

EVALUATION TECHNIQUE DE PRODUITS ET MATERIAUX N° ETPM-21/0073-B du 26.07.2023

Concernant le produit de Béton à usage non structurel
« **béton d'Anthropocite** »



Première édition :

ETPM-21/0073 du 14 octobre 2021

Deuxième édition :

ETPM-22/0073-A du 27 juillet 2022

Troisième édition :

ETPM-22/0073-B du 26 juillet 2023

Titulaire : Néolithe
5 rue des Ateliers
49290 Chalonnes sur Loire

Cette Evaluation Technique comporte 35 pages. Sa reproduction n'est autorisée que sous la forme de fac-similé photographique intégral sauf accord particulier du CSTB.

AVERTISSEMENT

Cette Evaluation Technique de Produits et Matériaux, du fait qu'elle ne vise qu'à déterminer des caractéristiques intrinsèques d'un produit ou d'un matériau, n'a pas de valeur d'Avis Technique au sens de l'arrêté modifié du 21 mars 2012. Elle ne dispense pas de vérifier l'aptitude du produit ou matériau à être incorporé dans un ouvrage déterminé, par consultation de documents de références de l'application considérée (NF-DTU, CPT, Avis Technique, ...).

EVALUATION TECHNIQUE

Béton d'Anthropocite

DEFINITION SUCCINCTE

Le béton d'Anthropocite est un béton innovant créé par la société Néolithe. La caractéristique principale de ce béton réside dans le fait jusqu'à 20% en masse des gravillons sont des granulats Anthropocite, en remplacement des granulats naturels.

Ces granulats sont composés à 80% de déchets non dangereux non-inertes et ne pouvant faire l'objet d'un recyclage. Ils sont communément appelés les refus de tri des déchets de chantiers. Le procédé de transformation de ces déchets en granulats utilisables pour le béton est la fossilisation, procédé utilisant une machine appelée fossilisateur développée par Néolithe.

Le béton d'Anthropocite permet ainsi la création d'un exutoire pour 30 millions de tonnes de déchets habituellement enfouis ou incinérés.

La fabrication des granulats est réalisée en broyant les refus des centres de tri du BTP, en mélangeant ces refus avec un liant spécialement créé par Néolithe puis en mettant sous pression ce mélange afin de réaliser un granulats de densité spécifiée.

Le granulats Anthropocite est un granulats non couvert par la norme NF EN 12620 [5].

En conséquence, les bétons de granulats Anthropocite ne sont pas couverts par la norme NF EN 206 [6].

EVALUATION TECHNIQUE

Les propriétés du granulats Anthropocite et du béton d'Anthropocite présentées ci-après résultent principalement de l'analyse de résultats d'essais, présentés au paragraphe 5 du Dossier Technique.

Le granulats Anthropocite est un granulats de granulométrie 11/22 non couvert par la norme NF EN 12620 [5].

Pour le béton d'Anthropocite, les essais ont été réalisés sur une formulation de béton à base de :

- Ciments couverts par la sélection des ciments évalués par cette ETPM et présentée Tableau 10 du Dossier Technique ;
- Granulats naturels ;
- Granulats Anthropocite ($\leq 20\%$ de la masse de gravillons) ;
- eau ;
- et adjuvant.

Des essais comparatifs ont été menés sur des formulations analogues, sans substitution de granulats naturels par des granulats Anthropocite.

Le béton d'Anthropocite est un béton non couvert par la norme NF EN 206/CN [6].

Caractéristiques du granulats Anthropocite

Les caractérisations chimique et physique du granulats d'Anthropocite ont été réalisées par le laboratoire A.F.Q.S., le laboratoire Eurofins ou le laboratoire interne de Néolithe sur des granulats Anthropocite âgés de plus de 28 jours.

Des essais de lixiviations ont été réalisés sur des échantillons de granulats concassés et tamisés au tamis de 10 mm.

Les concentrations des différentes espèces chimiques relarguées sont présentées dans le tableau 1.

Les caractéristiques suivantes ont été mesurées et sont comparées aux valeurs limites en lixiviation permettant de justifier les utilisations visées dans le Guide Sétra [3] pour l'acceptabilité de matériaux alternatifs en technique

routière et une caractérisation environnementale de niveau 1, reposant sur la réalisation d'essais de lixiviation et d'analyses en contenu total.

Tableau 1 : Bilan des essais de lixiviation et des analyses en contenu total sur granulat Anthropocite

Paramètres	Granulat Anthropocite (mg/kg de matière sèche)	Seuils du guide Sétra annexe 3, tableaux 3 et 4
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)	0,3	50
Polychloro Biphényles, 7 congénères (PCB)	0,02	1
Benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes (BTEX)	0,05	6
Carbone Organique par oxydation (COT)	2060	500
Chlorures	295	2400
Fluorures	<5,00	30
Sulfate (SO ₄)	14800	3000
Arsenic (As)	<0,10	1,5
Baryum (Ba)	0,7	60
Chrome (Cr)	0,37	1,5
Cuivre (Cu)	4,1	6
Molybdène (Mo)	0,491	1,5
Nickel (Ni)	0,35	1,2
Plomb (Pb)	<0,10	1,5
Zinc (Zn)	<0,10	12
Mercure (Hg)	<0,001	0,03
Antimoine (Sb)	0,007	0,18
Cadmium (Cd)	<0,002	0,12
Sélénium (Se)	0,014	0,3

Les quantités des différentes espèces chimiques relarguées sont tous inférieures aux valeurs limites en lixiviation définies dans le guide Sétra, hormis le sulfate dont la concentration est 4 à 5 fois plus élevée que le seuil du guide.

