



FRICHE FRAISEN

SMCI – BESANÇON

Rapport échantillonnage et caractérisation

PROJET 10416

26/04/2023

SOMMAIRE

SOMMAIRE	2
1. INTRODUCTION	3
Contexte du projet.....	3
AMO économie circulaire	4
2. PRESENTATION GENERALE DU SITE	5
Niveau 0	6
Niveau 1	7
3. HYPOTHESES – QUANTITES DE BETON.....	8
4. LOCALISATION DES PRELEVEMENTS	8
Prélèvements béton – Dalle.....	8
Prélèvements beton – Murs intérieurs.....	8
5. MESURES.....	8
6. PRELEVEMENTS BETON	9
Niveau 0	10
Niveau 1	11
7. CARACTERISATION DES MATERIAUX.....	12
Los Angeles.....	13
Micro-Deval.....	13
Fraction 0-4 mm	14
Granularité	14
Sulfates solubles dans l’eau	14
Masse volumique	14
Valeur en bleu de méthylène	15
Fraction 4-20 mm	15
Granularite	15
Sulfates solubles dans l’eau	16
Masse volumique	16
Temps de prise au ciment	16
Coefficient d’aplatissement	16
Soufre total	17
Résistance gel-dégel.....	17
Synthèse	18



1. INTRODUCTION

CONTEXTE DU PROJET

SMCI est un promoteur immobilier historique de Besançon depuis plus de 80 ans. Le projet de reconversion de l'ancienne friche industrielle Fralsen-Timex dans le quartier des Tilleroyes à Besançon est particulièrement innovant. Il s'agit du plus grand site industriel couvert du Grand Besançon Métropole.



Figure 1 - Vue satellite de la friche de Fralsen

Ouverte en 1962 l'ancienne usine horlogère de 48 000 m² de surface de plancher sera transformée d'ici 2026 en un lieu expérimental de régénération urbaine et environnementale dont l'objectif est d'enclencher la transition écologique en imaginant divers usages : 200 logements, une ferme urbaine irriguée par les eaux pluviales stockées sur site, une ferme solaire, des services et de l'industrie intégrés harmonieusement dans un écosystème économiquement viable, vertueux et à des terres cultivées.



Figure 2 - Projections 3D pour la réhabilitation de la friche

AMO ECONOMIE CIRCULAIRE

SMCI a mandaté Neo-Eco, bureau d'études en économie circulaire, afin d'identifier les exutoires les plus vertueux environnementalement et économiquement pour les déchets de la démolition du site existant.

L'objet de ce document est d'évaluer le potentiel de valorisation des matériaux par la méthodologie suivante :

- Audit qualitatif et échantillonnage des matériaux présents sur site
- Caractérisation des bétons et conclusion sur le potentiel de recyclage en granulats de type 1
- Recherche de filières pour les autres flux de déchets triés

- Cahier des charges de déconstruction sélective

Remarque : en l'absence de diagnostic PEMD réalisé, l'AMO économie circulaire a évalué sur la base des plans fournis et des relevés réalisés sur site les tonnages de matériaux présents sur site. Ces quantités sont données à titre indicative et n'engagent en rien la responsabilité de l'AMO.

2. PRESENTATION GENERALE DU SITE

Le site industriel Fralsen est situé 7B rue Denis Papin, à Besançon. Il est composé d'un bâtiment sur deux niveaux : le niveau 0 partiellement enterré pour compenser la pente naturelle du terrain et le niveau 1.

La structure et les fondations sont en béton. La toiture est constituée d'un bac acier et d'une étanchéité soutenue par une charpente métallique.

