de démolition mixtes se fait dans des installations de lavage stationnaires, surtout sur les grands sites. Les étapes du processus de traitement des déchets de béton et de démolition non trié dans des installations mobiles de concassage et de criblage sont représentées schématiquement dans la Figure 4. Les points d'échantillonnage choisis pour cette étude sont marqués en vert.

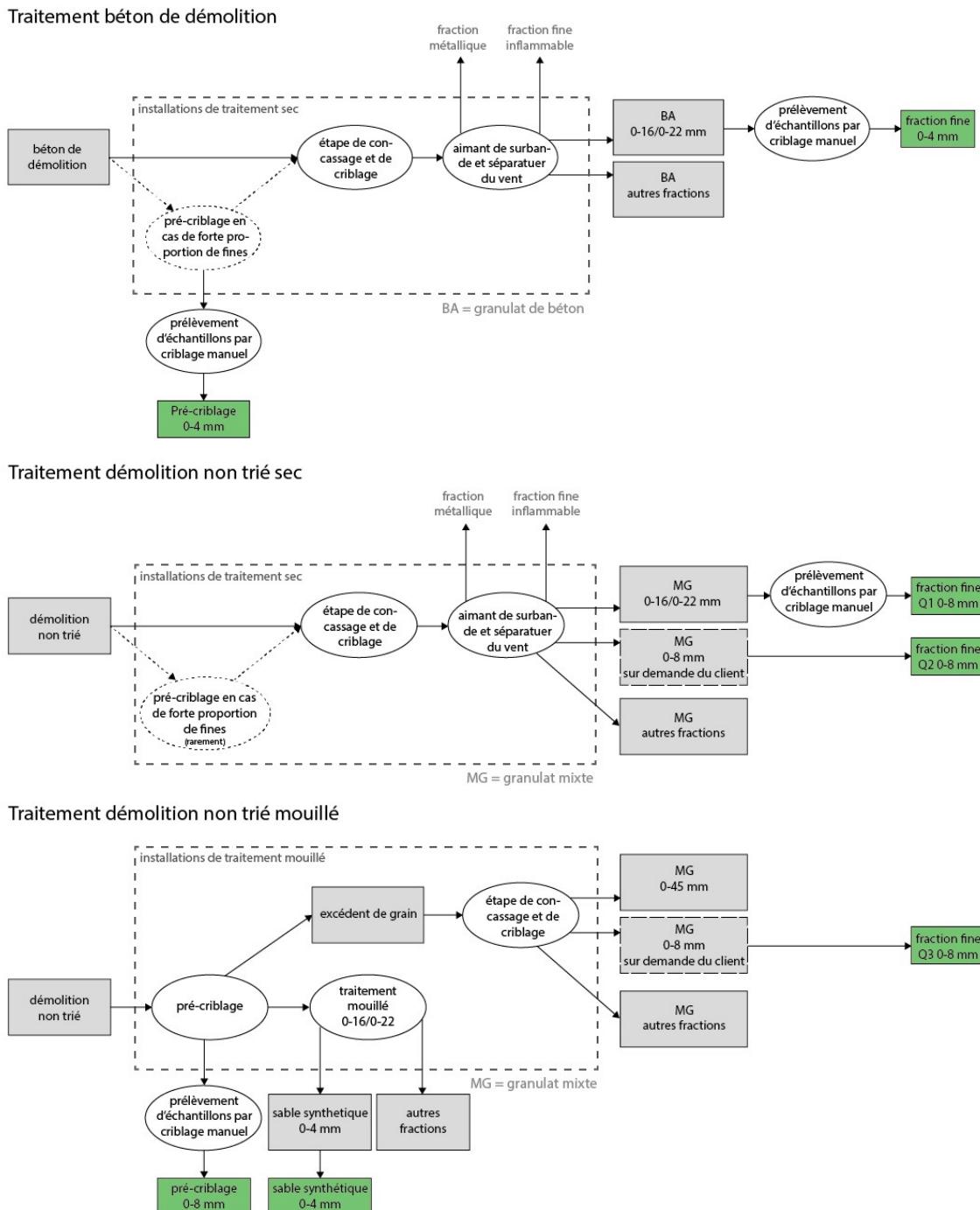


Figure 4: Représentation schématique des étapes du processus de traitement à sec de béton et de démolition non trié dans des installations de concassage et de criblage mobiles. Les points d'échantillonnage choisis pour cette étude sont marqués en vert.

Les différences entre les types d'échantillons sont expliquées dans le Tableau 2. L'intérêt principal de cette étude s'est porté sur les types d'échantillons fraction fine de granulat de béton 0 – 4 mm et fraction fine de granulat mixte 0 – 8 mm (qualité 1 (Q1)). Cependant, des échantillons isolés des autres types d'échantillons ont été prélevés à des fins de comparaison qualitative, car les fines de granulat mixtes de qualité 2 (Q2) et 3 (Q3) sont déjà utilisées dans le processus de fabrication du ciment en tant qu'agent de mouture. Un aperçu des échantillons prélevés se trouve dans le Tableau 3 (granulats mélangés) et le Tableau 4 (granulats de béton).

Tableau 2: Explication des caractéristiques des différents types d'échantillons.

Type d'échantillon	Explication
Béton de démolition Pré-criblage 0-4 mm	Pré-criblage avant les étapes de concassage et de criblage, se produit avant le processus de valorisation
Granulats de béton Fraction fine 0-4 mm	Fraction tamisée du matériau concassé, obtenue après le processus de valorisation
Démolition non trié Pré-criblage 0-8 mm	Pré-tamisage avant le traitement humide, se produit avant le processus de valorisation
Granulats mixtes Fraction fine 0-8 mm – Q1	Fraction tamisée du matériau concassé à 0-16/0-22, obtenue après le processus de traitement
Granulats mixtes Fraction fine 0-8 mm – Q2	Fraction des matériaux concassés à 0-8, obtenue après le processus de valorisation
Granulats mixtes Fraction fine 0-8 mm – Q3	Fraction du refus de voie humide concassé à 0-8, obtenu après le processus de valorisation
Sable synthétique 0-4 mm	Sable de granulat mixte issu d'un traitement par voie humide

Tableau 3: Liste d'échantillons de granulats mixtes classés par type d'échantillon.

N° d'installa- tion	Code de l'échantillon	Fraction produite par l'installation	Fraction échantil- lonnée	Échantillonnage	Analyse pol- luants orga- niques
Pré-tamisage avant traitement par voie humide					
8	RC-M 8.1	0-16	0-8	représentatif	1
10	RC-M 10.1	0-22	0-8	Échantillon	1
15	RC-M 15.1	0-22	0-8	Échantillon	1
16	RC-M 16.1	0-22	0-8	représentatif	1
Granulats mixtes Fraction fine 0-8 mm – Q1					
1	RC-M 1.1	0-16	0-8	représentatif	1
2	RC-M 2.1	0-22	0-8	représentatif	1
2	RC-M 2.2	0-4	0-4	Échantillon	-
4	RC-M 4.1	0-22	0-8	représentatif	1
5	RC-M 5.1	0-22	0-8	représentatif	1
5	RC-M 5.2	0-16	0-8	représentatif	1
6	RC-M 6.1	0-22	0-8	représentatif	1
9	RC-M 9.1	0-22	0-8	représentatif	1
11	RC-M 11.1	0-22	0-8	représentatif	1
12	RC-M 12.1	0-22	0-8	représentatif	1
12	RC-M 12.2	0-4	0-4	Échantillon	1
14	RC-M 14.1	0-16	0-8	représentatif	1
17	RC-M 17.1	0-16	0-8	représentatif	1
Granulats mixtes Fraction fine 0-8 mm – Q2					
4	RC-M 4.3	0-8	0-8	Échantillon	1
9	RC-M 9.2	0-8	0-8	Échantillon	1
10	RC-M 10.2	0-8	0-8	Échantillon	1
15	RC-M 15.2	0-8	0-8	Échantillon	1
Granulats mixtes Fraction fine 0-8 mm – Q3					
8	RC-M 8.2	0-8	0-8	Échantillon	-
11	RC-M 11.2	0-8	0-8	représentatif	-
Sable de granulats mixte 0-4 mm provenant d'un traitement par voie humide					
3	RC-M 3.1	0-4	0-4	Échantillon	-
15	RC-M 15.3	0-4	0-4	Échantillon	-
17	RC-M 17.2	0-4	0-4	Échantillon	-

Tableau 4: Liste d'échantillons de granulats de béton, classés par type d'échantillon.

N° d'installa-tion	Code de l'échan-tillon	Fraction produite l'ins-tallation	Fraction échantil-lonnée	Échantillon-nage	Analyse polluants orga-niques
Pré-criblage (séparation des fines en cas de forte teneur en fines)					
10	RC-B 10.1	0-22	0-4	Échantillon	-
Granulats de béton Fraction fine 0-4 mm					
1	RC-B 1.1	0-16	0-4	représentatif	-
2	RC-B 2.1	0-16	0-4	représentatif	-
3	RC-B 3.1	0-22	0-4	Échantillon	-
4	RC-B 4.1	0-22	0-4	représentatif	-
5	RC-B 5.1	0-8	0-4	représentatif	-
5	RC-B 5.2	0-4	0-4	représentatif	-
6	RC-B 6.1	0-22	0-4	représentatif	-
7	RC-B 7.1	0-16	0-4	représentatif	-
8	RC-B 8.1	0-16	0-4	représentatif	-
9	RC-B 9.1	0-22	0-4	représentatif	-
12	RC-B 12.1	0-22	0-4	représentatif	-
13	RC-B 13.1	0-30	0-4	représentatif	-
14	RC-B 14.1	0-22	0-4	représentatif	-
15	RC-B 15.1	0-22	0-4	Échantillon	-
16	RC-B 16.1	0-22	0-4	représentatif	-
16	RC-B 16.2	0-4	0-4	représentatif	-
17	RC-B 17.1	0-16	0-4	représentatif	-
18	RC-B 18.1	0-16	0-4	Échantillon	-

2.4 Préparation des échantillon

Les échantillons de fractions fines ont été séchés en laboratoire à 40 °C, divisés et concassés à environ 2 mm. L'échantillon concassé a été divisé en un échantillon d'analyse et un échantillon de réserve dans le diviseur d'échantillons rotatif. L'échantillon d'analyse a été broyé à <100 µm dans un broyeur vibrant à disques.

Pour l'analyse chimique, une aliquote de l'échantillon broyé a été séchée à 105 °C et conditionnée en pastilles de verre et de poudre. Pour l'analyse des éléments principaux, des pastilles de verre ont été préparées avec de l'échantillon recuit (950 °C) dans un rapport 1 :10 avec du flux (PANalytical C-0640-70; LiT/LiM/LiI = 67/33/0.5) dans le four Katanax-P1. Pour l'analyse des éléments traces, l'échantillon séché (105 °C) a été homogénéisé dans un rapport de 1 :4 avec de la cire Cereox dans un mortier en agate et pressé en pastilles de poudre à l'aide d'une presse hydraulique (Specac Atlas Autotouch 25T) à une pression de 16 tonnes.

Pour l'analyse minéralogique, l'échantillon a été broyé et homogénéisé dans un rapport 1 :5 avec du corindon (Al_2O_3) standard interne, sans ajout d'éthanol, dans un broyeur spécial (Retsch XRD McCrone) jusqu'à <5 µm. Les échantillons ont ensuite été analysés dans des conditions de laboratoire.

Pour l'analyse des polluants organiques, des échantillons partiels représentatifs ont été envoyés au laboratoire d'analyse Bachema. Les échantillons broyés ont été préparés conformément à l'aide à l'exécution de l'OLED «Méthodes de mesure dans le domaine des déchets et des sites pollués». Pour l'indice d'hydrocarbures $C_{10}-C_{40}$ et les hydrocarbures aromatique polycycliques (HAP), l'échantillon a été extrait avec un solvant approprié. Pour l'analyse du carbone organique (COT400), aucune préparation supplémentaire de l'échantillon n'a été nécessaire.

