

Etude des caractéristiques des débris de décombres dans l'aire métropolitaine de Port-au-Prince (Haïti)



Jean B.J.

Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics – Port-au-Prince, Haïti

URGéo – Faculté des Sciences – Université d'Etat d'Haïti, Port-au-Prince, Haïti

Joseph Y.-F.

Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics – Port-au-Prince, Haïti

RÉSUMÉ

L'objectif de cet article est d'analyser et de comprendre les caractéristiques minéralogiques, chimiques et physico-mécaniques des débris de décombres dans l'aire métropolitaine de Port-au-Prince afin de proposer des solutions pour leur utilisation dans la fabrication des matériaux de construction en Haïti. L'étude technique s'est limitée au site de Truitier, immense site de stockage et de recyclage des débris, dans la région de Port-au-Prince.

Sur ce site, une quantité importante de débris (environ 5 m³) de matériaux ont été prélevés pour les analyses minéralogiques, chimiques et physico-mécaniques. Ces analyses ont été conduites dans les laboratoires du LNBTP, du BME et de la FDS. Les résultats de ces analyses ont montré que les matériaux des débris de décombres contiennent un pourcentage moyen de calcaire (> 59%), des graviers et sables, des argiles et des débris de végétaux. Ces matériaux de décombres sont à rejeter pour la fabrication de béton de qualité courante. Ils peuvent néanmoins être recyclés et réutilisés dans les travaux de maçonnerie et éventuellement en couche de fondation de chaussée, lorsqu'ils sont traités. Ils pourraient être utilisés en couche de roulement pour des routes en terre battue soumises à des programmes d'entretiens réguliers.

Cette étude fournit également les résistances moyennes à 28 jours des éprouvettes-témoins de bétons avec ces matériaux. La résistance des bétons à 28 jours des débris de décombres à Truitier est d'environ 22.8 MPa. Des mesures de résistances en compression simple ont été également effectuées sur des blocs de ciment, des prismes et des éprouvettes de mortier réalisés avec ces mêmes matériaux à ce même âge.

Des mesures de vitesses ultrasoniques et d'indice sclérométrique ont également été réalisées sur les cylindres de béton afin d'ausculter la quantité de vides retrouvés dans le confectionnement des cylindres et d'estimer leur résistance. En sus de l'influence des vides, ces mesures révèlent de très bonne corrélation avec les résistances moyennes des éprouvettes en compression simple.

ABSTRACT

The objective of this paper focuses on the analyse and good understanding of the mineralogical, chemical, physical and mechanical characteristics of materials debris in the metropolitan area of Port-au-Prince to propose solutions for using in construction materials in Haiti. The technical study is limited to the Truitier site, a huge storage and debris recycling site, in the region Port-au-Prince.

On this site, a large amount of debris (approximately 5 m³) of material were collected for mineralogical, chemical, physical and mechanical analysis. These analyzes were conducted in the laboratories of LNBTP, BME and FDS. The results of these analyzes showed that the materials debris contain an average percentage of limestone (> 59%), gravel and sand, clays and plant debris. These materials are to be rejected for making ordinary concrete. They can however be recycled and reused in the masonry work and pavement base-course layer when treated. They could be used for surfacing roads subject to a regular maintenance program.

This study also provides mean resistance at 28 days of test-control concrete made with these materials. The resistance of concrete debris Truitier at 28 days is about 22.8 MPa. Resistance measurements in unconfined compression were also conducted on cement blocks, prisms and mortar specimens with the same materials at the same age.

Measurements of ultrasonic speeds (Pundit) and rebound number (Sclerometer) were also performed on concrete cylinder to measure the amount of voids found in the manufacturing of cylinders (presence of internal microcracks) and estimate their resistance. In addition to the influence of voids, the results show very good correlation with the average strength of the specimens in unconfined compression.

1 INTRODUCTION

Cet article présente la démarche et les résultats des études techniques réalisés sur les débris de décombres prélevés sur le site de Truitier. Il est le fruit d'un projet de recherche « Gestion des débris de décombres dans l'aire métropolitaine de Port-au-Prince » mené par le

Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP) avec la collaboration des laboratoires du Bureau des Mines et de l'Energie (BME) et de la Faculté des Sciences (FDS). Les résultats de ce projet, partiellement financé par le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD), sont l'aboutissement des efforts conjugués de plusieurs institutions (LNBTP, BME et FDS)

qui ont participé à ce travail pendant environ cinq mois lors des études techniques. Ces résultats sont destinés à fournir une référence technique pour l'utilisation des débris de décombres dans la fabrication de matériaux de construction.