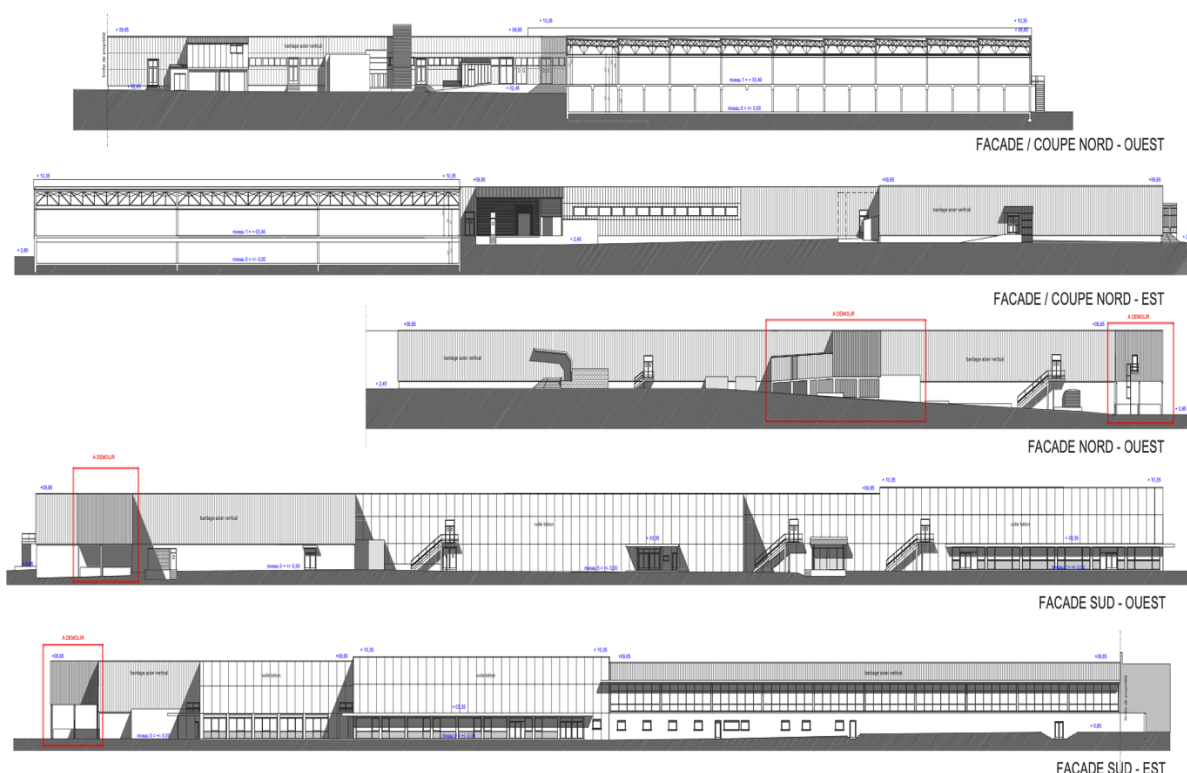


Figure 3 – Façades extérieures du bâtiment

Les parties à déconstruire sont indiquées encadrées en rouge sur les plans des niveaux. La démolition se fait le long des joints de dilatation existants :

- 4 000 m² au niveau 0
- 12 000 m² au niveau 1

Les zones remplies en noir correspondent aux vides-sanitaires sous le niveau 1.