2.5 Analyse

La composition chimique a été réalisée par fluorescence X (XRF) avec le spectromètre PANalytical Zetium à dispersion de longueur d'onde (WD-XRF) à l'Institut des sciences de la Terre de l'Université de Fribourg. Pour l'analyse quantitative des éléments principaux, les étalonnages PANalytical WROXI sur pastilles de

verre ont été utilisés. Pour l'analyse quantitative des éléments traces, on a utilisé l'étalonnage Panalytical ProTrace sur des pastilles de poudre.

La composition minéralogique a été déterminée par diffraction des rayons X (XRD) avec un diffractomètre PANalytical EMPYREAN (rayonnement CuK α). Les mesures ont été effectuées sur des échantillon désorientés de 5 à 75° 2Theta à 40 kV / 40 mA (fente de divergence fixe). Le logiciel HighScorePlus v.4.9. de PANalytical a été utilisé pour la quantification (Rietveld pour l'affinement).

3 Résultats

3.1 Flux de masse et canaux de distribution

3.1.1 Parts de masse des fractions fine 0-4 mm (granulat de béton) et 0-8 mm (granulat mixte)

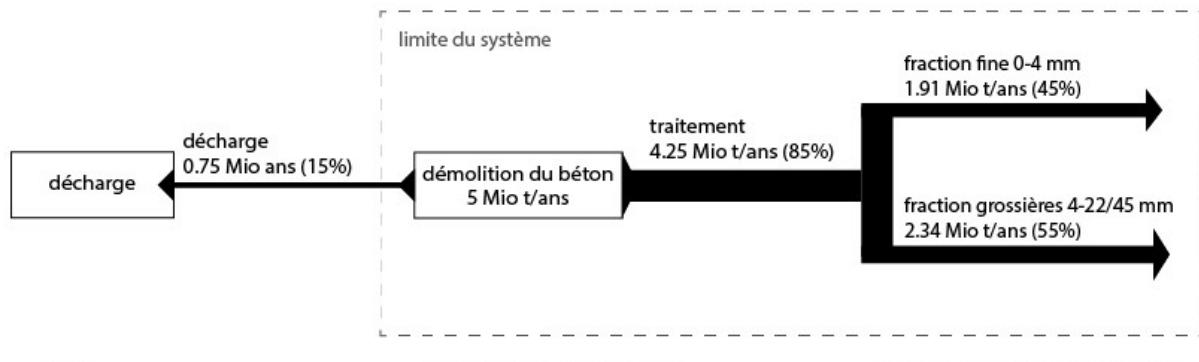
Une évaluation des proportions pondérées des fractions fines des granulats de béton et des granulats mixtes (tamisés après concassage à 0 – 16/22) est présentée dans le Tableau 5. La proportion de la fraction fine 0 - 4 mm des granulats de béton est en moyenne d'environ 45% en poids, tandis que la proportion de la fraction fine 0 - 8 mm des granulats mixtes est d'environ 60% en poids. Les valeurs approximatives des champs correspondent bien aux courbes granulométriques existantes des différentes entreprises.

Tableau 5: Proportion calculées des fractions fines dans les granulats de béton et de mélange, par rapport à la fraction 0-16/22.

	Granulats de béton 0-4 mm	Granulats mixtes 0-8 mm
Valeur moyenne de la fraction massique (%)	44	58
Minimum de la fraction massique (%)	36	40
Maximum de la fraction massique (%)	60	69

3.1.2 Estimation des flux de la fraction fine de 0-4 mm de granulats de béton

Les quantités de béton de démolition générées aujourd'hui sont estimées à environ 5 millions de tonnes (Hiltbrunner, 2017). Selon les estimations de l'EMPA, le taux de recyclage des déchets de béton s'élève déjà à environ 85% (Matasci et al., 2019). Dans les installations échantillonnées, les granulats de béton sont concassés à 0 - 22 mm ou à 0 - 16 mm, selon l'installation. Par souci de simplification, ils sont regroupés sous 0 - 22 mm. Afin d'obtenir une valeur approximative de la quantité disponible de la fraction fine 0 - 4 mm de granulats de béton, on a estimé, en supposant que la proportion de 0 - 4 mm s'élève à environ 45% (Tableau 5), que la Suisse produit près de 2 millions de tonnes de fraction fine 0 - 4 mm provenant du traitement de béton de démolition (Figure 5). C'est une simplification, car il n'existe pas de données indiquant que les autres batch de production (par ex. 0-45 mm) présentent également une fraction fine d'environ 45%. En réalité, le chiffre est probablement un peu plus bas, et cette hypothèse tend à surestimer la part des fines dans la fraction 0 - 45 mm.



Source:

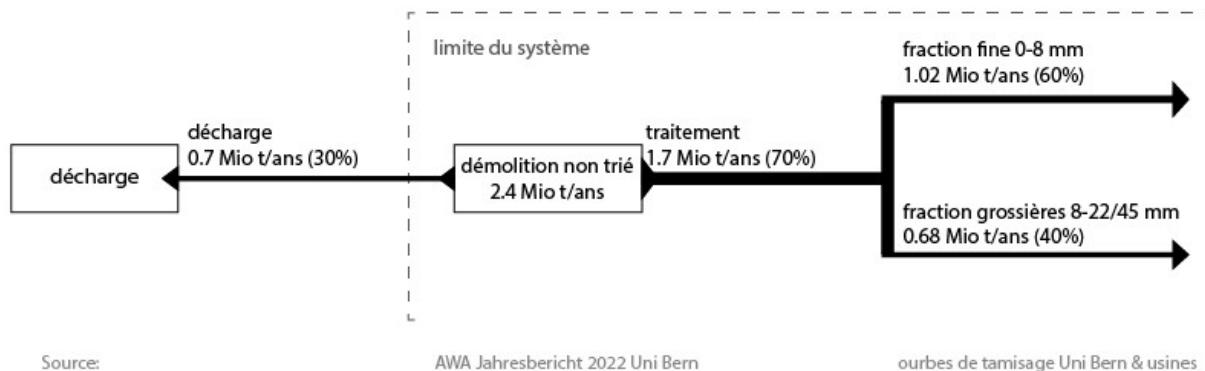
AWA Jahresbericht 2022 Uni Bern

courbes de tamisage Uni Bern & usines

Figure 5: Estimation approximative des flux massiques des fractions fines et grossières des granulats de béton.

3.1.3 Estimation des flux de fraction fine 0 - 8 mm de granulats mixtes

Chaque année, la Suisse génère environ 2,4 millions de tonnes de déchets de démolition non triés (Rubli, 2020). Plus de 70% de ces déchets (env. 1,7 million de tonnes) sont acheminés vers des installations de valorisation (Figure 6). Selon (Rubli, 2020), la part de la fraction fine <8 mm est comprise entre 25 et 40%. L'étude de Rubli et al. (2017) décrit pour la fraction de granulats mixtes 0 - 32 mm un pré-criblage de 35% de fraction fine (<8 mm). Après le concassage, on obtient à nouveau 25% de fines (<8 mm). Sans tamisage préalable, on obtient après le concassage une quantité totale de fines (<8 mm) de 60%. Pour les échantillons analysés dans cette étude (fraction 0 - 22 mm, sans pré-criblage), les fractions tamisées donnent également une proportion de fines (<8 mm) d'environ 60% (Tableau 5). En supposant, pour simplifier, que la fraction 0 - 45 mm, produite en lots, présente également une fraction fine d'environ 60%, il en résulte pour la Suisse une quantité annuelle de fraction fine 0 - 8 mm de granulats mixtes d'environ 1 million de tonnes.



Source:

AWA Jahresbericht 2022 Uni Bern

ourbes de tamisage Uni Bern & usines

Figure 6: Estimation approximative des flux massiques des fractions fines et grossières des granulats mixtes.

3.1.4 Canaux de distribution

Actuellement, une grande partie du béton de démolition disponible est utilisée pour la fabrication de béton, et la tendance est à la hausse. Certaines entreprises échantillonées ont indiqué que la quantité de béton de démolition produite dans certaines régions ne suffisait pas à couvrir les besoins en béton recyclé. Des entretiens avec les producteurs de béton ont montré que la fraction fine de 0 à 4 mm des granulats de béton est utilisée comme filler dans le béton, mais que la forte capacité d'absorption d'eau, due à l'adhérence de la pâte de ciment, a un effet négatif sur la production. En revanche, dans les usines qui carbonatent les granulats de béton, la fraction fine (généralement de 0 à 8 mm) est très demandée, car on lui attribue une plus grande capacité d'absorption du CO₂ en raison de sa plus grande surface spécifique. Il existe donc de fortes différences régionales liées aux installations et aux processus dans l'attractivité ou les voies de valorisation de la fraction fine des granulats de béton.

Les granulats mixtes sont moins demandés et plus disponibles sur le marché en tant que granulats recyclés pour le béton en raison de leur couleur voyante (fragments de briques rouges).

Une évaluation des quantités annuelles relevées dans le cadre des inspections annuelles de l'asr et de l'ASGB (2023) montre qu'environ 40% des granulats de béton préparés et environ 70% des granulats mixtes préparés sont valorisés sous forme liée (Tableau 6). La fraction 0 - 16/22 est souvent valorisée sous forme liée, alors que la fraction 0 - 45 est plutôt utilisée dans des applications non liées.

Tableau 6: Aperçu des quantités de granulats de béton et de granulats mixtes valorisés en utilisation liée et non liée (statistiques annuelles 2023 asr & ASGB; Les données des cantons VS, GE, NE, TI, AI, AR manquent).

	Utilisation non liée	Utilisation liée
Granulats de béton recyclés	1'926'944	1'364'628
Granulats mixtes recyclés	353'616	890'679

3.2 Composition chimique

La composition chimique (Figure 7, Tableau 7) de la fraction fine du granulat de béton (0 - 4 mm) se caractérise par les oxydes principaux SiO_2 (env. 25 - 35% en poids) et CaO (env. 20 - 35% en poids). Les composants secondaires sont principalement Al_2O_3 (env. 3 - 5% en poids) ainsi que Fe_2O_3 , MgO, K₂O et Na₂O (env. 1 - 2% en poids). La composition chimique de la fraction fine du granulat mixte (0 - 8 mm) est très similaire et se caractérise par les oxydes principaux SiO_2 (env. 40 - 45%) et CaO (env. 20 - 30% en poids). Contrairement aux granulats de béton, les granulats mixtes présentent une gamme plus étroite de composition chimique principale, avec des teneurs plus élevées en SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO et SO₃.

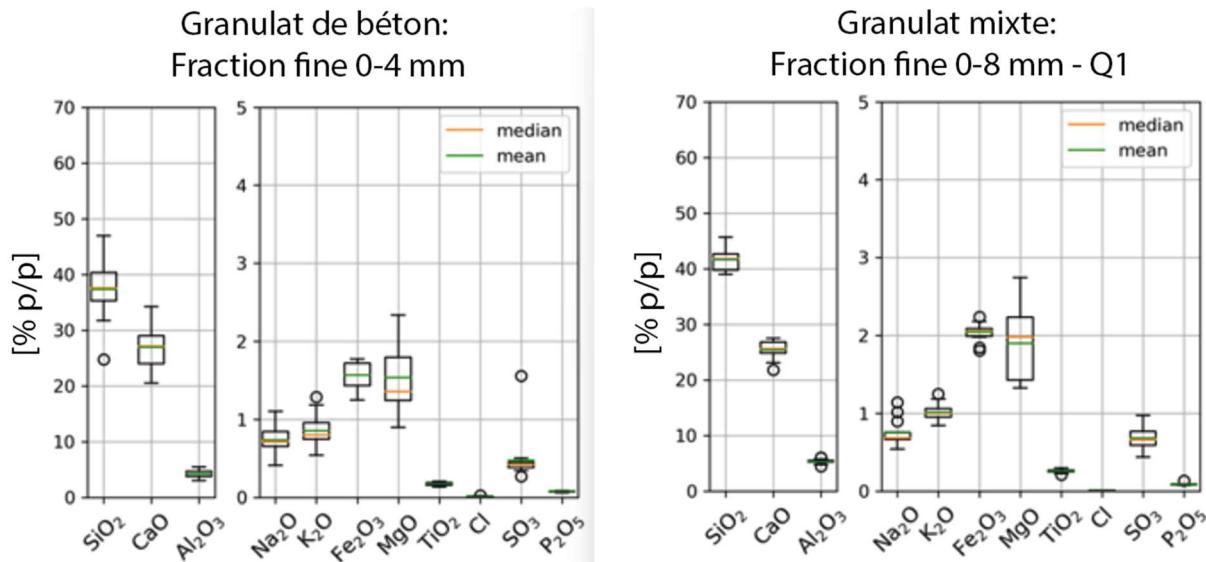


Figure 7: Composition chimique (éléments principaux) des granulats de béton et de mélange

Tableau 7: Teneurs principales en éléments dans les granulats de béton. Données en % massique.