2 LOCALISATION ET DESCRIPTION DU SITE DE STOCKAGE ET DE RECYCLAGE DE TRUITIER

Le site de Truitier (Figure 1) est une aire de déposition de tous types de déchets en opération depuis environ 20 ans à Port-au-Prince. Il est utilisé actuellement comme site autorisé de stockage et de traitement des débris de décombres du 12 janvier 2010. Ce site autorisé vise à gérer les débris de décombres à partir d'une stratégie de réutilisation et de recyclage de ces débris. Cette stratégie détermine la conduite à tenir en ce qui concerne la propriété de ces matériaux qui seront générés sur le site, afin de fournir des matières premières utilisables dans la reconstruction et la réfection de routes, de remblais, etc.

Ce site est situé dans le quartier de Cité Soleil à Port-au-Prince, à environ 3.5 km au nord-ouest de l'aéroport international Toussaint Louverture. Sa superficie actuelle où les débris de décombres (béton, appareils ménagers, et plusieurs autres matériaux) sont déposés est d'environ 12 hectares. Le volume de débris de décombres, au-dessus du niveau du sol d'origine, est estimé à 750000 m³. Les couches superficielles sont constituées généralement d'alluvions quaternaires. Elles font partie de la « Formation de la Rivière Grise » qui contient en général des dépôts détritiques, des couches alternées de basaltes extrusifs, de galets de calcaire et de cherts entrecoupés de minces lits de marnes, silt gris-bleu et argiles (Integrity Disaster Consultants, LLC 2010).



Figure 1. Différentes parties du site de débris de décombres à Truitier

3 PRÉLEVEMENT D'ECHANTILLONS

Les prises d'échantillons de débris de décombres (environ 5m³) ont été effectuées avec le plus grand soin pour la validité des essais au laboratoire. Ces échantillons, prélevés à partir des débris de construction accumulés (constitués en majorité de matériaux ayant été extraits des carrières et/ou des rivières) ont été broyés, traités et dépoussiérés sur le site de déposition. Ils seront considérés comme représentatifs du site concerné.

Les prélèvements ont été réalisés respectivement à l'aide d'une pelle manuelle et d'une pelle mécanique sur le site à ciel ouvert de Truitier. Ces prélèvements ont été mis dans des sacs et sachets pour transporter au LNBTP et dans un camion pour transporter à Haïti Bloc. Ensuite, ils ont été stockés au laboratoire d'essai du LNBTP où ils feront par la suite l'objet de nombreux essais techniques de laboratoire.

4 CARACTÉRISATIONS MINÉRALOGIQUE ET CHIMIQUE DES DÉBRIS DE DÉCOMBRES

4.1 Caractérisation minéralogique

L'analyse minéralogique des débris de décombres a été réalisée au laboratoire de géologie du BME à partir des études faites à la loupe binoculaire. Cette analyse montre les différents minéraux qui composent les matériaux examinés. Dans ces matériaux, on retrouve des grains de conglomérats, des grains de calcaires dans la mésostase sableuse, des sols argileux et des débris de végétaux.

4.2 Caractérisation chimique

La prédiction du comportement des débris de décombres dans un mélange exige une connaissance approfondie de leur composition chimique. Leur étude chimique peut aider à l'identification des composés chimiquement réactifs ou instables.

L'étude chimique repose sur les essais techniques réalisés aux laboratoires du BME et de l'URE (Unité de Recherche en Environnement) de la FDS. Ces essais ont été déterminés à l'aide des analyses quantitatives de carbonate de calcium (CaCO₃), de chaux vive (CaO), de carbonate de magnésium (MgCO₃), d'oxyde de magnésium (MgO), de chlorures dissous, de teneur en soufre total et de sulfate dissous. Les résultats de ces analyses sont consignés au Tableau 1.