NIVEAU 0

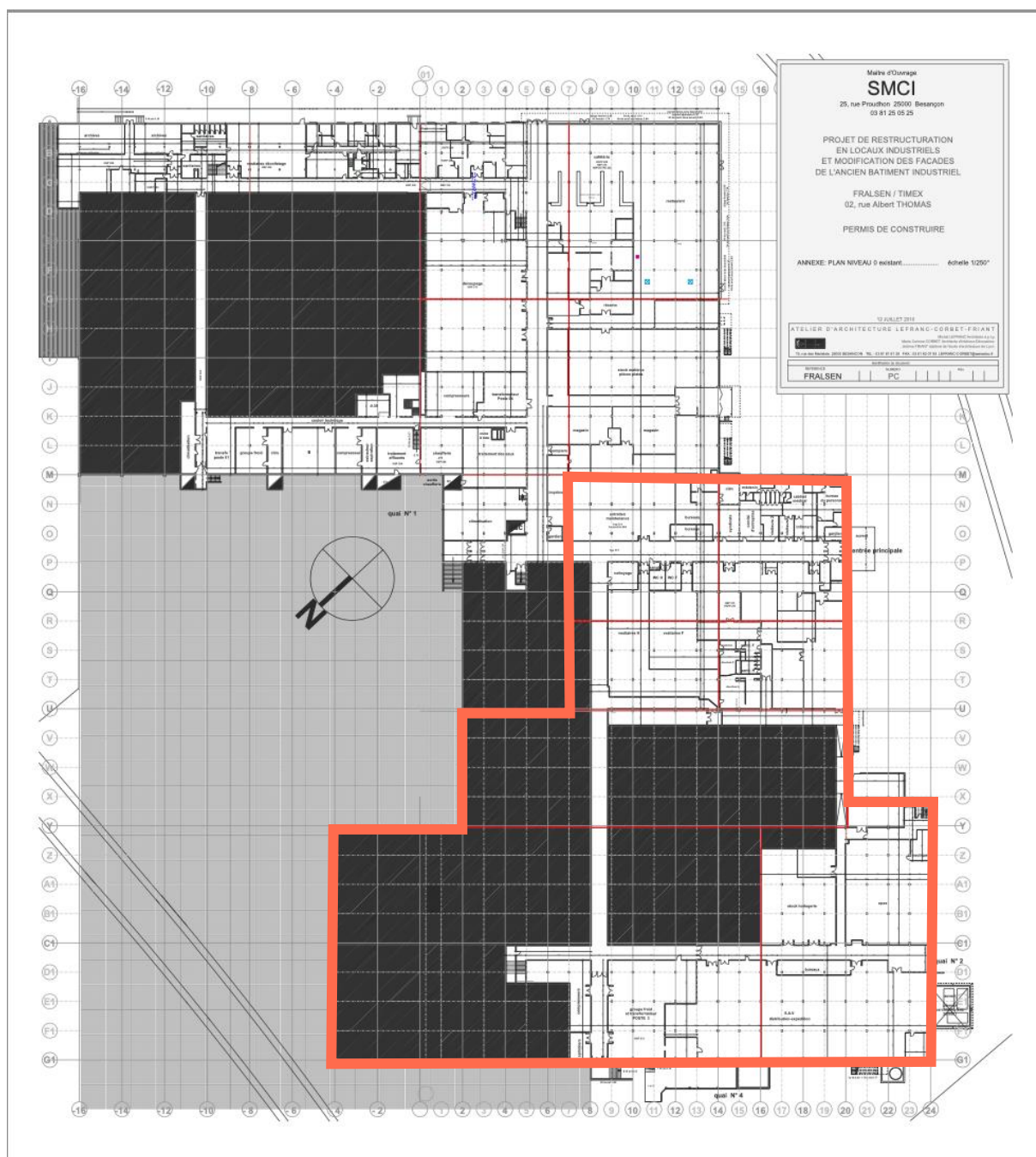


Figure 4 - Plan du niveau 0 existant

NIVEAU 1

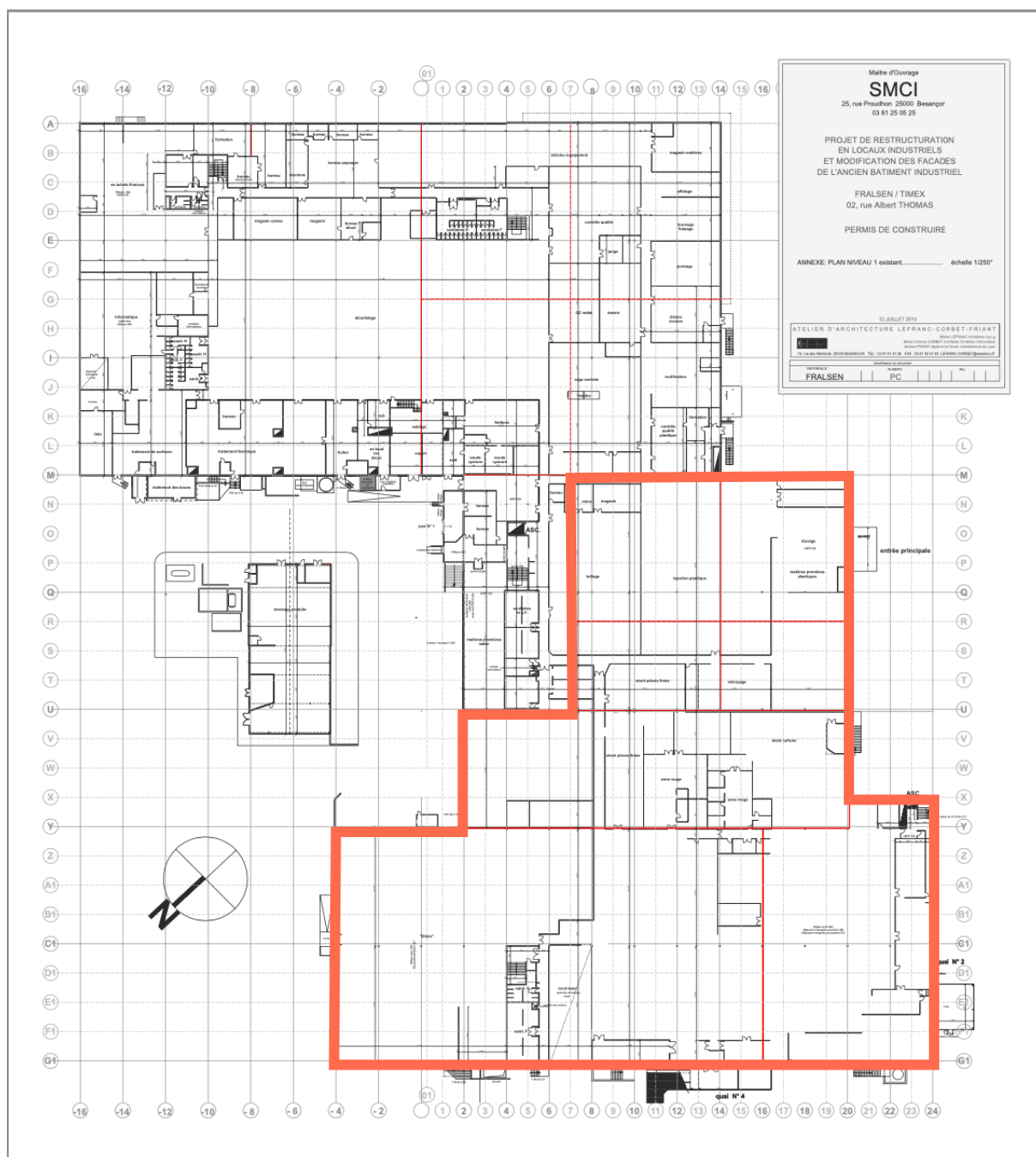


Figure 5 - Plan du niveau 1 existant

Ce document a pour but de décrire la procédure d'échantillonnage à mettre en place afin d'évaluer le potentiel des matériaux. Ces prélèvements permettront par la suite la caractérisation des matériaux et la définition des différentes utilisations possibles.

3. HYPOTHESES – QUANTITES DE BETON

Tableau 1 - Estimation des quantités de béton

Eléments	Masse (Tonnes)	Proportion (%)
Dalle béton Niv 0	1840	12
Dalle béton Niv 1	8280	56
Poutres et poteaux	1080	7
Fondations	3700	25
Total	14850	100

4. LOCALISATION DES PRELEVEMENTS

PRELEVEMENTS BETON – DALLE

Tableau 2 - Prélèvements effectués sur la dalle du bâtiment

Matière à prélever	Béton		
Masse totale à prélever (kg)	100		
Localisation des prélèvements	Niveaux	Nombre de carottes	Masse (kg)
	0 et 1	5	20
			16
			12
			32
			20
Modalités complémentaires	Retirer le revêtement de sol plastique		

PRELEVEMENTS BETON – MURS INTERIEURS

Tableau 3 - Prélèvements effectués sur les murs intérieurs du bâtiment

Matière à prélever	Béton		
Masse totale à prélever (kg)	20		
Localisation des prélèvements	Niveaux	Nombre de carottes	Masse (kg)
	0	1	20
Modalités complémentaires	Retirer l'enduit plâtre et le flocage		

5. MESURES

L'opération de prélèvement permettra de prendre les mesures suivantes :

Tableau 4 - Mesures envisagées des éléments bétonnés

Eléments	Localisation	Nature	Epaisseur mesurée
----------	--------------	--------	-------------------

Épaisseur des dalles	N0 – Entrée	Béton avec chape ciment	25 cm
Épaisseur des dalles		Béton avec chape ciment	20 cm
Épaisseur des dalles	N0 – Circulations	Béton avec ragréage plastique (a)	15 cm
Épaisseur des dalles		Béton avec chape ciment (d)	40 cm
Épaisseur des dalles	N1 – Cage d'escalier	Béton avec sols souples	30 cm
Épaisseur et nature des refends intérieurs	N0 – Entrée	Béton avec enduit plâtre (b)	15 cm
Épaisseur et nature des refends intérieurs	N0 – Circulations	Béton avec flocage (c)	15 cm