N° d'ins-tallation	Code de l'échantil-lon	LOI	Al2O3	CaO	Cr2O3	Fe2O3	K2O	MgO	Mn3O4	Na2O	P2O5	SO3	SiO2	TiO2
Pré-criblage (séparatopm des fines en cas de forte teneur en fines)														
10	RC-B 10.1	21.46	4.64	23.59	0.01	1.96	0.82	1.91	0.06	0.69	0.08	0.43	36.16	0.20
Granulats de béton fraction fine 0-4 mm														
1	RC-B 1.1	20.08	4.56	23.66	0.01	1.49	0.96	1.18	0.05	0.88	0.07	0.34	36.30	0.17
2	RC-B 2.1	20.71	4.11	26.68	0.00	1.73	0.79	2.20	0.06	0.70	0.08	0.50	42.21	0.20
3	RC-B 3.1	17.54	4.90	23.45	0.00	1.75	1.18	1.40	0.05	0.75	0.07	1.56	46.96	0.20
4	RC-B 4.1	21.12	3.68	23.20	< 0.001	1.44	0.74	1.21	0.04	0.65	0.06	0.38	36.71	0.15
5	RC-B 5.1	22.71	4.48	29.05	0.00	1.64	0.92	1.62	0.05	0.79	0.08	0.42	37.95	0.18
5	RC-B 5.2	22.05	3.83	25.58	< 0.001	1.42	0.79	1.23	0.04	0.68	0.08	0.42	33.24	0.14
6	RC-B 6.1	22.57	4.73	29.94	0.00	1.68	0.95	1.30	0.05	0.86	0.08	0.43	37.12	0.19
7	RC-B 7.1	26.77	2.97	34.17	0.01	1.25	0.54	1.27	0.05	0.49	0.06	0.34	31.69	0.13
7	RC-B 8.1	18.42	5.45	20.50	0.01	1.77	1.29	2.33	0.06	0.97	0.09	0.40	40.23	0.20
9	RC-B 9.1	22.26	3.50	24.79	< 0.001	1.43	0.67	1.52	0.04	0.59	0.07	0.41	33.10	0.15
12	RC-B 12.1	21.43	3.47	23.56	0.00	1.49	0.63	1.85	0.05	0.55	0.06	0.38	34.95	0.17
13	RC-B 13.1	22.83	4.18	25.51	0.01	1.39	0.91	1.14	0.05	0.77	0.08	0.27	36.15	0.16
14	RC-B 14.1	21.91	4.16	28.65	0.00	1.70	0.77	2.15	0.05	0.72	0.08	0.48	38.95	0.19
15	RC-B 15.1	27.82	3.03	31.69	0.00	1.40	0.54	1.62	0.05	0.41	0.07	0.47	24.77	0.13
16	RC-B 16.1	21.53	4.79	29.78	0.01	1.58	0.97	1.31	0.05	0.94	0.07	0.43	38.26	0.17
16	RC-B 16.2	19.26	5.45	27.45	0.01	1.77	1.12	1.31	0.06	1.10	0.07	0.38	41.67	0.20
17	RC-B 17.1	21.84	4.20	27.58	0.01	1.73	0.79	2.03	0.06	0.69	0.08	0.44	40.38	0.18
18	RC-B 18.1	21.05	4.16	28.87	< 0.001	1.55	0.80	0.90	0.04	0.71	0.08	0.45	40.73	0.16

Les différentes qualités de granulats mixtes ne présentent pas de grandes différences au niveau de la chimie principale (Figure 8). Les qualités 2 et 3 (Q2, Q3) ne se distinguent guère de la qualité 1 (Q1) sur le plan chimique. Le pré-criblage de la démolition non triée montre un rapport Ca:Si légèrement plus élevé en raison de teneurs en SiO_2 plus faibles. Le sable synthétique se caractérise par des teneurs en SiO_2 légèrement plus élevées, cela est probablement lié à l'absence de particules fines, qui ont tendance à être plus riches en CaO. Le pré-criblage du béton de démolition ne se distingue guère chimiquement de la fraction fine des granulats de béton 0 - 4 mm.

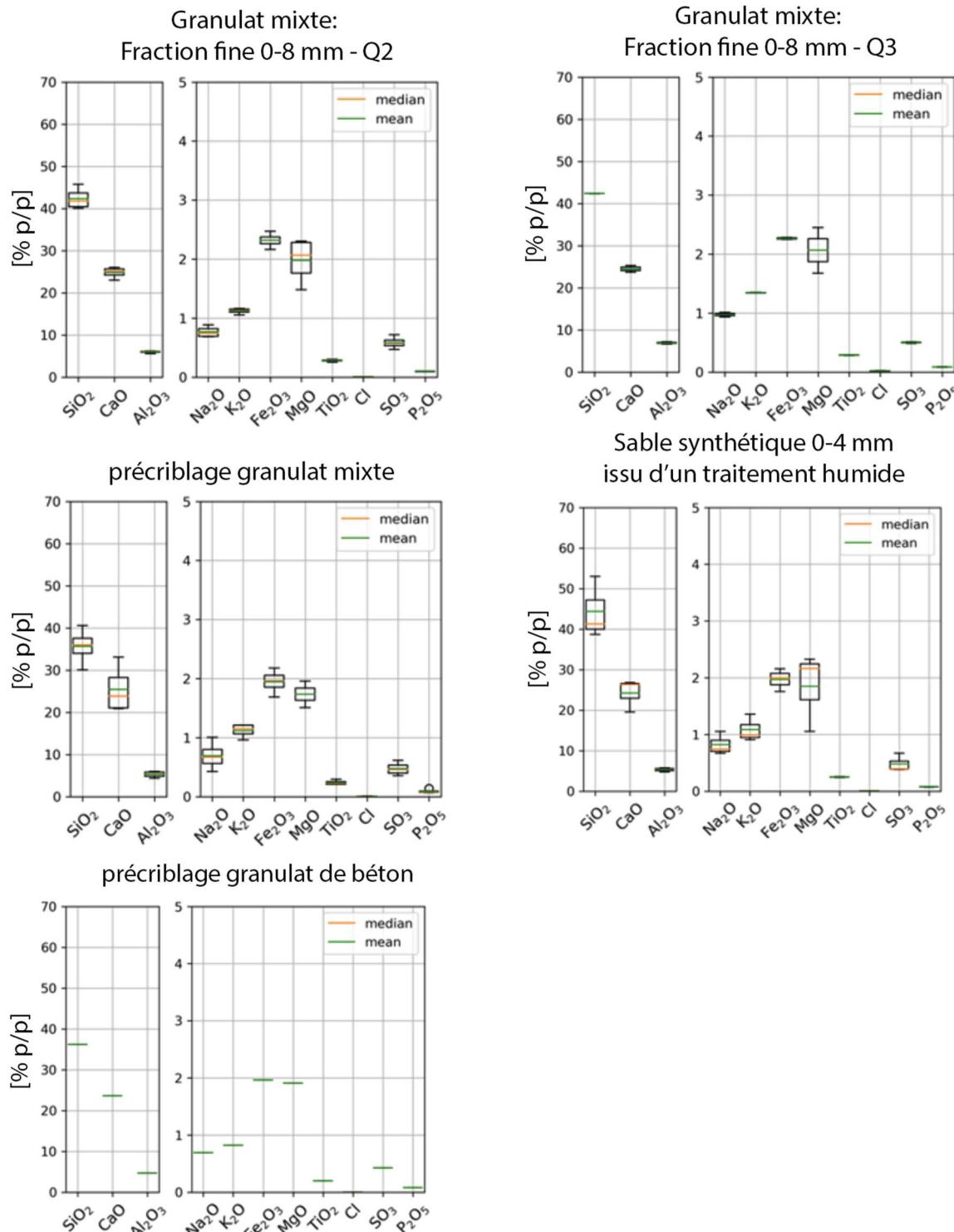


Figure 8: Composition chimique (éléments principaux) des qualités restantes de granulats mixtes ainsi que des précriblages de béton et de démolition non triée.

Tableau 8: Teneurs principales en éléments dans les granulats mixtes. Données en % masse.

N° d'installation	Code de l'échantillon	LOI	Al2O3	CaO	Cr2O3	Fe2O3	K2O	MgO	Mn3O4	Na2O	P2O5	SO3	SiO2	TiO2
Granulats mixtes fraction fine 0-8 mm - Q1														
1	RC-M 1.1	19.51	5.24	25.58	0.00	1.80	1.06	1.42	0.06	1.01	0.08	0.59	43.31	0.21
2	RC-M 2.1	19.95	5.27	26.82	0.00	2.04	1.00	2.08	0.09	0.70	0.08	0.77	40.76	0.27
2	RC-M 2.2	19.06	5.50	25.02	0.00	2.24	1.00	2.60	0.07	0.66	0.08	0.59	42.65	0.28
4	RC-M 4.1	19.35	6.03	24.80	0.01	2.18	1.15	1.53	0.06	0.76	0.13	0.77	42.61	0.29
5	RC-M 5.1	21.50	5.28	27.48	0.00	2.08	0.99	1.39	0.05	0.62	0.08	0.63	39.01	0.25
5	RC-M 5.2	21.53	5.37	26.80	0.00	2.05	1.01	1.51	0.06	0.68	0.09	0.75	39.35	0.25
6	RC-M 6.1	18.37	6.01	24.39	0.01	1.99	1.25	1.32	0.05	1.14	0.09	0.48	44.45	0.26
9	RC-M 9.1	20.78	5.20	25.76	0.00	2.15	0.95	1.98	0.06	0.67	0.09	0.74	40.37	0.27
11	RC-M 11.1	18.52	5.72	23.07	0.01	2.09	1.19	1.43	0.06	0.90	0.09	0.66	45.61	0.25
12	RC-M 12.1	19.26	5.30	25.26	0.00	2.07	0.97	2.23	0.06	0.67	0.09	0.97	42.14	0.29
12	RC-M 12.2	19.39	4.43	21.80	0.01	1.84	0.84	2.74	0.06	0.54	0.08	0.44	39.35	0.22
14	RC-M 14.1	20.01	4.78	25.81	0.01	1.98	0.91	2.23	0.06	0.68	0.08	0.96	41.79	0.26
17	RC-M 17.1	21.66	4.74	26.77	0.01	2.03	0.84	2.24	0.06	0.73	0.08	0.51	39.76	0.24
Pré-criblage avant traitement par voie humide														
8	RC-M 8.1	20.38	4.93	21.05	0.01	1.91	0.96	1.96	0.07	0.61	0.07	0.41	36.56	0.21
10	RC-M 10.1	19.18	5.79	20.86	0.01	2.18	1.10	1.67	0.06	0.73	0.08	0.62	35.31	0.29
15	RC-M 15.1	26.36	4.33	33.04	0.00	1.69	1.21	1.80	0.06	0.43	0.14	0.51	30.02	0.21
16	RC-M 16.1	20.20	5.97	26.59	0.01	2.01	1.21	1.51	0.06	1.01	0.08	0.36	40.57	0.24
Sable recyclé 0-4mm issu d'un traitement par voie humide														
3	RC-M 3.1	15.29	5.74	19.49	0.01	1.76	1.36	1.05	0.05	1.05	0.07	0.38	53.01	0.24
15	RC-M 15.3	21.95	5.32	26.76	0.01	2.16	0.99	2.32	0.06	0.67	0.08	0.39	38.70	0.26
17	RC-M 17.2	20.60	4.73	26.32	< 0.001	1.99	0.91	2.16	0.06	0.74	0.07	0.67	41.27	0.25
Granulats mixtes fraction fine 0-8 mm - Q2														
4	RC-M 4.3	17.64	6.18	23.01	0.01	2.29	1.16	1.48	0.06	0.69	0.10	0.60	45.72	0.30
9	RC-M 9.2	18.83	5.55	25.56	0.01	2.16	1.05	1.85	0.07	0.80	0.09	0.47	43.04	0.25
10	RC-M 10.2	20.68	5.97	24.64	0.01	2.34	1.12	2.27	0.08	0.88	0.10	0.72	40.58	0.29
15	RC-M 15.2	20.18	6.10	26.03	0.00	2.47	1.14	2.30	0.07	0.69	0.09	0.55	40.01	0.28
Granulats mixtes fraction fine 0-8 mm – Q3														
8	RC-M 8.2	18.47	7.13	23.67	0.02	2.28	1.35	2.45	0.07	0.94	0.09	0.49	42.40	0.29
11	RC-M 11.2	18.08	6.65	25.25	0.01	2.25	1.34	1.68	0.06	1.01	0.08	0.51	42.33	0.28

En ce qui concerne les métaux lourds, tant le pré-criblage des déchets de béton que la fraction fine 0 – 4 mm des granulats de béton respectent entièrement les valeurs limites de l’OLED pour une valorisation en tant que matière première et agent de mouture (Tableau 9). Il en va de même pour le pré-criblage de la démolition non triée ainsi que pour les différentes qualités de la fraction fine 0 – 8 mm des granulats non triés (Tableau 10). Les concentrations de mercure ne sont pas indiquées, car les valeurs se situent à chaque fois dans la limite de détection, ce qui les rend peu significatives.