Tableau 1. Analyse chimique des débris de décombres

Débris de décombres - Truitier	
CaCO ₃ (%)	89.13
MgCO ₃ (%)	2.09
CaO (%)	50.07
MgO (%)	0.95
Teneur en chlore (PPM)	266.3
soufre total	absent
sulfate dissous	absent

Le Tableau 1 présente les pourcentages en CaCO_3 , MgCO_3 , CaO et MgO pour les matériaux de décombres analysés. Parmi les composés présents, soulignons la présence de CaCO_3 à un pourcentage élevé dans ces matériaux de décombres (89.13%). Dans ce tableau, est également présentée la valeur de teneur en chlore de ces matériaux. Cette valeur de teneur en chlore est très faible, largement inférieure à 20000 ppm (concentration en chlorure de sodium généralement tolérable dans le béton). Donc, les matériaux de décombres examinés contribueront très peu à des réactions corrosives en présence d'autres ingrédients de malaxage du béton (eau de gâchage, adjuvant et matériaux cimentaires) ou à l'exposition à l'eau de mer ou à un air salin en région côtière.

Les résultats des analyses en soufre total (sulfure et sulfate) présent dans ces matériaux ont été également montrés au Tableau 1. Ces résultats mettent en évidence l'absence des ions de sulfures qui indiquent l'absence de matériaux sulfureux (pyrite) et l'absence d'ions de sulfates. Ces matériaux ne peuvent pas provoquer des réactions sulfatiques internes dans un béton.

4.3 Analyse de la réactivité alcali-silice

L'analyse de réduction en alcalinité effectuée sur les matériaux de décombres est illustrée à la Figure 2. Cette figure donne une représentativité de ces matériaux (point rouge) sur la courbe de réaction alcali-silice. Ces matériaux présentent une réduction en alcalinité de 555 mmol/l. Ils seraient inoffensifs pour une teneur en silice de l'ordre de 450 mmol/l et moins (concentration minimale en silice susceptible de provoquer des réactions alcalines).

5 CARACTÉRISATION PHYSICO-MÉCANIQUE DES DÉBRIS DE DÉCOMBRES

Les matériaux de décombres analysés ont été soumis aux essais suivants sur toute la masse de l'échantillon au LNBTP :

- Analyses granulométrique et sédimentométrie,
- Équivalent de sable,
- Poids spécifique des grains solides et poids volumique sec,
- Essai Proctor,

- Los Angeles,
- Micro Deval,
- Essai CBR.

Les résultats de ces différents essais réalisés sur l'échantillon de décombres prélevés sont rassemblés au tableau 2.

Le matériau de décombres est impropre. Il contient 13% de fines ($< 0.08\text{mm}$), son coefficient « Los Angeles » est égal à 33, supérieur au maximum de 30 exigé pour un béton de qualité courante. Son coefficient « Micro-Deval » est égal à 44. Ce matériau est à rejeter pour la fabrication de béton de qualité courante. Il peut néanmoins être utilisé dans les travaux de maçonnerie et en remblai.

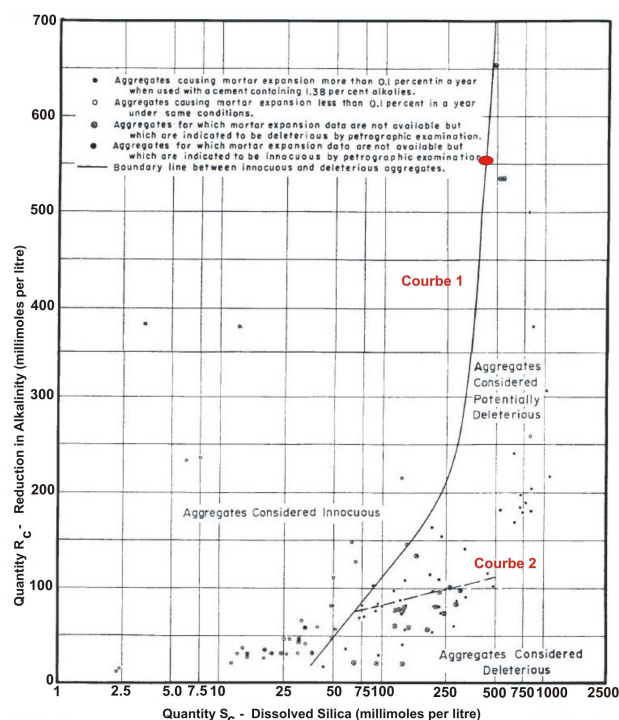


Figure 2. Courbe de réaction alcali-silice, ASTM C 289-03

Tableau 2. Caractéristiques physiques et essais de portance des matériaux

Site	Description	Classif. USCS	Distribution dimensionnelle des grains % passant au tamis d'ouverture						Équivalent sable		Poids Vol.	Los Angeles	Micro Deval
			40 mm	20 mm	10 mm	4.75 mm	2 mm	0.08 mm	ESV	ESP	γ_s (kN/m ³)	LA	MD
Truitier	Grave limoneuse	GL	84	72	57	44	31	13	35	33	25.89	33	44
			Essais de portance						CBR				
			w_{opt} (%)				γ_{dmax} (kN/m ³)		à 95% de l'optimum		à 98% de l'optimum		
			11.65				19.0		19.70		29.79		