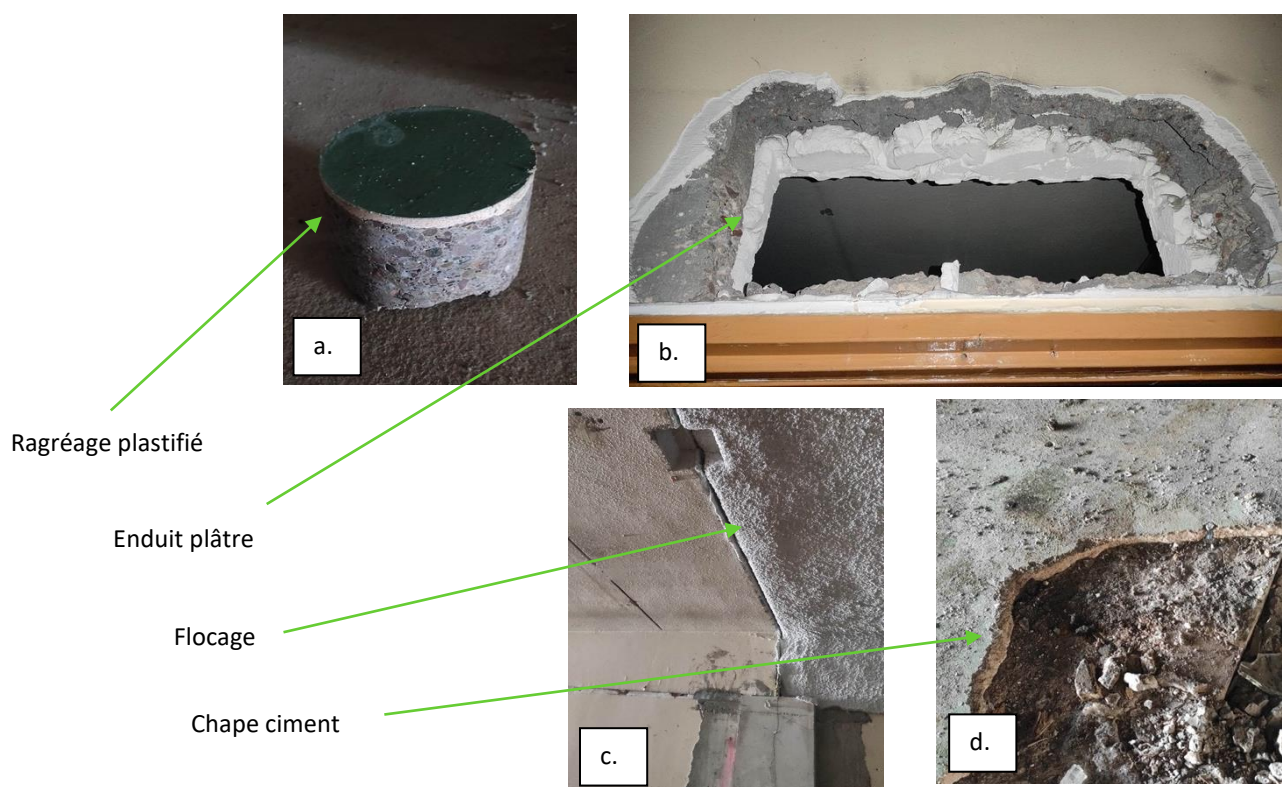
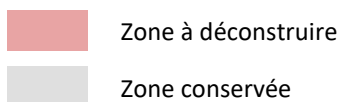


Figure 6 - Photos des éléments bétonnés

6. PRELEVEMENTS BETON

- ✕ Prélèvements réalisés dans la dalle béton
- ✕ Prélèvements réalisés dans les murs béton
- ✕ Sondages épaisseur et nature des matériaux (photographies a., b., c. et d.)