Tableau 9: Teneurs en métaux lourds dans les fractions fines des granulats de béton. Données en ppm.

N° d'installa-tion	Code de l'échan-tillon	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Sb	Sn	Zn
Pré-criblage (séparation des fines en cas de forte teneur en fines)														
10	RC-B 10.1	8	250	< 5	45	74	17	< 1.1	762	30	17	2	5	94
Granulats de béton fraction fine 0-4 mm														
1	RC-B 1.1	8	253	< 5	55	79	10	< 1.1	587	25	14	2	2	51
2	RC-B 2.1	6	190	< 5	39	44	12	< 1.1	558	16	13	2	5	58
3	RC-B 3.1	9	223	< 5	34	60	13	< 1.0	470	18	18	3	3	60
4	RC-B 4.1	6	381	< 5	24	61	12	< 1.0	538	16	16	3	4	73
5	RC-B 5.1	6	215	< 5	28	46	13	2	525	15	19	3	3	63
5	RC-B 5.2	6	213	< 5	30	54	13	< 1.1	514	15	22	3	4	87
6	RC-B 6.1	6	434	< 5	33	61	14	2	519	26	15	2	4	67
7	RC-B 7.1	4	198	< 5	28	92	10	< 1.2	589	18	11	3	< 1.7	59
8	RC-B 8.1	9	225	< 5	60	76	11	< 1.1	672	32	23	3	6	56
9	RC-B 9.1	7	208	< 5	22	54	11	< 1.0	556	18	17	3	3	93
12	RC-B 12.1	8	189	< 5	26	61	11	< 1.0	596	20	14	3	3	55
13	RC-B 13.1	7	212	< 5	33	60	12	< 1.1	560	21	15	3	3	60
14	RC-B 14.1	10	180	< 5	55	43	11	< 1.1	557	16	11	3	3	46
15	RC-B 15.1	8	169	< 5	33	61	14	2	630	22	13	3	2	51
16	RC-B 16.1	8	217	< 5	60	79	8	< 1.2	527	24	13	2	2	55
16	RC-B 16.2	6	228	< 5	58	58	7	< 1.2	548	25	11	2	2	49
17	RC-B 17.1	9	275	< 5	49	76	13	< 1.1	588	17	22	3	4	69
18	RC-B 18.1	8	185	< 5	29	44	9	2	467	15	13	2	3	65
Ann. 4.1 (Remplacement des matières premières)		30		5	250	500	500	1		500	500	30	100	2000
Ann. 3.2 (Toléré/agent de mouture)		15		5		250	250	0.5		250	250	15		500
Ann. 5.2 (Décharge de type B)		30		10		500	500	1		500	500	30		1000

Tableau 10: Teneurs en métaux lourds dans les fractions fines des granulats mixtes. Données en ppm.

N° d'installa-tion	Code de l'échantil-lon	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Sb	Sn	Zn
Granulats mixtes fraction fine 0-8 mm - Q1														
1	RC-M 1.1	7	288	< 5	30	46	11	< 1.0	639	23	35	3	4	98
2	RC-M 2.1	8	269	< 5	53	65	15	< 1.1	923	24	29	3	4	84
2	RC-M 2.2	8	237	< 5	53	61	16	< 1.1	730	26	26	3	4	76
4	RC-M 4.1	10	269	< 5	83	54	12	< 1.2	619	26	33	2	4	97
5	RC-M 5.1	8	286	< 5	43	57	13	< 1.1	557	22	23	3	4	102
5	RC-M 5.2	8	265	< 5	47	48	14	< 1.1	577	22	37	< 1.6	4	155
6	RC-M 6.1	10	311	< 5	63	53	11	< 1.1	565	28	24	3	5	88
9	RC-M 9.1	10	277	< 5	52	58	13	< 1.1	608	22	25	7	4	127
11	RC-M 11.1	5	342	< 5	77	74	11	< 1.2	565	21	50	4	6	138
12	RC-M 12.1	8	335	< 5	25	61	13	1	620	22	34	4	4	128
12	RC-M 12.2	8	276	< 5	41	84	16	< 1.1	644	24	42	2	4	74
14	RC-M 14.1	7	232	< 5	39	67	16	< 1.1	591	22	37	3	5	95
17	RC-M 17.1	7	198	< 5	55	66	13	< 1.2	616	22	32	3	3	76
Pré-criblage avant traitement par voie humide														
8	RC-M 8.1	9	289	< 5	51	78	19	< 1.1	796	42	33	4	5	116
10	RC-M 10.1	12	313	< 5	59	86	22	< 1.1	713	32	94	4	5	112
15	RC-M 15.1	6	280	< 5	57	51	21	< 1.2	691	23	40	2	5	116
16	RC-M 16.1	9	299	< 5	34	75	19		546	31	58	3	9	153
Sable recyclé 0-4mm issu d'un traitement par voie humide														
3	RC-M 3.1	4	374	< 5	43	51	9	< 1.0	518	20	103	10	6	280
15	RC-M 15.3	10	270	< 5	46	78	15		682	30	27	3	4	84
17	RC-M 17.2	10	233	< 5	36	49	12	< 1.1	577	20	28	3	6	116
Granulats mixtes fraction fine 0-8 mm - Q2														
4	RC-M 4.3	9	296	< 5	75	63	15	< 1.1	610	26	55	3	5	113
9	RC-M 9.2	8	257	< 5	30	54	14		658	22	14	3	4	64
10	RC-M 10.2	12	297	< 5	59	70	19	< 1.1	740	37	150	5	5	114
15	RC-M 15.2	9	285	< 5	56	65	18	< 1.1	728	29	38	< 1.6	5	72
Granulats mixtes fraction fine 0-8 mm - Q3														
8	RC-M 8.2	8	402	< 5	75	192	20	< 1.0	727	36	117	4	12	116
11	RC-M 11.2	9	305	< 5	41	70	13	< 1.1	580	24	40	< 1.5	4	67
Ann. 4.1 (Remplacement des matières premières)														
		30		5	250	500	500	1		500	500	30	100	2000
Ann. 3.2 (Toléré/agent de mouture)														
		15		5		250	250	0.5		250	250	15		500
Ann. 5.2 (Décharge de type B)														
		30		10		500	500	1		500	500	30		1000

3.3 Composition minéralogique

La composition minéralogique d'une sélection d'échantillons a également été analysée (Tableau 11). Comme la composition minéralogique dépend fortement de la lithologie des granulats utilisés, la variation est d'autant plus grande et on ne peut guère distinguer de différence minéralogique entre les granulats de béton et les granulats mixtes. Les granulats de béton et les granulats mixtes sont dominés par les minéraux principaux que sont le quartz, les feldspaths, les carbonates (calcite et dolomite) ainsi que les phyllosilicates (par ex. le mica). Du gypse ou de la portlandite ont également été détectés de manière isolée. La part amorphe (= non cristalline) calculée dans les granulats de béton et mixtes peut être attribuée, soit à la présence de phases minérales argileuses, soit à des phases amorphes aux rayons X, soit à

des résidus de pâte de ciment adhérant aux grains. Dans les granulats mixtes, la part amorphe est également due à des phases amorphes dans les composants céramiques, ce qui fait qu'en moyenne, la teneur en part amorphe est plus élevée dans les granulats mixtes que dans les granulats de béton. Il n'y a pratiquement pas de différence minérale entre les qualités de granulat mixtes Q1 et Q2/Q3.

Tableau 11: Composition minéralogique d'échantillons sélectionnés de différents types d'échantillons de granulats de béton et mixtes.

Code d'échantillon	Quartz	Calcite	Feldspaths	Dolomit	Phyllosilicates	Autres*	Amorphe
Granulats mixtes fraction fine 0-8 mm - Q1							
RC-M 3.1	40	30	12	3	6	0	10
RC-M 4.2	30	36	9	5	8	2	10
RC-M 15.1	20	54	6	5	7	0	8
RC-M 17.1	30	40	8	7	9	0	7
Granulats mixtes fraction fine 0-8 mm - Q2 und Q3							
RC-M 4.3	33	34	10	4	8	0	11
RC-M 8.2	27	32	11	5	10	0	15
RC-M 10.2	30	39	10	6	15	0	0
RC-M 15.2	26	37	9	6	9	0	13
Granulats de béton fraction fine 0-4 mm							
RC-B 3.1	34	32	10	3	10	0	11
RC-B 7.1	25	54	5	3	6	0	6
RC-B 8.1	32	31	12	8	12	0	6
RC-B 14.1	27	38	8	7	9	2	9
RC-B 17.1	32	42	9	8	9	0	0

*Gypse, Portlandite

3.4 Polluants organiques dans la fraction fines des granulés mixtes

3.4.1 Polluants organiques difficilement volatils selon l'OLED

Le Tableau 12 présente les teneurs en polluants organiques peu volatils selon l'OLED et les compare aux différentes exigences de valorisation et de mise en décharge. En tendance, les qualités des fractions fines de granulats mixtes analysées remplissent les exigences de l'annexe 3, chiffre 2 (matériau T) et peuvent être valorisées, entre autres, comme matière première pour la fabrication de matériaux de construction liés ou comme matière première pour la fabrication de clinker de ciment. Deux échantillons dépassent la valeur limite pour les HAP et le benzo(a)pyrène (facteur inférieur à deux). Deux autres échantillons dépassent les valeurs limites pour les matériaux de type B. L'un d'entre eux dépasse les valeurs limites pour le benzo(a)pyrène et les HAP, l'autre pour les PCB. Ces échantillons respectent toutefois les valeurs limites pour une valorisation en cimenterie en tant que substitut de matière première.

Les données sont comparables à la compilation des polluants organiques dans le rapport sur la valorisation des déchets de démolition mixtes en Suisse (Rubli, 2020). Dans les deux séries de données, on trouve des valeurs élevées isolées, en particulier pour les HAP et les PCB. Contrairement à ce qui était attendu, aucune augmentation générale des valeurs n'a été mesurée dans les échantillons issus du pré-criblage. De manière générale, il s'avère que la plupart des échantillons issus du traitement à sec respectent les exigences en matière de polluants organiques pour la valorisation en cimenterie ainsi que pour le stockage définitif en décharges de type B.

Tableau 12: Teneurs en polluants organiques peu volatils selon l'OLED des fractions fines de granulats mixtes analysées.