6 ANALYSE DES CONSTITUANTS DES BÉTONS

6.1 Granulats

Les matériaux de décombres ont été également utilisés dans des formulations de bétons binaires et de mortier au LNBTP. Ces matériaux ont été écrêtés sur les tamis de 6.3 mm et de 31.5 mm afin de séparer le sable du gravier. De ce fait, le sable est de granularité 0/6.3 et le gravier de granularité 6.3/31.5.

Les granulats des bétons binaires sont surtout les sables et les graviers. Ces granulats ont été soumis aux essais de laboratoire suivants :

- Analyse granulométrique,
- Poids volumique apparent,
- Poids spécifique des grains solides,

- Équivalent de sable,
- Essai de propreté.

Les résultats des différents essais réalisés sur ces granulats sont listés dans les Tableaux 3 et 4.

6.2 Eau et ciment

L'eau propre du robinet est utilisée dans la préparation des mélanges en laboratoire (LNBTP). Elle est réputée ne contenir aucun agent nocif susceptible d'altérer la qualité du béton. Toutefois, elle n'a fait l'objet d'aucune analyse chimique dans ce travail.

Le ciment utilisé provient de la Centrale Varreux (CIVA). Il s'agit d'un ciment tous usages de type ASTM C1157 GU (General Use).

Tableau 3. Analyse granulométrique des granulats (sables et graviers) en provenance de Truitier

Granulats de Truitier	Diamètre (en mm)	Distribution dimensionnelle des grains % passant au tamis d'ouverture													
		0.08	0.315	1.25	2.50	3.15	5.0	8.0	10.0	12.5	16.0	25.0	31.5	40	50
Sable de Truitier		22	33	54	70	77	94	100	-	-	-	-	-	-	-
Gravier de Truitier	% passant	-	-	-	-	-	-	28	38	49	61	90	100	-	-

Tableau 4. Caractéristiques physiques des granulats (sables et graviers) en provenance de Truitier

Granulats de Truitier	Équivalent de sable		Poids Vol. (kN/m ³)		Los Angeles	Micro Deval	Abs. d'eau (%)	Module finesse	de Propreté (%)
	ESV	ESP	App.	Grains solides					
Sable de Truitier	35	33	13.73	25.90	-	-	-	2.81	0.80
Gravier de Truitier	-	-	12.75	21.5	33	44	7.05	-	10.0

7 MISE AU POINT DES FORMULATIONS DU BÉTON HYDRAULIQUE

7.1 Méthode utilisée

La méthode utilisée pour les formulations du béton est la méthode pratique simplifiée de « Dreux-Gorisse », dont les paramètres de base sont :

- La plasticité désirée,
- Le rapport ciment /eau.

Rappelons que cette méthode a pour seul but de permettre de définir d'une façon simple et rapide une formule de composition à peu près adaptée au béton étudiée, mais que seules quelques gâchées d'essai et la confection d'éprouvettes permettront d'ajuster au mieux la composition à adopter définitivement en fonction des qualités souhaitées et des matériaux effectivement utilisés, Dreux et Festa (2006).

A partir des résultats des essais réalisés en laboratoire sur les matériaux de décombres, nous avons déterminé les proportions optimales des différents constituants des mélanges. La quantité de 350 kg de ciment par mètre cube (350 kg/m³) de béton a été adoptée.

7.2 Dosage

L'étude a été menée en visant une plasticité normale, correspondant à un affaissement au cône d'Abrams de 7 cm.

L'abaque, préconisé par la méthode de Dreux-Gorisse, liant le rapport C/E à l'ouvrabilité désirée, permet d'obtenir pour un dosage en ciment de 350 kg/m³ de béton, un rapport C/E de l'ordre de 1.74. Cette valeur est susceptible d'être modifiée en fonction de l'état d'humidité des granulats et de la quantité de fines contenues dans le squelette granulaire.