NIVEAU 0

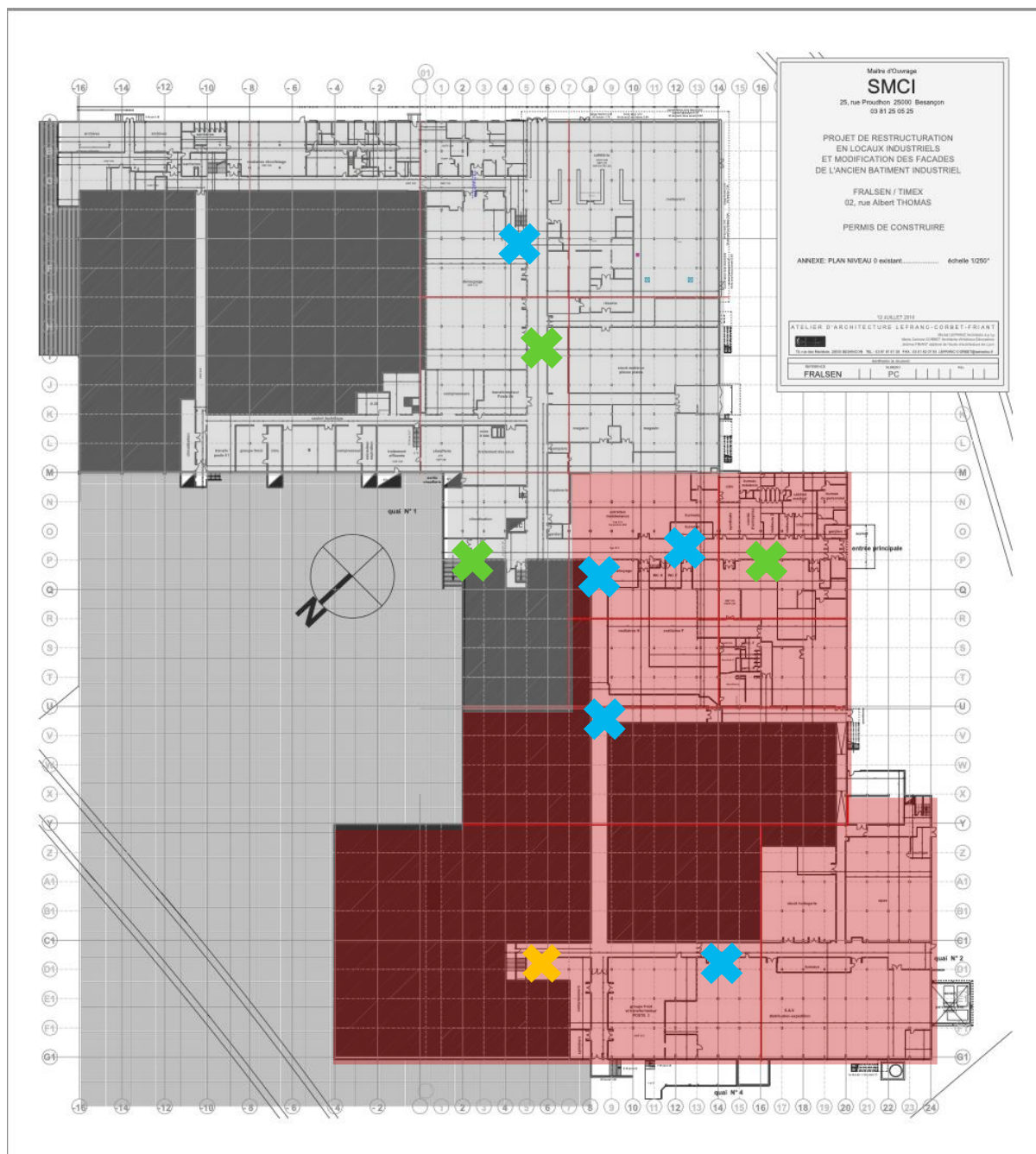


Figure 7 - Plan du niveau 0 existant – Emplacement des prélèvements

NIVEAU 1

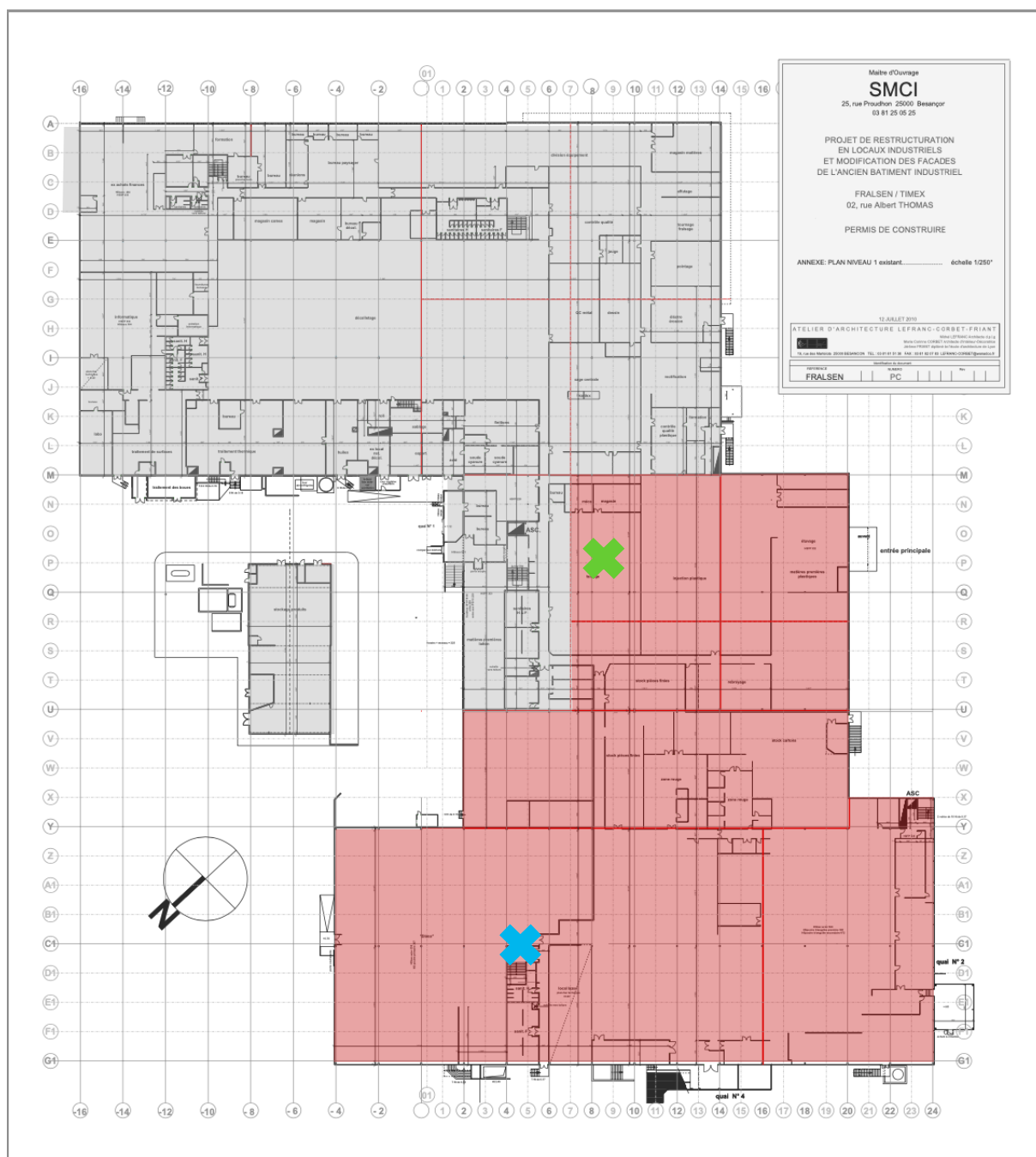


Figure 8 - Plan du niveau 1 existant – Emplacement des prélèvements

7. CARACTERISATION DES MATERIAUX

A noter que cette version est préliminaire et sera amenée à évoluer. Le rapport d'analyses final doit être reçu semaine 19, et une clarification du laboratoire concernant la masse volumique est nécessaire.