N° d'installa- tion	Code d'échantillon	carbone org. (TOC400) % TS	Hydrocar- bures (C10- C40) mg/kg TS	Benzo(a)pyrène mg/kg TS	Total HAP mg/kg TS	PCB Somme se- lon l'OLED mg/kg TS
Granulats mixtes fraction fine 0-8mm - Q1						
1	RC-M 1.1	0.2	170	0.6	5.9	0.1
2	RC-M 2.1	0.2	78	0.4	3.9	0.1
4	RC-M 4.1	0.3	48	0.3	2.8	0.3
5	RC-M 5.1	0.3	190	2.2	22	<0.05
5	RC-M 5.2	0.4	170	1.0	11	0.3
6	RC-M 6.1	0.2	83	0.2	2.3	0.2
9	RC-M 9.1	0.3	110	0.5	5.2	0.1
11	RC-M 11.1	0.4	200	4.8	69	0.1
12	RC-M 12.1	0.3	190	0.6	7.0	0.1
12	RC-M 12.2	0.2	56	0.6	6.6	0.1
14	RC-M 14.1	0.2	85	0.5	4.5	1.2
17	RC-M 17.1	0.2	110	0.8	8.8	0.1
Pré-criblage avant traitement par voie humide						
8	RC-M 8.1	0.3	170	1.9	17	0.1
10	RC-M 10.1	0.4	190	0.3	4.0	0.1
15	RC-M 15.1	0.2	45	0.3	2.5	0.1
16	RC-M 16.1	0.1	36	0.2	1.7	<0.05
Granulats mixtes fraction fine 0-8mm - Q2						
4	RC-M 4.3	0.3	67	0.2	1.8	0.2
9	RC-M 9.2	0.1	38	0.1	0.8	0.1
10	RC-M 10.2	0.4	210	0.8	8.3	0.4
15	RC-M 15.2	0.2	40	0.3	2.4	<0.05
Valeurs limites de l'OLED						
Ann. 4.1: Valorisation en tant que substitut de matière première		5	5000	10	250	10
Ann. 3.2: Toléré		1	250	1.5	12.5	0.5
Ann. 5.2: Décharge de type B		2	500	3	25	1

3.4.2 PFAS dans les solides

Au total, 15 composés per- et polyfluoroalkylées (PFAS) ont été analysés dans les matières solides des granulats mixtes (Tableau 13). Parmi les substances positives, 7 font partie du paramètre des somme de 9, qui est évalué au moyen des facteurs d'équivalence de toxicité (TEF). Les sous-espèces PFOS ont été détectées dans tous les échantillons, les PFOA ont été détectées dans tous les échantillons sauf un. L'EtFOSAA a été détecté le plus souvent au-dessus de la limite de quantification - cette substance ne fait pas partie du paramètre de somme de 9. La répartition des autres substances détectées ne permet guère de dégager un modèle. Cependant, dans la plupart des cas, les valeurs ne dépassent que de peu la limite de détermination de 0.1 µg/kg. Il est frappant de constater que les échantillons de qualité 2 (Q2) de la fraction fine 0 - 8 des granulats mixtes présentent des valeurs supérieures à la limite de détermination pour le plus grand nombre de substances. Pour cette fraction, l'ensemble du matériau d'entrée (démolition non trié) a été concassé directement à 0 - 8 mm sans criblage préalable (au lieu de 0 - 16/22 comme pour Q1 (également sans criblage préalable), ce qui pourrait laisser supposer que la fraction Q2 est diluée par rapport à Q1 (car une fraction supplémentaire est générée)).

Tableau 13: Aperçu des concentrations de PFAS mesurées dans les solides. Les valeurs supérieures à la limite de quantification sont marquées en rouge. Les substances indicatrices des paramètres de la somme des 9 sont marquées en jaune pour une meilleure vue d'ensemble.

		PFBA	PFPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFNA	PFDA	PFUnDA	PFDoDA	PFTnDA	PFTeDA	PFBS	PFPeS	PFHxS	PFHpS	PFOS	PFNS	PFDS	(PF)FOSA	MeFOSA	MeFOSAA	EFOSAA	HFFO-DA/GenX	DONA	9ClPF3ONS / F-53B	8:2-FTUC-A	4:2-FTS	6:2-FTS	8:2-FTS	
N° d' installation	Code d'échantillon	µg/kg TS																													
Granulats mixtes fraction fine 0-8mm - Q1																															
1	RC-M 1.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1		
2	RC-M 2.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.3	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1		
4	RC-M 4.1	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	0.5	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	1.5	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1		
5	RC-M 5.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1	
5	RC-M 5.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.3	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.7	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.4	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1		
6	RC-M 6.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	2.3	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	0.1	<0.1		
9	RC-M 9.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.4	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.6	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.4	<0.1	0.3	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1	
11	RC-M 11.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.3	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.4	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
12	RC-M 12.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.3	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
12	RC-M 12.2	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.3	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.3	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
14	RC-M 14.1	0.1	<0.1	0.3	<0.1	0.3	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.3	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
17	RC-M 17.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.7	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	0.3	0.2			
Pré-cribleage avant traitement par voie humide																															
8	RC-M 8.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.6	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
10	RC-M 10.1	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	0.4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.8	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	0.3	<1	1.9	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
15	RC-M 15.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	0.4	<0.1			
16	RC-M 16.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
Granulats mixtes 0-8mm - Q2																															
4	RC-M 4.3	<0.1	<0.1	0.4	0.2	0.8	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	0.3	<0.1	0.3	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
9	RC-M 9.2	<0.1	<0.1	0.2	0.1	0.9	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	1.2	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	0.1	2.2	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
10	RC-M 10.2	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	0.3	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.9	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.3	<0.1	1.4	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
15	RC-M 15.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<1	<1	<0.1	<1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	

3.4.3 PFAS dans le lixiviat

Afin d'évaluer non seulement le potentiel de polluants dans les solides, mais aussi le potentiel de libération des PFAS, des tests de lixiviation ont été choisis avec deux rapports liquide/solide (L/S) différents. L'analyse d'un rapport L/S de 10 et d'un rapport L/S de 2 doit permettre de déterminer si les PFAS se comportent différemment dans ces différentes conditions. Cela pourrait donner des indications sur la mobilité et donc sur le potentiel d'émission. Lors de l'analyse des lixiviat, il faut tenir compte du fait qu'en raison de la charge matricielle plus élevée des échantillons, la limite de détermination est parfois plus élevée pour les lixiviat avec un rapport L/S de 2 que pour le rapport L/S de 10. Cela a conduit dans des cas isolés à ce qu'une substance soit détectée à des pourcentages d'analyse très bas avec un rapport L/S plus élevé, mais pas avec un rapport L/S plus faible. En général, on part du principe qu'un rapport L/S de 2 permet une meilleure détection.

Sur les deux ratios L/S, 22 des 30 substances PFAS recherchées ont été détectées (Tableau 14). Presque tous les échantillons de lixiviation présentent des résultats positifs pour les substances indicatrices des paramètres de la somme des 9. Comme cela a déjà été constaté lors d'études précédentes sur les PFAS (Weibel, 2024), les concentrations mesurées dans le lixiviat avec L/S 2 ont tendance à être légèrement inférieures à celles mesurées dans le lixiviat avec L/S 10 (extrapolées à un L/S 1 à titre de comparaison).

Tableau 14: Aperçu des concentrations de PFAS mesurées dans le lixiviat (L/S 2 et L/S 10). Les valeurs supérieures à la limite de quantification sont marquées en rouge. Les substances indicatrices des paramètres de la somme des 9 sont marquées en jaune pour une meilleure vue d'ensemble.

N°	Code d'installation	Code d'échantillon	L/S	mg/L TS									mg/L m.s.
				Granulats mixtes fraction fine 0-8mm - Q1									
1	RC-M 1.1	2	<0.01	0.007	0.015	0.007	0.021	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00
2	RC-M 2.1	10	<0.01	0.002	0.003	0.001	0.006	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00
4	RC-M 4.1	2	0.022	0.017	0.05	0.036	0.175	0.005	0.014	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00
5	RC-M 5.1	2	<0.05	0.017	0.032	0.018	0.068	0.004	0.009	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00
5	RC-M 5.2	10	<0.01	0.005	0.007	0.004	0.016	0.001	0.004	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00
6	RC-M 6.1	2	0.035	0.01	0.04	0.019	0.054	0.001	0.004	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00
9	RC-M 9.1	2	0.015	0.012	0.037	0.027	0.13	0.016	0.058	0.002	<0.00	<0.00	<0.00
11	RC-M 11.1	10	<0.05	0.028	0.014	0.059	0.03	0.006	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00
12	RC-M 12.1	2	<0.05	0.013	0.031	0.018	0.083	0.004	0.005	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00
12	RC-M 12.2	10	<0.01	0.004	0.006	0.004	0.017	<0.00	0.002	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00
14	RC-M 14.1	2	0.118	0.028	0.148	0.028	0.127	0.005	0.012	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00
17	RC-M 17.1	2	<0.05	0.012	0.021	0.011	0.117	0.004	0.005	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00
8	RC-M 8.1	10	<0.01	0.004	0.005	0.005	0.03	0.03	0.011	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00
10	RC-M 10.1	2	0.033	0.014	0.026	0.014	0.006	0.036	0.003	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00
15	RC-M 15.1	2	0.026	0.009	0.029	0.013	0.059	0.005	0.02	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00
16	RC-M 16.1	10	<0.01	0.002	0.002	0.002	0.005	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00
4	RC-M 4.3	2	0.052	0.025	0.179	0.045	0.143	0.006	0.015	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00
9	RC-M 9.2	2	<0.05	0.025	0.091	0.081	0.423	0.006	0.007	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00
10	RC-M 10.2	2	0.034	0.012	0.06	0.039	0.187	0.015	0.041	<0.00	<0.00	<0.00	<0.00
15	RC-M 15.2	10	<0.01	0.002	0.008	0.004	0.017	0.074	0.006	0.02	<0.00	<0.00	<0.00

Pré-criblage avant traitement par voie humide

N°	Code d'installation	Code d'échantillon	L/S	mg/L TS									mg/L m.s.
				Granulats mixtes 0-8mm - Q2									
4	RC-M 4.3	2	<0.01	0.006	0.002	<0.00	0.004	0.025	<0.00	0.062	0.011	0.153	<0.00
9	RC-M 9.2	2	<0.01	0.005	0.019	0.016	0.1	0.002	0.003	0.017	0.003	0.043	<0.00
10	RC-M 10.2	2	0.012	0.005	0.012	0.007	0.00	<0.00	0.004	0.017	0.003	0.039	<0.00
15	RC-M 15.2	10	<0.01	0.002	0.008	0.004	0.017	0.04	0.012	0.003	0.005	0.062	<0.00

Si l'on évalue les PFAS détectés à l'aide de la somme des 9 valeurs pondérées par l'équivalent matière sèche (Tableau 15), on constate des valeurs fortement élevées dans toutes les qualités analysées. Il faut donc s'attendre à ce que les déchets de démolition non triés stockés dans les décharges de type B mobilisent à l'avenir des quantités considérables de PFAS via les eaux de percolation.

Tableau 15: Valeurs totales des PFAS pour L/S 2 et L/S 10 (équivalent matière sèche m.s.).

N° d'installation	Code d'échantillon	Somme PFAS m.s. L/S 2	Somme PFAS m.s. L/S 10
		µg m.s. /L	
Granulats mixtes fraction fine 0-8mm - Q1			
1	RC-M 1.1	0.06	0.02
2	RC-M 2.1	0.43	0.14
4	RC-M 4.1	0.75	0.21
5	RC-M 5.1	0.27	0.08
5	RC-M 5.2	0.53	0.16
6	RC-M 6.1	0.69	0.21
9	RC-M 9.1	0.61	0.15
11	RC-M 11.1	0.17	0.06
12	RC-M 12.1	0.31	0.08
12	RC-M 12.2	0.29	0.07
14	RC-M 14.1	0.33	0.09
17	RC-M 17.1	0.33	0.12
Pré-criblage avant traitement par voie humide			
8	RC-M 8.1	0.17	0.04
10	RC-M 10.1	0.65	0.19
15	RC-M 15.1	0.32	0.07
16	RC-M 16.1	0.09	0.02
Granulats mixtes 0-8mm - Q2			
4	RC-M 4.3	0.67	0.25
9	RC-M 9.2	1.20	0.36
10	RC-M 10.2	0.81	0.19
15	RC-M 15.2	0.25	0.06

3.4.4 Comparaison PFAS dans le lixiviat vs. PFAS dans les solides

La comparaison des concentrations de PFAS des lixiviats pour un rapport L/S de 2 (converti en matière solide) est présentée dans le Tableau 16 . La comparaison montre que les résultats positifs et négatifs concordent bien. Les valeurs d'analyse individuelles diffèrent parfois légèrement, ce qui s'explique par la limite de détection différente pour les analyses des solides et des lixiviats, le contact plus intense entre les solides et l'eau et les taux de dissolution ou de désorption légèrement plus faibles en raison des concentrations ioniques plus élevées pour L/S 2. La comparaison des concentrations de PFAS dans les solides et les lixiviats indique que la plupart des PFAS sont fortement mobilisables dans les solides. Le Tableau 17 donne un aperçu de la mobilisation du solide dans le lixiviat (L/S 2) pour les 9 substances principales du paramètre global et confirme que les substances sont très facilement mobilisables avec des valeurs comprises entre 42 et 100%. Cependant, comme la limite de détection est plus élevée dans l'analyse des matières solides que dans celle du lixiviat, la mobilité n'a pu être calculée avec précision que pour quelques échantillons, à l'exception des deux substances dominantes PFOA et PFOS. Les résultats ne sont donc que partiellement significatifs.