7.3 Mélanges théoriques

Les squelettes optimaux des mélanges binaires réalisés à partir des courbes granulaires de référence et des lignes de partage sont obtenus à partir des mélanges des constituants granulaires dans les proportions indiquées dans le Tableau 5.

Tableau 5. Pourcentage optimal des granulats dans le mélange

Béton étudié Q_{350}	Sable (%)	Gravier (%)
Truitier	26.35	73.75

En fonction des caractéristiques des constituants et des différentes corrections, le LNBTP propose, dans le Tableau 6, le dosage équivalent pour l'obtention d'un mètre cube de béton.

Tableau 6. Dosage (Q_{350}) du béton de Truitier

Constituants	Dosage pondéral (masse en kg)	Dosage volumique (volume en litre)	
	Pour $1m^3$	Pour $1m^3$	Pour 1 sac de ciment de 42.5 kg
Gravier	1147.62	894.48	108.62
Sable	491.23	356.06	43.24
Ciment	350.00	318.18	38.64
Eau	201.15	201.15	24.43
Densité réelle du béton frais : 2.19			

8 RÉSISTANCE MÉCANIQUE DES BÉTONS ÉTUDIÉS

A partir des mélanges réalisés avec le dosage pondéral indiqué, une série d'éprouvettes ont été confectionnées et immergées dans l'eau, après démoulage au lendemain de leur confection.

8.1 Essais de compression simple

Les essais de compression simples (essais destructifs) sont prévus à 3, 7 et 28 jours sur les éprouvettes cylindriques, sur les blocs de ciment et sur les cubes et prismes de mortier conservés dans l'eau. Ils sont réalisés sous une presse automatique de type 101/3000 E de la marque Form-Test Seidner pouvant atteindre une charge de rupture de 3000 kN pour les cylindres et les blocs (Figure 4a et 4b) et sous une presse automatique de type ADR Digital Readout Unit de la marque ELE International avec une charge maximale de rupture de 2000 kN pour les cubes et prismes de mortiers (Figure 4c).

Les résistances moyennes obtenues à 3, 7 et 28 jours de la série d'éprouvettes cylindriques fabriquées de 6 pouces de diamètre et de 12 pouces de hauteur (rapport $h/d = 2$ ou élancement de 2 imposés pour tous les échantillons cylindriques analysés afin d'éviter une forte atténuation) sont résumées dans le Tableau 7. Le

Tableau 8 présente les résistances moyennes des blocs de ciment (fabriqués par l'Entreprise Haïti Bloc), classés en quatre catégories selon les informations fournies par la dite entreprise : C2-3G, C1-3G, C2-2, C1-1. Chaque catégorie a été dosée différemment (C2-3G – 2 sacs de ciment (équivalent à $0.04 m^3$) et 3 sceaux (5 gallons par seau équivalent au total à $0.057 m^3$) de gravier et $0.5 m^3$ de sable de matériaux de décombres ; C1-3G – 1 sac de ciment, $0.057 m^3$ de gravier et $0.5 m^3$ de sable de matériaux de décombres ; C2-2 – 2 sacs de ciment et $0.5 m^3$ de sable de matériaux de décombres ; C1-1 – 1 sac de ciment et $0.5 m^3$ de sable de matériaux de décombres). Le Tableau 9 présente également les résistances moyennes des éprouvettes (cubes – 5.08 cm d'arête et prismes – base carrée de 4 cm de côté et 16 cm de longueur) de mortiers obtenues à ces mêmes âges.

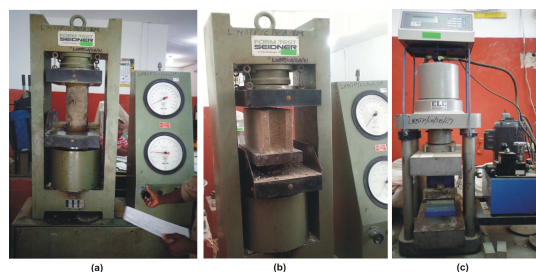


Figure 4. Essai d'écrasement à la presse sur (a) cylindres de béton, (b) blocs de ciment et (c) éprouvettes de mortier

Tableau 7. Résultats des essais de compression sur les cylindres de béton

Dosage	Age en jours	Charge moyenne de rupture	Résistance moyenne obtenue	Écart-type
		en kN	en MPa	en MPa
Q_{350}	3	137	7.6	1.33
	7	188	10.3	0.58
	28	268	22.8	0.34

Tableau 8. Résultats des essais de compression sur les différentes catégories de blocs de ciment