Les carottes prélevées ont été concassées et criblées pour obtenir une fraction 0-4 mm (sable) et une seconde 4-20 mm (granulat).

Ci-dessous sont regroupés les résultats communiqués par le laboratoire d'analyses.

Tableau 5 - Extrait du rapport d'analyse – Fraction 0-4 mm

Fraction 0-4mm SABLE

Coefficient Los Angeles (LA)	36
Coefficient micro-Deval (MDE)	19
Masse volumique en vrac (T/m ³)	1,19
Valeur bleu méthylène (VBS) (g/100g)	<0,1
Sulfates solubles dans l'eau (IC) (% m/m)	0,22
Classification sol	A3 – Gravels Silteuses

Tableau 6 - Extrait du rapport d'analyse – Fraction 0-20 mm

Fraction 4-20mm GRANULAT

Coefficient Los Angeles (LA)	36
Coefficient micro-Deval (MDE)	19
Teneur en alcalins actifs (ICP-AES) (% m/m)	0,0345
Chlorures solubles dans l'eau (%)	0,096
Masse volumique en vrac (T/m ³)	1,09
Coefficient d'aplatissement (%)	7
Résistance au gel-dégel (F) (perte masse en %)	7,6
Essai de classification	Rc 100%
Influence sur le temps de début de prise (A) (min)	-4,0
Sulfates solubles dans l'eau (IC) (% m/m)	0,12
Absorption d'eau (avec fines) (%)	6
Teneur en soufre total (ICP-AES) (%)	0,1
Teneur en eau (%)	4,2

Pour l'analyse des résultats, nous nous baserons sur un récapitulatif des valeurs seuils de codification du béton, extraites des normes en vigueur, évoquées dans les tableaux ci-dessous :

Tableau 7 - Récapitulatif de valeurs seuils pour la caractérisation du béton

Essai	Normes	Code	Valeur seuil
Masse volumique	NF EN 1097-6	A	X
		B	≥2,0 t/m ³
		C	≥2,0 t/m ³
		D	≥1,7 t/m ³
Temps de prise au ciment (Influence sur le temps de début de prise)	NF EN 1744-6	A	X
		B	20min
		C	40min
		D	> 40min
Los Angeles	NF EN 1097-2	A	30
		B	40
		C	40

		D	50
Sulfates solubles dans l'eau	NF EN 1744-1 art.10.2	A	X
		B	0,30%
		C	0,30%
		D	0,70%
Coefficient d'aplatissement	NF EN 933-3	A	20
		B	35
		C	35
		D	50
Soufre total (en S)	NF EN 1744-1 article 11	A	1%
		B	1%
		C	1%
		D	X

LOS ANGELES

Principe :

L'essai consiste à évaluer la résistance des granulats à la fragmentation. Pour cela, la dureté du matériau est testée en le soumettant à une épreuve de chocs dans un tambour (effectuant 500 tours à une vitesse de rotation comprise entre 31 et 33 tours/min) et comprenant des boulets d'acier normalisés. La friction des granulats entre eux, ainsi que les granulats contre les boulets et les parois du tambour provoque leur dégradation.

L'échantillon est ensuite retiré, puis lavé au-dessus d'un tamis (maille 16 mm). On pèse le refus après séchage (M1). Le coefficient Los Angeles est le pourcentage en masse du rapport des éléments passant au tamis 1,6 mm séchés après lavage et la masse sèche initiale (M0) des granulats intacts. La formule est la suivante : $LA = \frac{M0-M1}{M0} \times 100$

Résultats :

Le résultat de l'essai **Los Angeles** est de **36**.

La valeur du Los Angeles est comprise entre 30 et 40, ainsi les granulats sont classés en **catégorie B**.

MICRO-DEVAL

Principe :

L'essai détermine le coefficient Micro-Deval, qui représente le pourcentage de l'échantillon initial réduit à une taille inférieure à 1,6 mm au cours de la rotation. L'essai consiste à mesurer l'usure produite par le frottement entre les granulats et par une charge abrasive dans un cylindre rotatif. Lorsque la rotation est terminée, le pourcentage refusé sur un tamis de 1,6 mm est utilisé pour calculer le coefficient Micro-Deval.

Le coefficient Micro-Deval (MDE) est calculé avec la formule :

$$MDE = \frac{500 - m}{5}$$

Avec : m, la masse de la fraction refusée au tamis de 1,6 mm, en grammes.

Résultats :

Le résultat de l'essai **Micro-Deval** est de **19**.

FRACTION 0-4 MM

GRANULARITE

Principe :

L'essai consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol, une fois séché, au moyen d'une série de tamis et à peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis (partie du matériau ne passant pas à travers le tamis). La masse de refus cumulée sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse.

Résultats :

Tableau 8 : Effectif cumulé croissant des tamis à ouverture croissante (fraction 0-4 mm)

Ouverture (mm)	0,08	0,10	0,125	0,20	0,25	0,315	0,50	0,80	1	2
Tamisât (%)	5,6	6	7	10	12	15	22	34	40	66

4	5	6,3	8	12,5	16	20	31,5	40	50	63	80
99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

$D_{\max} = 5,0 \text{ mm} \leq 50 \text{ mm}$ donc le matériau appartient à la catégorie des matériaux fin de déconstruction.