Tableau 16: Comparaison des concentrations de PFAS dans les solides et dans le lixiviat (L/S 2; converti en solide).

N° d'installatio n	Code d'échantillon L/S	μg/kg TS	8:2-FTS	6:2-FTS	8:2-FTUCA	EtFOSAA	EtFOSA	MeFOSAA	MeFOSA	(P)FOSA	PFOS	PFHpS	PFHxS	PPeS	PFBS	PFDA	PFNA	PFOA	PFHpA	PFHxA	PPeA	PFBA
Granulats mixtes fraction fine 0-8mm - Q1																						
1	RC-M 1.1.	Éluat	0.01	0.03	0.01	0.04	0.00	0.01	0.01	0.03	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.01	0.03	0.01	0.01	
	Solide		<0.1	<0.1	<0.1	0.10	0.01	0.02	0.07	0.01	0.09	0.01	0.21	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.01	0.03	<0.1	
2	RC-M 2.1.	Éluat	0.02	0.12	0.05	0.25	0.01	0.02	0.07	0.01	0.09	0.01	0.40	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.30	0.30	0.07	0.07	
	Solide		<0.1	<0.1	<0.1	0.20	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
4	RC-M 4.1.	Éluat	0.04	0.03	0.10	0.07	0.35	0.01	0.03	0.07	0.02	0.20	0.01	0.43	0.03	0.02	0.40	0.01	0.06	0.03	0.03	
	Solide		<0.1	<0.1	0.10	<0.1	0.50	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	1.20	<0.1	<0.1	1.50	<0.1	0.50	<0.1	<0.1	
5	RC-M 5.1.	Éluat	0.03	0.06	0.04	0.14	0.01	0.02	0.04	0.00	0.02	0.00	0.14	0.02	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.04	0.01	
	Solide		<0.1	<0.1	<0.1	0.10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
5	RC-M 5.2.	Éluat	0.02	0.05	0.04	0.23	0.01	0.02	0.02	0.00	0.02	0.01	0.32	0.04	0.01	0.00	0.03	0.04	0.02	0.04	0.02	
	Solide		<0.1	<0.1	<0.1	0.30	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.70	<0.1	<0.1	0.40	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
6	RC-M 6.1.	Éluat	0.07	0.02	0.08	0.04	0.20	0.01	0.03	0.07	0.01	0.05	0.01	0.51	0.03	0.01	0.02	0.03	0.02	0.13	0.01	
	Solide		<0.1	<0.1	<0.1	0.20	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	2.30	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.10	0.10	<0.1	
9	RC-M 9.1.	Éluat	0.03	0.02	0.07	0.05	0.26	0.03	0.12	0.01	0.00	0.02	0.01	0.28	0.05	0.01	0.14	0.01	0.05	0.01	0.01	
	Solide		<0.1	<0.1	<0.1	0.40	<0.1	0.20	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.60	<0.1	<0.1	0.40	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
11	RC-M 11.1.	Éluat	0.07	0.06	0.03	0.12	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.05	0.01	0.07	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	
	Solide		<0.1	<0.1	<0.1	0.20	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.30	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.40	<0.1	<0.1	
12	RC-M 12.1.	Éluat	0.03	0.06	0.04	0.17	0.01	0.01	0.05	0.01	0.02	0.00	0.17	0.02	0.02	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	
	Solide		<0.1	<0.1	<0.1	0.20	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.40	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.30	<0.1	<0.1	
12	RC-M 12.2.	Éluat	0.19	0.02	0.07	0.04	0.17	0.01	0.01	0.20	0.01	0.05	0.01	0.13	0.03	0.01	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	
	Solide		0.10	<0.1	<0.1	0.20	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.30	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.30	<0.1	<0.1	
14	RC-M 14.1.	Éluat	0.24	0.06	0.30	0.06	0.25	0.01	0.02	0.05	0.00	0.02	0.00	0.10	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.01	
	Solide		0.10	<0.1	0.30	<0.1	0.30	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.30	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.20	<0.1	<0.1	
17	RC-M 17.1.	Éluat	0.02	0.04	0.04	0.23	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.15	0.01	0.00	0.01	0.01	0.08	0.02	0.02	0.02	
	Solide		<0.1	<0.1	<0.1	0.20	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.40	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.70	0.30	0.20	
Pré-criblage avant traitement par voie humide																						
8	RC-M 8.1.	Éluat	0.14	0.05	0.02	0.08	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.09	0.01	0.00	0.02	0.01	0.10	0.03	0.03	<0.1	
	Solide		0.20	<0.1	<0.1	0.20	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.20	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.60	<0.1	<0.1	
10	RC-M 10.1.	Éluat	0.07	0.03	0.12	0.06	0.34	0.02	0.05	0.04	0.01	0.03	0.01	0.34	0.07	0.01	0.09	0.03	0.19	0.02	0.03	
	Solide		<0.1	<0.1	0.10	<0.1	0.40	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.80	0.10	<0.1	0.30	<0.1	1.90	<1	<0.1	
15	RC-M 15.1.	Éluat	0.05	0.02	0.06	0.03	0.12	0.01	0.04	0.02	0.01	0.00	0.19	0.02	0.01	0.08	0.01	0.05	0.01	0.45	0.04	
	Solide		<0.1	<0.1	<0.1	0.10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.20	<0.1	<0.1	0.10	<0.1	0.10	0.40	<0.1	
16	RC-M 16.1.	Éluat	0.04	0.01	0.02	0.05	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.00	0.01	0.01	0.08	0.02	0.07	
	Solide		<0.1	<0.1	<0.1	0.20	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.70	0.30	<0.1	
4	RC-M 4.3	Éluat	0.10	0.05	0.36	0.09	0.29	0.01	0.03	0.12	0.02	0.31	0.01	0.33	0.02	0.03	0.07	0.01	0.07	0.04	0.03	
	Solide		<0.1	<0.1	0.40	0.20	0.80	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	1.00	<0.1	<0.1	0.30	<0.1	0.30	<0.1	<0.1	
9	RC-M 9.2	Éluat	0.05	0.18	0.16	0.85	0.01	0.02	0.01	0.05	0.02	0.05	0.02	0.63	0.13	0.01	0.07	0.33	0.33	0.03	0.03	
	Solide		<0.1	0.20	0.10	0.90	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	1.20	0.20	<0.1	0.10	2.20	<0.1	<0.1	<0.1	
10	RC-M 10.2	Éluat	0.07	0.02	0.12	0.08	0.37	0.03	0.08	0.09	0.01	0.03	0.01	0.43	0.06	0.01	0.12	0.03	0.25	0.04	0.01	
	Solide		<0.1	0.10	<0.1	0.30	<0.1	0.10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.90	<0.1	<0.1	0.30	<0.1	1.40	<0.1	<0.1	
15	RC-M 15.2	Éluat	0.08	0.02	0.08	0.03	0.15	0.01	0.04	0.02	0.00	0.01	0.00	0.09	0.02	0.01	0.01	0.01	0.05	0.04	0.01	
	Solide		<0.1	<0.1	<0.1	0.20	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.20	<0.1	<0.1	0.10	<0.1	0.20	<0.1	<0.1	

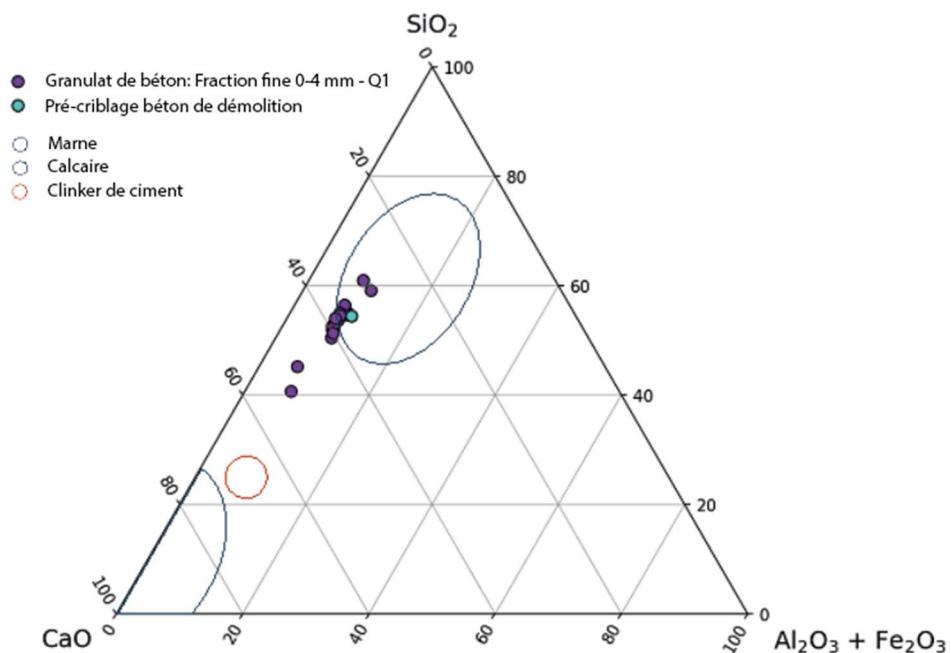
Tableau 17: Aperçu de la mobilisation du solide dans le lixiviat (L/S 2) pour les 9 substances principales du paramètre global, indiqué en % mobilisé à partir du solide. Les valeurs > 100% ont été prises en compte comme 100%.

	PFBA	PPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFNA	PFBS	PFHxS	PFOS
% mobilisé									
Moyenne	91	0	97	73	79	0	94	100	42
Min	72	0	90	45	36	0	88	100	22
Max	100	0	100	100	100	0	100	100	94
Nombre	3	0	6	2	19	0	2	1	20

4 Évaluation du potentiel de valorisation en cimenterie

4.1 Valorisation en tant que substitut de matière première

La Figure 9 présente la composition chimique des différentes qualités des granulats de béton et mixtes dans le système ternaire $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$. À titre de comparaison, la composition chimique des matières premières primaires utilisées pour la fabrication du clinker est représentée dans des ovales de couleur. La comparaison visuelle permet d'affirmer que les granulats mixtes correspondent à une qualité de marne en ce qui concerne les éléments principaux $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ importants dans le système de ciment et qu'ils représentent donc un substitut envisageable de la marne. On remarque en outre que les différents granulats mixtes ne présentent qu'une dispersion chimique minime en ce qui concerne les éléments principaux pertinents dans le système de ciment. Les granulats de béton sont chimiquement similaires aux granulats mixtes, mais ils présentent un rapport Ca:Si légèrement plus élevé, ce qui les rapproche du coin CaO dans le diagramme ternaire. Sur le plan qualitatif, la position dans le diagramme ternaire permet d'attribuer aux granulats de béton une qualité légèrement supérieure à celle de la marne, qui est chimiquement un peu plus proche de la composition souhaitée pour le clinker.