Dosage	Age en jours	Charge moyenne de rupture	Résistance moyenne obtenue	Écart-type
		en kN	en MPa	en MPa
C2-3G	3	153	5.5	1.5
	7	158	5.6	1.4
	28	344	12.3	1.1
C1-3G	3	66	2.4	0.7
	7	129	4.6	0.6
	28	168	6	0.3
C2-2	3	85	3	0.1
	7	149	5.3	1.1
	28	199	7.1	0.1

C1-1	3	66	2.4	0.9
	7	68	2.4	0.6
	28	137	5.9	0.7

Tableau 9. Résultats des essais de compression sur les cubes et les prismes de mortier

Dosage	Age en jours	Charge moyenne de rupture	Résistance moyenne obtenue	Écart-type
		en kN	en MPa	en MPa
Cube	3	21	8.2	0.1
	7	26.4	10.4	0.3
	28	28.4	11.2	0.3
Prisme	3	1	0.2	0.03
	7	1	0.3	0.1
	28	1	0.4	0.03

9 ESSAIS NON-DESTRUCTIFS

Les essais non-destructifs permettent d'ausculter le béton sans affecter son état physique. Ces essais ont été réalisés uniquement sur les éprouvettes cylindriques de béton (rapport h/d = 2). Ils permettent de suivre l'évolution qualitative du béton durant son âge (3, 7 et 28 jours). De plus, ces essais peuvent fournir une estimation de la résistance du béton, ce qui conduit à des économies de temps et de moyens par rapport aux essais destructifs (essai de compression simple).

9.1 Essai de propagation d'ondes dans le béton

Le dispositif expérimental utilisé est une unité PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester) qui est constituée d'un générateur d'impulsions électriques, de deux transducteurs avec extrémités planes. Cette unité dispose en plus d'un amplificateur et d'un dispositif électronique de chronométrage permettant de mesurer l'intervalle de temps qui s'écoule entre la détection du son par le transducteur d'enclenchement et la détection de son arrivée au transducteur de déclenchement, intégrés dans le générateur d'impulsion. Les mesures effectuées avec les transducteurs à extrémités planes ont été appliquées avec de la graisse comme agent couplant afin d'assurer un bon contact entre le béton et les transducteurs. Nous avons utilisé de la graisse, car elle est recommandée si seules les ondes P sont requises et à faible pression de contact, ce qui correspond à notre cas. Ces mesures ultrasoniques ont été réalisées au LNBTP. La Figure 5 représente le dispositif expérimental PUNDIT.

Les mesures ont été réalisées suivant l'axe longitudinal passant par les bases des cylindres. Ces mesures ont été effectuées sur les cylindres de béton après 3, 7 et 28 jours, dans les conditions idéales de laboratoire. La vitesse v de propagation des ondes dans le cylindre est donnée par la formule :

$$v = a / t \text{ (en m/s)} \quad [1]$$

où, a est la distance parcourue ou hauteur du cylindre, t est la différence entre le temps lu t' et le temps zéro t_0 . Le temps t_0 est le temps de passage dans un cylindre de béton.

Le Tableau 10 présente les résultats des mesures ultrasoniques réalisées sur neuf cylindres de béton.

Les vitesses ultrasoniques mesurées longitudinalement sont comprises entre 3394 m/s et 4164 m/s. Les valeurs les plus faibles reviennent aux cylindres de béton après 3 jours, celles des bétons après 28 jours présentent des vitesses plus élevées. Ces vitesses dépendent de la nature des matériaux de décombres, de leur densité sèche et de leur porosité. Ces valeurs moyennes correspondent à des résistances en compression simple variant entre 7.6 - 22.8 MPa.



Figure 5. Dispositif ultrasonique avec mesure longitudinale

Tableau 10. Vitesse ultrasonique des cylindres à 3, 7 et 28 jours

Age en jours	Pundit (μ s)	v (m/s)
3	89.8	3394.21
	91.7	3323.88
	89.8	3394.21
7	77.3	3943.08
	77.1	3953.31
	78.1	3902.69
28	73.1	4169.63
	72.1	4227.46
	73.2	4163.93

9.2 Essai de dureté de surface par rebondissement à l'aide d'un scléromètre

L'équipement utilisé est un scléromètre permettant d'estimer la résistance du béton en mesurant sa dureté superficielle par rebondissement d'une masselotte.