- Tamisât à 0,08 mm est de 5,6 %.
- Tamisât à 2 mm est de 66 %.

En se basant sur le guide SETRA précédemment évoqué, et en complément de la valeur en bleu de méthylène, la classification de la **fraction 0-4 mm** est **D₂**.

SULFATES SOLUBLES DANS L'EAU

Principe :

L'essai consiste à extraire les ions sulfate solubles dans l'eau d'un granulats. La teneur en sulfate soluble dans l'eau est déterminée par précipitation, à pH compris entre 1 et 1,5, par une solution de chlorure de baryum à ébullition.

La détermination est ensuite achevée par gravimétrie et la teneur en ion sulfate est exprimée en pourcentage en masse du granulats. La teneur en sulfate soluble du granulats est exprimée en pourcentage grâce à la formule suivante : $SO_{4 \text{ soluble}} = 2 \times W \times 0,343 \times m_3$

Avec :

m_3 : la masse du précipité de sulfate de baryum (en g)

W : le rapport eau/grulats (g/g)

Résultats :

La teneur en **sulfates dans l'eau** est de **0,22 %SO₄** pour la fraction 0-4 mm. On peut conclure que le béton étudié est de **catégorie B**.

MASSE VOLUMIQUE

La masse volumique en vrac, autrement appelée masse volumique apparente, représente la masse de produit pour un volume donné tout en considérant les espaces présents entre les particules.

La valeur pour la fraction 0-4 mm est de **1,19 T/m³**.

VALEUR EN BLEU DE METHYLENE

Principe :

Cet essai a pour objectif de déterminer la propreté d'un matériau en évaluant sa teneur en argile.

L'essai consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par le matériau mis en suspension dans l'eau. Cette quantité est rapportée par proportionnalité directe à la fraction 0/50 mm du sol. La valeur de bleu du sol est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol.

Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu de méthylène et en contrôlant l'adsorption après chaque ajout. Pour ce faire, on prélève une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre, ce qui provoque la création d'une tâche. L'adsorption maximale est atteinte lorsqu'une auréole bleu clair persistante apparaît à la périphérie de la tâche.

La valeur au bleu de méthylène, lorsque D_{\max} est inférieur à 5 mm, est trouvée grâce à la formule suivante : $VBS \text{ (en g pour 100 g de matériau)} = \frac{B}{m_0} \times 100$.

La valeur au bleu de méthylène, lorsque D_{\max} est supérieur à 5 mm, est trouvée grâce à la formule suivante : $VBS \text{ (en g pour 100 g de matériau)} = \frac{B}{m_0} \times 100 \times C$

Avec : $m_0 = \frac{m_{h1}}{1 \pm W}$ et $m_0 = \frac{m_{h2} - m_{s2}}{m_{s2}}$

$B = 0,01 X$

$C = \text{Proportion de la fraction [0 – 5mm]} \text{ dans la fraction [0 – 50mm] du matériau sec}$

Résultats :

Le résultat de la **VBS** est **inférieur à 0,1 g** de bleu pour 100 g de matériau sec.

FRACTION 4-20 MM

GRANULARITE

Tableau 9 : Effectif cumulé croissant des tamis à ouverture croissante (fraction 0-20 mm)

Ouverture (mm)	0,063	0,08	0,10	0,125	0,20	0,25	0,315	0,50	0,80	1	2
Tamisat (%)	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

4	5	6,3	8	10	12,5	14	16	20	31,5	40	50	63	80
2	7	13	23	35	54	66	83	99	100	100	100	100	100

$D_{\max} = 31,5 \text{ mm} \leq 50 \text{ mm}$ donc le matériau appartient à la catégorie des matériaux fin de déconstruction.

- Tamisât à 0,08 mm est de 0,1 %.
- Tamisât à 2 mm est de 0 %.

En se basant sur le guide SETRA précédemment évoqué, et en complément de la valeur en bleu de méthylène, la classification de la **fraction 4-20 mm** est **D₂**.

SULFATES SOLUBLES DANS L'EAU

La teneur en sulfates dans l'eau est de **0,12 %SO₄** pour la fraction 4-20. Ainsi le béton étudié est de **catégorie B**.

MASSE VOLUMIQUE

La mesure pour la fraction 4-20 mm est **1,09 T/m³**.

TEMPS DE PRISE AU CIMENT

Principe :

L'essai permet de déterminer l'influence sur le temps de début de prise au ciment, des constituants solubles dans l'eau contenus dans les granulats recyclés. Le but est de mesurer le temps de prise du liant hydraulique (ciment).

Une prise d'essai du granulat recyclé est mélangée avec de l'eau pour extraire les constituants hydrosolubles dans un extrait. Le temps de prise initial de la pâte de ciment préparée avec l'extrait est comparé au temps de prise initial de la même pâte de ciment préparée avec de l'eau déminéralisée.

L'influence A induite par l'extrait de granulat en termes de différence, en minutes, entre les temps de prise initiaux, est donnée par l'équation suivante : $A = t_w - t_e$

Avec :

t_w : le temps de prise initial de la pâte de ciment/eau déminéralisée

t_e : le temps de prise initial de la pâte de ciment/extrait aqueux

L'influence A est exprimée en minutes. Si A est négatif, l'effet est retardateur et si A est positif, il y a un effet accélérateur.

La consistance normalisée du ciment avec de l'eau déminéralisée est obtenue pour une pâte de ciment préparée avec 450 g de ciment et 225 g d'eau.