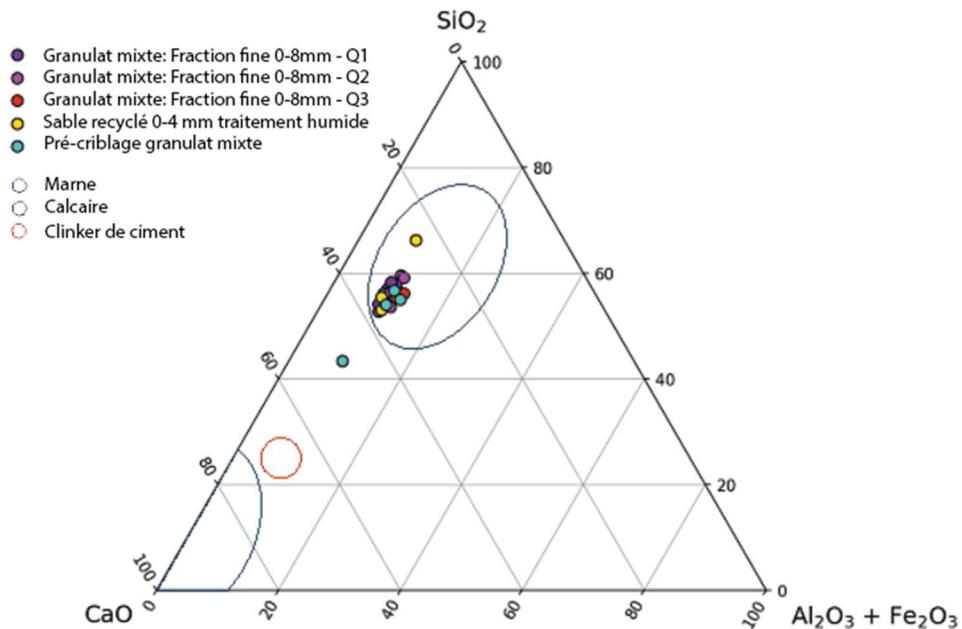


Figure 9: Aperçu de la composition chimique des granulats de béton analysés (en haut) et des granulats mixtes (en bas) dans le système ternaire $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$.

4.1.1 Potentiel de substitution des matières premières

Afin d'évaluer le potentiel de substitution de la matière première et les économies de CO_2 qui en découlent, des modélisations de la composition de la farine brute ont été réalisées. Pour la composition chimique de la farine brute, on utilise des grandeurs telles que le standard de calcaire, le module de silicate et le module d'alumine (Locher, 2000).

Le facteur de saturation en chaux (FSC ou lime saturation factor LSF) met en relation la teneur en CaO disponible avec la part de CaO qui contribue à la formation de phases de clinker contenant du Si, de l'Al ou du Fe. La formule suivante est utilisée pour le calcul :

$$LSF = 100 * \frac{\text{CaO}}{2,8 \text{SiO}_2 + 1,1 \text{Al}_2\text{O}_3 + 0,7 \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

Le **module silicique** (MS) est une mesure du rapport entre les parties solides et les parties en fusion dans le four rotatif. Il repose sur l'hypothèse que le SiO_2 est principalement lié dans les phases cristallines sous forme d'alite et de bélite, tandis que l' Al_2O_3 et le Fe_2O_3 sont généralement présents dans la masse fondu. Un module silicique équilibré se situe entre 2,3 et 2,8. Un module silicique bas indique que le matériau forme facilement des agglomérats. Le calcul se fait selon la formule suivante :

$$MS = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

Le **module aluminoferrique** (MA) est un autre indicateur de la formation de la masse fondu. Avec un module aluminoferrique d'environ 1,4 à 1,6, dans des compositions de matériaux par ailleurs idéales, tout l' Al_2O_3 et le Fe_2O_3 passeraient entièrement en phase de fusion aux températures les plus basses possibles.

$$MA = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3}$$

Pour le mélange de matières premières, on vise un facteur de saturation en chaux de 100, un module silicique de 2,7 et un module aluminoferrique de 2,0. Pour les granulats mixtes, seules les analyses des

fractions fines Q1 ont été prises en compte, pour les granulats de béton, les fractions fines 0 - 4 mm. Les autres qualités sont produites à la demande du client et pour un marché déjà existant.

Tableau 18: Simulation de mélange pour le potentiel de substitution des granulats de béton et mixtes (marne : valeur moyenne des usines suisse (Kündig, 1997)).

	Calcaire			Marne			Agent de correction			Matériaux recyclés			Mélange de ciment			
	LSF	MS	MA	LSF	MS	MA	LSF	MS	MA	LSF	MS	MA	LSF	MS	MA	
But													101	2.6	1.8	
Système simple	Calcaire moyen 70% 327 2.0 1.7						Granulats de béton 0-4mm 30% 24 6.5 2.7			Mélange de ciment 100% 97 4.3 2.1						
	Calcaire moyen 60% 327 2.0 1.7			Marne 25% 53 2.5 257	Calamine 0.55% 2.2 0.03 0.01			Granulats de béton 0-4mm 15% 24 6.5 2.7			Mélange de ciment 100% 99 2.8 1.6					
	Calcaire moyen 74% 327 2.0 1.7							Granulats mixtes 0-8 mm 26% 20 5.7 2.6			Mélange de ciment 100% 99 3.9 2.1					
Système complexe	Calcaire moyen 62.5% 327 2.0 1.7			Marne 22% 53 2.5 257	Calamine de la-minage 0.58% 2.2 0.03 0.01			Granulats mixtes 0-8 mm 15% 20 5.7 2.6			Mélange de ciment 100% 99 2.8 1.6					

Dans la pratique, les cimenteries disposent d'une multitude de matériaux qu'elles peuvent mélanger aux deux composants principaux, le calcaire et la marne, afin d'obtenir les valeurs souhaitées. Pour le présent modèle de calcul, un système simplifié avec peu de composants a été considéré (Tableau 18). Dans le système le plus simple avec un calcaire moyen (LSF 330) et des granulats de béton, on peut ajouter jusqu'à 30% de granulats de béton pour obtenir un LSF d'environ 100. Le module silicique de 4,27 est cependant clairement trop élevé et constitue le facteur limitant. Le granulat mixte présente une image comparable avec 26% de granulat mixte et un module silicique de 3,9. Si l'on ajoute d'autres substances pour la correction, il est possible d'atteindre une part de masse de 15% aussi bien pour le granulat de béton que pour le granulat mixte en respectant les trois modules définis (LSF, MS, MA). La proportion possible de granulats de béton ou de granulats mixtes dépend donc de la disponibilité d'agents de correction pour compenser la teneur élevée en silicium des matériaux de déconstruction. Une substitution de 15% est considérée comme réaliste, à condition qu'il y ait suffisamment d'agent de correction disponibles. Si, dans toutes les cimenteries suisses, 15% du mélange annuel de matières premières (4,9 millions de tonnes (cemuisse, 2024)) étaient remplacés par des granulats de béton ou mixte, une part d'environ 15% des granulats de béton disponibles annuellement, respectivement d'environ 30% des granulats mixtes disponibles annuellement, pourrait être valorisée dans la production de clinker.

4.2 Potentiel en tant que matériau neutre en CO₂

4.2.1 Granulats de béton fraction fine 0 – 4 mm

En supposant que les granulats de béton étudiés proviennent d'un béton de construction standard, il est possible d'estimer grossièrement le potentiel d'économie de CO₂ lié à la substitution de matière première en cimenterie (Figure 10). Dans 1 tonne de béton, environ 150 kg de ciment sont liés (jusqu'au double, selon la sorte). Ce ciment est composé d'environ 60% de CaO, ce qui permet de compter sur environ 90 kg de CaO provenant du ciment pour 1 tonne de béton (indépendamment de la composition chimique des granulats de béton, car les granulats de roche apportent également du CaO (principalement lié au carbonate) dans le système chimique). Le CaO du ciment est entièrement carbonaté par l'hydratation et la carbonatation spontanée pendant le stockage et dans le moulin cru de la cimenterie jusqu'à son utilisation comme matériau cru pour la fabrication de clinker. Lors de la cuisson de la farine crue, le CO₂ absorbé est à nouveau libéré. 90 kg de CaO produisent ainsi des émissions d'environ 71 kg de CO₂. Cette

quantité de CO₂ peut être considérée comme neutre sur le plan climatique, car il s'agit d'une fixation et d'une libération à court terme de CO₂ neutre dans l'atmosphère (voir la section sur les matières premières neutres en CO₂ au chapitre 1). Pour des raisons techniques de bilan de masse du côté de l'inventaire suisse du CO₂, la carbonatation partielle de la façade du bâtiment, qui a lieu pendant la durée de vie du bâtiment, ne peut toutefois pas être comptabilisée comme matériau de construction climatiquement neutre, car cette part est déjà comptabilisée différemment dans l'inventaire suisse du CO₂. Cette part est estimée de manière conservatrice à environ 20%. Les 80% restants des 71 kg de CO₂, soit 57 kg de CO₂, devraient toutefois pouvoir être comptabilisés comme climatiquement neutres par tonne de granulats de béton utilisée.

Ainsi, avec un scénario de substitution de 15% des matières premières du ciment par des granulats de béton fins, on obtient une quantité d'environ 735'000 tonnes de granulats de béton qui pourraient être utilisées chaque année dans les cimenteries suisses. 42'000 tonnes de CO₂ géogène pourraient être remplacées par du CO₂ neutre pour le climat, ce qui représente un potentiel d'économie de CO₂ d'environ 42'000 tonnes de CO₂. Cela correspond à 2,5% de l'ensemble des émissions de CO₂ géogènes causées chaque année par la calcination du matériau brut dans l'industrie suisse du ciment.

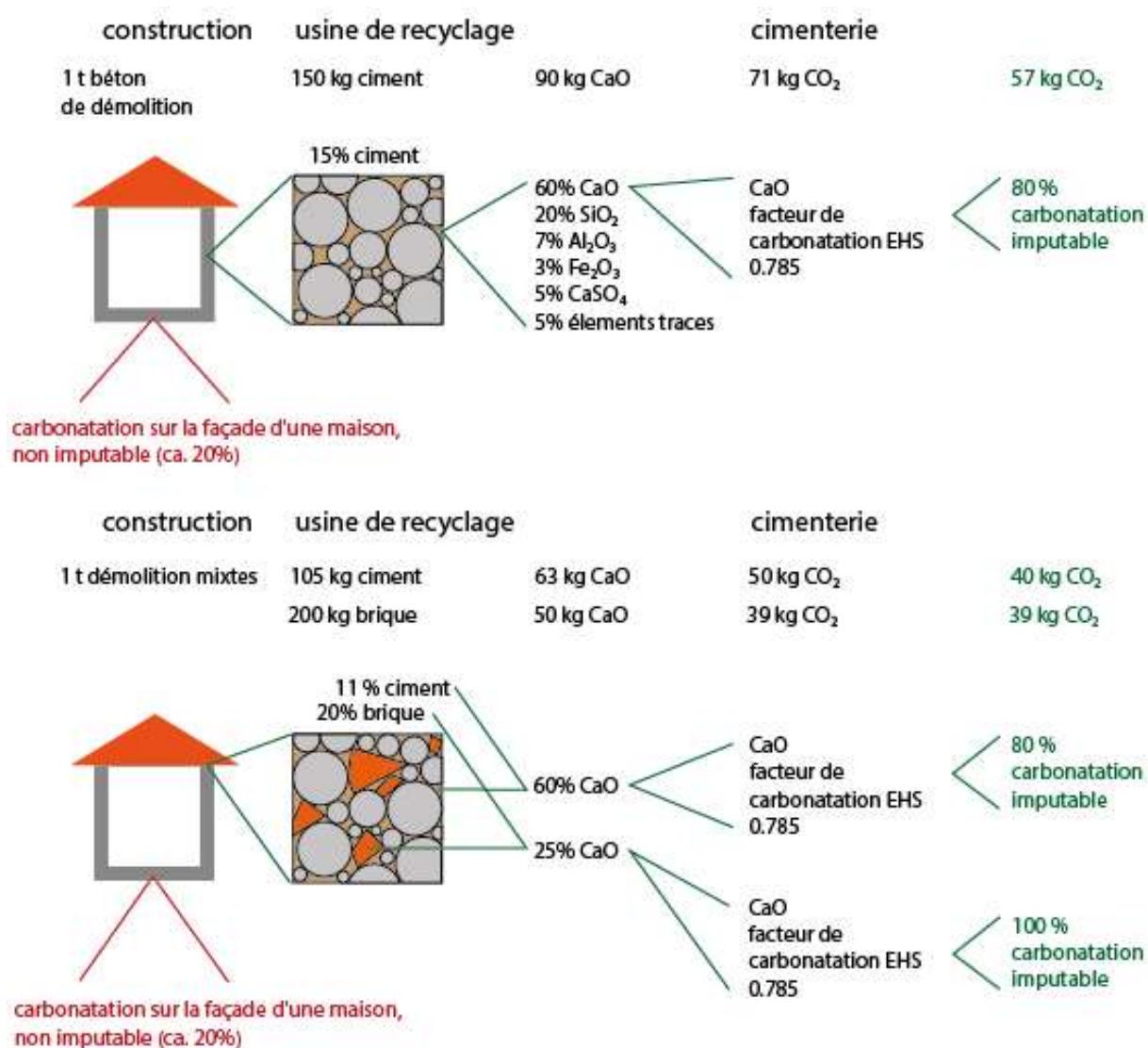


Figure 10: : Représentation schématique de la déduction du potentiel de CO₂ neutre pour le climat à partir de granulats de béton (en haut) et de granulats mixtes (en bas).