Les mesures par scléromètre ont été effectuées au LNBTP aux différents âges des éprouvettes de béton. Ces mesures permettent de déterminer des indices sclérométriques aux différents points du béton afin de préciser l'homogénéité de sa résistance. Elles sont une

moyenne de cinq valeurs obtenues dans un quadrillage de la section de l'éprouvette. La Figure 6 montre l'appareil utilisé pour réaliser ce type d'essai.



Figure 6. Mesure des indices sclérométriques sur les éprouvettes cylindriques

Le Tableau 11 reprend les valeurs de l'indice sclérométrique moyen pour chaque âge des éprouvettes de béton. Les valeurs de la résistance en compression simple sont également estimées dans ce tableau. Ces valeurs de la résistance sont plus élevées que celles obtenues en compression simple. Les essais sclérométriques seuls ne peuvent se substituer aux essais de résistance à la compression.

Tableau 11. Indices sclérométriques mesurés sur chaque éprouvette et résistances en compression estimées

Age en jours	Indice sclérométrique					Indice sclérométrique moyen	R _{scléromètre} (MPa)
3	23	23	23	26	25	23.6	14.6
	24	22	22	23	24		
	24	24	24	22	25		
7	28	26	28	26	26	26.6	18.6
	26	26	26	28	28		
	26	26	26	27	26		
28	36	37	37	34	36	35.7	32.9
	37	36	36	37	34		
	36	33	36	36	35		

10 CORRELATION ENTRE LES ESSAIS DESTRUCTIFS ET NON DESTRUCTIFS

Pour créer une courbe d'estimation de la résistance à la compression du béton, il est nécessaire de corréler les mesures de vitesses d'impulsions ultrasoniques données par le Pundit et les mesures de rebond à l'aide du scléromètre sur les cylindres de béton. Cette corrélation permettra de prévoir la résistance à la compression simple déterminée à partir de la presse automatique.

Les mesures effectuées à l'aide des essais de compression simple, de Pundit et de scléromètre sont listées dans le Tableau 12.

Tableau 12. Mesures des essais de compression, de Pundit et de Scléromètre

Age en jours	Resistance à la compression (f _{ck})	Vitesse ultrasonique (V)	Scléromètre (S)
3	8.8	3394	24
	6.1	3324	23
	7.7	3394	23.8
7	9.9	3943	26.8
	10.1	3953	26.8
	11	3903	26.2
28	23.0	4170	36
	22.4	4227	36
	22.8	4164	35.2

La fonction d'estimation est exprimée de la façon suivante :

$$f_{ck} = a \cdot V^b \cdot S^c \quad [2]$$

où, a, b et c sont des constantes,
V, la vitesse ultrasonique en m/s,
S, la valeur de rebond.

On peut déterminer les constantes a, b et c à partir des données du Tableau 12 pour créer les courbes d'estimations correspondant le mieux aux données relatives aux âges de béton.

Le Tableau 13 obtenu à l'aide d'un tableur Excel ® utilisant la fonction "LN" et "DROITEREG" affiche les valeurs relatives aux coefficients a, b et c. Les coefficients "b" pour la vitesse et "c" pour le rebond sont lus directement. Tandis que pour la constante "a", il est nécessaire de convertir à la forme correcte à l'aide de la fonction exponentielle.

Tableau 13. Mesures des coefficients "a", "b" et "c"

c(S)	b(V)	a
2.68691898	0.016424199	-6.62009757
0.37360606	0.71451442	4.8196011
0.97608746	0.090348884	#N / A
122.457161	6	#N / A
1.99921622	0.048977525	#N / A

Ainsi, la fonction d'estimation pour cet ensemble de données de décombes serait :

$$f_{ck} = 1.3333 \times 10^{-3} \cdot V^{0.0164} \cdot S^{2.6869} \text{ avec un coefficient de corrélation de } 0.9761.$$

Les résultats de cette analyse, combinant les deux méthodes (Pundit et Scléromètre) pour estimer la résistance à la compression simple du béton, sont donnés à la Figure 7. Cette courbe d'estimation donne un coefficient de corrélation significativement élevé 0.9761 et permet d'obtenir une relation qui lie ces deux paramètres à la résistance en compression du béton. Ce modèle d'estimation, déterminé seulement à partir de neuf points

d'essai expérimentaux sur ces matériaux de décombres, donne de très bonne corrélation entre ces paramètres. Mais, elle doit être considérée avec circonspection (nécessité d'avoir plus de points d'essai expérimentaux pour généraliser ce modèle d'équation de matériaux de décombres). Toutefois, ces deux méthodes combinées pourraient servir, dans les limites de leur utilisation, à l'évaluation de la résistance du béton des matériaux de décombres.