Résultats :

Le **temps de prise au ciment** de l'échantillon de granulats recyclés testé est de **-4 min**, il induit un effet retardateur sur le temps de prise initial.

Le temps de prise au ciment étant inférieur à 20 min, les granulats sont classés **catégorie B**.

Attention cet essai est peu fiable et n'est pas totalement représentatif de la réalité. En effet, une incertitude de ± 5 min sur le temps est à prendre en compte d'après les résultats d'essai. De plus, l'essai est peu reproductible et varie beaucoup selon les conditions atmosphériques lors de l'essai même lors du respect strict des conditions indiquées dans la norme. On peut avoir des résultats qui varient jusqu'à 20 min sur un même échantillon (retour d'expérience du laboratoire GEOS). Si ce résultat est le seul paramètre déclassant, il ne compromet pas complètement la classification type 1. Il faudra voir avec les centrales à béton si ce paramètre est impactant pour eux.

COEFFICIENT D'APLATISSEMENT

Principe :



L'essai consiste à effectuer un double tamisage. Tout d'abord, au moyen de tamis d'essai, l'échantillon est fractionné en différents granulats élémentaires d_i/D_i . Chacun des granulats élémentaires d_i/D_i est ensuite tamisé au moyen de tamis à barre ayant des fentes parallèles d'une largeur $D_i/2$.

Le coefficient d'aplatissement global est calculé en tant que masse totale des particules passant au travers des tamis à barre, exprimé en pourcentage du total de la masse sèche des particules faisant l'objet de l'essai.

Si nécessaire, le coefficient d'aplatissement de chaque granulats élémentaire d_i/D_i correspond au passant du tamisage sur le tamis à barre correspondant, exprimé en pourcentage de la masse de ce granulats élémentaire.

Le coefficient d'aplatissement global (FI) est calculé à partir de l'équation suivante :

$$FI = \frac{M2}{M1} \times 100$$

Avec :

$M1$: la somme des masses des granulats élémentaires d_i/D_i (en g)

$M2$: la somme des masses de passants le tamis à barre correspondant à l'écartement $D_i/2$ (en g)

Résultats :

Le résultat du **coefficient d'aplatissement** est de **7%**.

Le coefficient d'aplatissement étant inférieur à 20%, les granulats sont donc classés en **catégorie A**.

SOUFRE TOTAL

Principe :

Une prise d'essai de granulats est traitée au peroxyde d'hydrogène et à l'acide chlorhydrique pour oxyder en sulfates tous les composés de soufre présent. Les sulfates sont précipités en sulfate de baryum ($BaSO_4$) et sont pesés.

La teneur en soufre est exprimée en pourcentage et est calculée à partir de la formule suivante :

$$S = \frac{m_5}{m_4} \times 13,74$$

Avec :

m_5 : la masse du précipité (en g)

m_4 : la masse de la prise d'essai (en g)

Résultats :

La valeur obtenue en soufre total est égale à **0,1 %**, ainsi mes granulats sont classés en **catégorie A**.

RESISTANCE GEL-DEGEL

Principe :

Après avoir été imbibées d'eau à la pression atmosphérique, les éprouvettes sont soumises à 10 cycles de gel-dégel. Chaque cycle comporte un refroidissement à $-17,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ sous l'eau puis un dégel dans l'eau à une température de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. A la fin des dix cycles de gel-dégel, on examine les granulats pour rechercher d'éventuels changements (formations de fissures, perte de masse et, le cas échéant, modification de résistance).

Résultats :



La **perte de masse** après les différents cycles de gel-dégel est de **7,6 %**.

SYNTHESE

L'objectif est de vérifier la possibilité de valorisation du béton en granulats type 1. Les gravillons recyclés (4-20) peuvent plus généralement être classifiés en plusieurs types :

- Type 1 : toutes les caractéristiques définies doivent avoir code B (ou A) ;
- Type 2 : toutes les caractéristiques définies doivent avoir code B, C (ou A);
- Type 3 : toutes les caractéristiques définies doivent avoir code B, C, D (ou A).

Voici un récapitulatif des tests présentés dans les parties précédentes :

Tableau 10 - Récapitulatif des catégories identifiées pour le béton étudié

	Fraction 0-4 mm	Fraction 4-20 mm
Proportions	20,1 %	79,9 %
Granulométrie	D ₂	D ₂
Masse volumique	X	X
Temps de prise au ciment	N/A	B
Los Angeles	B	B
Sulfates solubles dans l'eau	B	B
Coefficient d'aplatissement	N/A	A
Soufre total	N/A	A

Les résultats de la caractérisation des granulats 4-20 mm sont conformes aux normes NF P 18-545 et NF EN 206 CN pour les gravillons recyclés, ainsi l'analyse laboratoire confirme le potentiel du béton (propre) exempt de toutes traces d'enduits plâtres ou flocage et autres éléments indésirables en valorisation **granulat type 1**. Un curage sera donc nécessaire sur les murs recouverts d'un enduit en plâtre et/ou d'un revêtement quelconque.

Ainsi, à l'issue de cette caractérisation en phase chantier et avec l'application des méthodes de déconstruction sélective telles que décrites dans le CCTP les granulats pourront être valorisés en granulats de béton type 1.

En termes de valorisation, ces granulats recyclés ont l'avantage de pouvoir substituer jusqu'à 60% les granulats naturels dans la formation du béton (d'après la norme NF EN 206 CN) selon la classe envisagée. En fonction de la granulométrie ils pourront également être utilisé dans la filière VRD (Voierie Réseaux Divers) ou en tant que matériaux de remblais.

Le but premier est de limiter l'impact environnemental des travaux en évitant notamment le transport des ressources et en favorisant leur traitement directement sur site.