4.2.2 Granulats mixtes fraction fine 0 – 8 mm

Le calcul est légèrement différent pour les déchets de démolition non triés (Figure 10). En supposant que les déchets de démolition non triés se composent de 70% de béton, de 20% de briques et d'environ 10% de granulats naturels (estimation selon Rubli, 2020), et que la composition chimique des briques présente une part de CaO de 25% (estimation selon Kündig, 1997), la substitution du matériau cru (et donc du CO₂ géogène) par 15% de granulats mixtes entraîne un potentiel d'économie de CO₂ d'environ 58'000 tonnes de CO₂. Cela correspond à 3,5% de l'ensemble des émissions de CO₂ géogènes produites chaque année par la calcination du cru dans l'industrie suisse du ciment.

4.3 Valorisation en tant qu'agent de mouture

En 2018, Holcim (Suisse) SA a lancé sur le marché «Susteno 4» un ciment suisse certifié composé de clinker de ciment Portland, de granulats mixtes, de schiste bitumineux calciné et de gypse (Holcim Schweiz, 2023). Dans ce cas, la fraction fine de 0 à 8 mm du granulat mixte est valorisée. Chaque année, environ 125'000 tonnes de Susteno (année de référence 2020, tendance à la hausse) sont utilisées avec une part de 20% (25'000 tonnes) de granulats mixtes (Holcim Suisse, 2023). Cette quantité de fraction fine de granulats mixtes actuellement valorisée comme matériau d'apport correspond à environ 1% de la quantité de granulats mixtes disponible chaque année en Suisse. Si l'ensemble du ciment produit en Suisse (env. 4 millions de tonnes (cemsuisse, 2024)) contenait 20% de granulats mixtes, cela consommerait environ 35% de la quantité de granulats mixtes disponible.

5 Résumé

En résumé, les données recueillies permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Dans aucune des installations échantillonées, un pré-criblage n'est effectué de manière standard lors de la préparation à sec. Dans certaines installations, il est effectué de manière isolée pour des matériaux de moindre qualité, afin de séparer la part élevée de fines.
- Les qualités chimiques des granulats de béton sont très comparables malgré des zones d'apport et des tailles d'installation différentes. On constate cependant que la lithologie des granulats détermine de manière déterminante la composition chimique des granulats de béton. Sur le plan chimique, on ne constate guère de différence entre le pré-criblage et la fraction fine de 0 à 4 mm. Les qualités chimiques des granulats mixtes sont également très comparables, malgré des zones d'apport et des tailles d'installation différentes. Les différentes qualités se distinguent à peine par la composition des éléments principaux.
- En ce qui concerne les teneurs en métaux lourds, toutes les qualités de granulats de béton et mixtes analysées ainsi que le pré-criblage respectent les valeurs limites de l'OLED pour une valorisation en tant que substitut de matière première et agent de mouture.
- La composition minéralogique des granulats de béton et des granulats mixtes est très similaire. La minéralogie est dominée par les minéraux principaux que sont le quartz, les feldspaths, les carbonates et les phyllosilicates ainsi que, de manière isolée, le gypse et la portlandite. En tendance, la part amorphe est plus élevée dans les granulats mixtes que dans les granulats de béton, ce qui est dû aux composants en céramique.
- La majorité des fractions fines des granulats mixtes analysées sont inférieures à la valeur limite pour les décharges de type B en ce qui concerne les polluants organiques peu volatils. Seuls deux échantillons présentent des valeurs élevées : l'un dépasse la valeur limite pour le benzo(a)pyrène et les HAP, l'autre pour les PCB. Les données sont comparables à la compilation des polluants organiques dans le rapport sur la valorisation des déchets de démolition mixtes en Suisse (Rubli, 2020). Dans les deux séries de données, les valeurs élevées se retrouvent en particulier dans les HAP et les PCB. Cependant, contrairement à ce qui était attendu, les échantillons actuels n'ont pas révélé de valeurs généralement élevées dans les échantillons du pré-criblage. De manière

générale, il s'avère que la plupart des échantillons issus du traitement à sec respectent les exigences en matière de polluants organiques pour la valorisation en cimenterie ainsi que pour le stockage dans des décharges de type B.

- Au total, 15 composés per- et polyfluoroalkylées (PFAS) ont été détectés dans les matières solides des granulats mixtes. Dans la plupart des cas, les valeurs ne dépassent toutefois que de peu la limite de détermination de 0,1 µg/kg. Au total, 22 des 30 substances PFAS recherchées ont été détectées dans le lixiviat. Si l'on évalue les PFAS détectés à l'aide de la somme des 9 valeurs en équivalent matière sèche, on constate des valeurs moyennes de 0,4 µg m.s./L (L/S 10), respectivement des valeurs moyennes de 1,2 µg m.s./L (L/S 2). La comparaison des concentrations de PFAS dans les solides et les lixiviats indique que la plupart des PFAS sont fortement mobilisables dans les solides, ce qui laisse un potentiel d'émission considérable de PFAS à partir des granulats mixtes.
- La fraction fine des granulats mixtes et de béton présente une composition similaire à celle de la marne. Le potentiel de substitution des matières premières est cependant limité par le module silicique élevé des deux granulats. Une substitution de matière première d'environ 15% est cependant considérée comme réaliste, à condition que suffisamment d'agents de correction soient disponibles. Si, dans toutes les cimenteries suisses, 15% du mélange annuel de matières premières étaient remplacés par des granulats de béton ou mixtes, une part d'environ 15% (granulats de béton) ou 30% (granulats mixtes) pourrait être valorisée dans la production de clinker par rapport à la quantité annuelle de béton ou de démolition non trié.
- Une substitution de 15% du mélange de clinker brut par des granulats de béton ou mixte aurait le potentiel de réduire les émissions géogènes de CO₂ dans la production de clinker d'environ 2,5% (granulats de béton), respectivement d'environ 3,5% (granulats mixtes).
- La fraction fine de 0 à 8 mm des granulats mixtes est déjà mélangée au ciment comme matériau de substitution du clinker à hauteur de 20%. Ainsi, environ 1% de la démolition non trié est déjà utilisé comme agent de mouture. Si l'ensemble du ciment produit en Suisse contenait 20% de granulats mixtes, cela représenterait environ 35% de la quantité disponible de déchets de démolition mixtes.

6 Conclusion et perspectives

La présente étude a permis de dresser un inventaire complet des qualités matérielles des fractions fines de granulats de béton et mixtes issus du traitement conventionnel. Cela permet, d'une part, d'estimer le potentiel de valorisation en cimenterie et, d'autre part, d'évaluer le potentiel de pollution en cas de stockage dans une décharge de type B. En ce qui concerne le potentiel de valorisation en cimenterie, il s'avère que les fractions fines des granulats de béton et mixtes présentent un potentiel de valorisation en tant que substitut de matière première. Bien que les granulats de béton et mixtes présentent un facteur de saturation en chaux relativement bas et soient donc plutôt de qualité marneuse, leur utilisation en cimenterie offre un potentiel d'économie de CO₂ dans la production de clinker. D'autres économies de CO₂ dans la production de ciment peuvent être réalisées en utilisant ces granulats comme agent de mouture. Cependant, compte tenu des quantités de déchets existants, de simples calculs de bilan de masse optimisants cette filière, montrent que la valorisation en cimenterie, , permet une valorisation partielle du flux total, elle constitue donc un bon complément à la valorisation déjà établie en tant que granulats recyclés. Du point de vue industriel, il serait intéressant, dans une prochaine étape, de comparer les deux voies de valorisation, cimenterie et béton, sur le plan de l'écologiques, techniques et économique, afin d'établir une hiérarchie de valorisation. L'OLED n'a pas établi de hiérarchie pour la valorisation des matériaux. Il doit exister différentes possibilités de valorisation.

Les données obtenues constituent en outre une base de données de référence précieuse sur le statu quo du traitement conventionnel, à laquelle peuvent être comparées les données expérimentales sur le traitement sélectif des déchets de béton et de la démolition non trié (récupération de la pâte de ciment).

Dans ce contexte, il serait intéressant d'étudier dans une étape ultérieure le fractionnement de la composition chimique en fonction de la diminution de la taille des grains. Selon les hypothèses, la pâte de ciment riche en CaO devrait s'accumuler dans les fractions les plus fines et la teneur en CaO devrait augmenter avec la diminution de la taille des grains, ce qui augmenterait l'attrait d'une valorisation comme substitut de matière première dans les cimenteries.

En outre, les données collectées ont permis de rassembler une première base de données sur le potentiel de pollution et d'émission des PFAS dans les granulats mixtes. Les données montrent que les PFAS sont certes présents, mais en faible quantité dans les matières solides. En raison de leur forte mobilité et du fait que les décharges de type B ne sont généralement pas étanches, les PFAS doivent néanmoins faire l'objet d'études plus approfondies. Sur la base des résultats de cette étude, l'OFEV et le cercle déchets doivent maintenant prendre des mesures supplémentaires pour étudier plus précisément l'origine des PFAS dans les déchets de démolition non triés. Une possibilité de collecte de données détaillées avec, par exemple, Polludoc comme partenaire est en cours de discussion. En outre, il convient d'examiner de plus près l'élimination des HAP dans le cadre du traitement des déchets de démolition non triés.

7 Références

- Bundesamt für Umwelt BAFU, 2024. Konzentrationswerte für Stoffe , die nicht in Anhang 1 oder 3 AltIV enthalten sind 1–7.
- Bundesamt für Umwelt BAFU, 2023. Verwertung mineralischer Rückbaumaterialien - Ein Teil des Moduls Bauabfälle der Vollzugshilfe zur Verordnung über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA).
- cemsuisse, 2024. Jahresbericht 2023.
- Hiltbrunner, D., 2017. Das Bauwerk als Rohstofflager. Swiss Bull. Appl. Geol. 22, 65–69.
- Holcim Schweiz, 2023. Erfolgreiche Transformation - Integrierter Geschäftsbericht 2022.
- Kündig, R., 1997. Die mineralischen Rohstoffe der Schweiz. Schweizerische Geotechnische Kommission.
- Locher, F.W., 2000. Zement - Grundlagen der Herstellung und Verwendung. Verlag Bau + Technik GmbH, Düsseldorf.
- Matasci, C., Gauch, M., Böni, H., 2019. Material - und Energieflüsse der schweizerischen Volkswirtschaft 89.
- Rubli, S., 2020. Mischanbruchverwertung in der Schweiz - Schlussbericht 2020.
- Rubli, S., Bruppacher, A., Rubli, D., 2017. Umweltleistungen von Bauschuttaufbereitungsanlagen (BSAA) 87.
- Schweizerischer Bundesrat, 2015. Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA) 1–46.
- Weibel, G., 2024. PFAS in Massenabfällen.
- Wolffers, M., Häseli, U., Dörfler, P., Weibel, G., Eggenberger, U., 2023. Mineralische Abfälle als CO₂ - neutrale Rohmaterialien in der Klinkerproduktion, in: Thomé-Kozmiensky (Ed.), Berliner Konferenz Mineralische Nebenprodukte Und Abfälle. Thomé-Kozmiensky.