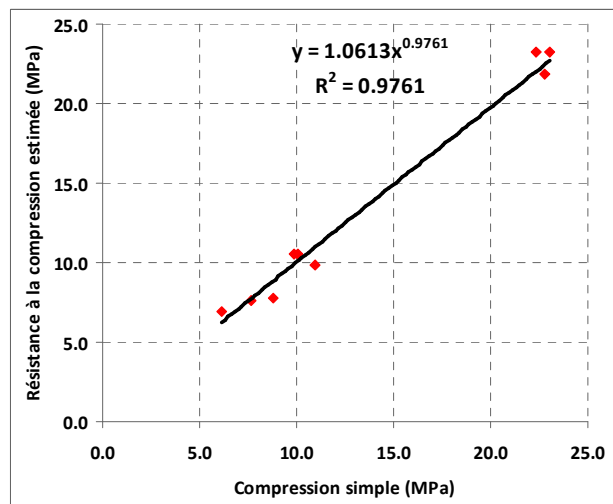


Figure 7. Courbe d'estimation de la résistance à la compression du béton

11 CONCLUSIONS

L'étude synthétique des matériaux de décombres montrent que :

- le sable est impropre (ESP = 33). Il contient respectivement 22% de fines. Son module de finesse est égal à 2.81. Ce sable n'est pas recommandé pour une utilisation dans la fabrication de béton de qualité courante,
- le gravier est impropre (10% d'impuretés). Son coefficient « Los Angeles » est de 33. Son coefficient « Micro-Deval » est de 44. Ce gravier n'est pas apte à être utilisé dans la fabrication de béton de qualité courante,
- les risques d'alcali-réaction et de réactions sulfatiques internes n'ont pas été révélés,
- les dosages formulés ont été utilisés avec succès lors de la fabrication des éprouvettes,
- la résistance moyenne obtenue à 28 jours des éprouvettes-témoins de l'étude de formulation des bétons varie de 22.4 à 23 MPa,

ce qui confirme que ces matériaux de décombres ne pourraient pas être utilisés dans la fabrication de béton de qualité courante. Ils peuvent néanmoins être recyclés et réutilisés dans les travaux de maçonnerie, y compris la fabrication d'agglomérés, et éventuellement en couche de fondation de chaussée lorsqu'ils sont traités. Ils pourraient également être utilisés en couche de roulement pour des

routes en terre battue soumises à des programmes d'entretiens réguliers.

Ce travail s'est également intéressé à la relation entre les résistances des cylindres de bétons déterminées par les essais d'écrasement et par les essais non-destructifs. Les essais d'écrasements étant les essais usuels pour déterminer la résistance en compression du béton, il ressort de l'ensemble des résultats que la combinaison des essais non-destructifs (Pundit et scléromètre) soit très bien corrélée, à partir d'un modèle mathématique, aux résistances en compression et varie dans le même sens. Ces essais non-destructifs pourraient alors servir de test plus rapide et moins coûteux pour l'estimation de la résistance du béton.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à souligner la contribution d'autres collègues dans cet article, spécialement Charles J.-N. (LNBTP), Princeton J. F. (LNBTP), Casimir J. (FDS), D'Meza S. (BME), Boisson D. (FDS), Thimus J.-F. (UCL), Schroeder C. (ULB). Ils remercient la Faculté des Sciences (FDS) de l'Université d'État d'Haïti (UEH), le Bureau des Mines et de l'Energie (BME), le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) pour le financement partiel du projet de recherche "Gestion des débris dans l'aire métropolitaine de Port-au-Prince" et particulièrement le Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP) d'Haïti pour avoir mené à bien ce projet.

RÉFÉRENCES

- ASTM C 289-03. 2004. Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method).
- ASTM C 1157. 1995. Standard Performance Specification for Blended Hydraulic Cement.
- Dreux G. et Festa J. 2006. Nouveau guide du béton et de ses constituants. Huitième édition 1998. Troisième tirage 2007. Editions Eyrolles.
- Integrity Disaster Consultants, LLC 2010. Etude environnementale de référence, Rapport d'évaluation du Site - Décharge de Truitier. La Banque Mondiale, Association Internationale de Développement.