Tableau 2 : Caractéristiques du granulat Anthropocite

Caractéristiques	Granulat Anthropocite	Variabilité admise par Néolithé
Los Angeles (NF EN 1097-2)	56%	± 5%
Sulfates solubles dans l'eau (NF EN 1744-1)	3,7%	± 1%
Masse volumique (NF EN 1097-6)	1560 kg/m ³	± 10%
Absorption d'eau (NF EN 1097-6)	18,3%	± 3%
Perte au feu à 950°C (NF EN 1744-1)	21,6%	± 3%

Des analyses complémentaires de mesure des composés organiques volatiles (selon les normes NF ISO 16000-3 et NF ISO 16003-6), ainsi que la caractérisation de la radioactivité (selon annexe VIII de la directive EURATOM 2013/59 du 5 décembre 2013) des granulats ont été menées et sont présentées ci-dessous.

Les émissions de polluants volatils sont classées A+ selon le décret n° 2011-321 du 23 mars 2011 relatif à l'étiquetage des produits de construction ou de revêtements de mur ou de sol et des peintures et vernis sur leurs émissions de polluants volatils et à l'arrêté du 19 avril 2011.

Tableau 3 : concentrations d'activités massiques des granulats Anthropocite

Types de granulats	Valeurs des concentrations d'activité massiques (Bq.kg ⁻¹)			Indice d'activité (I)
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	
Roches alluvionnaires	25	25	550	0,39
Roches sédimentaires hors calcaire	30	36	560	0,47
Granulats recyclés	45	35	590	0,52
Fillers siliceux	62	18	301	0,40
Granulats Anthropocite	34	19	578	0,40

Les caractéristiques du granulat Anthropicite montrent :

- Une teneur en sulfates solubles dans l'eau au-delà du seuil de 3000 mg/kg du guide SETRA et au-dessus du seuil de 0,2% admis pour les granulats couverts par la norme NF EN 12620. Le risque d'attaque sulfatique interne a été étudié sur deux types de béton (avec ciments CEM I et CEM III/B). L'évaluation des résultats sont présentés ci-après **Tableau 8** et **Figure 3** à **Figure 5**
- Une résistance à la fragmentation faible (au-delà de la classe LA₅₀ tel que défini dans la norme NF EN 12620). A titre d'exemple, la résistance à la fragmentation d'un granulat calcaire est comprise entre 20 et 30%, celle d'un granulat artificiel à base de mâchefer 36 à 50%. Au-delà de LA₄₀, la résistance à la fragmentation est dite médiocre.
- Une masse volumique de l'ordre de 1500 kg/m³ classant le granulat comme granulat léger (masse volumique inférieure à 2000 kg/m³).
- Et une absorption d'eau importante, à prendre en compte dans la formulation des bétons.
- Les émissions de polluants volatils sont classées A+ selon le décret n° 2011-321 du 23 mars 2011 relatif à l'étiquetage des produits de construction ou de revêtements de mur ou de sol et des peintures et vernis sur leurs émissions de polluants volatils et à l'arrêté du 19 avril 2011.
- L'indice d'activité du granulat d'Anthropicite est du même ordre de grandeur que celui des granulats naturels (extrait du tableau 4 des Recommandations pour l'application pratique des dispositions réglementaires - Radioactivité naturelle des produits de construction (2020)



Caractéristiques du béton d'Anthropicite

Les caractéristiques des bétons Anthropicite, comportant une substitution en granulats Anthropicite à hauteur de 20% de la masse de gravillons, sont comparées à celles de bétons témoins, sans utilisation de granulats Anthropicite. Les formulations des bétons sont présentées dans le dossier technique du demandeur. Le détail des formulations testées est déposé auprès du CSTB.

Cette évaluation est limitée aux formulations de nature similaire, respectant le choix d'un ciment évalué par cette ETPM (et présenté **Tableau 10** du dossier Technique) et un taux de substitution de 20% maximum par le granulat Anthropicite. Aucune utilisation de granulats artificiels ou recyclés n'est autorisée.

Pour rappel, les types de ciment évalués sont les suivants :

Tableau 4 : Ciments testés pour la confection de bétons d'Anthropicite

Type de ciment	Désignation	Norme concernée
Ciment Portland	CEM I 52,5 N CE PM CP2 NF	NF EN 197-1 ¹
Ciment Portland Composé (au calcaire)	CEM II/A-LL 42,5 R CE PM - CP2 NF	NF EN 197-1 ¹
Ciment Portland Composé	CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N NF	NF EN 197-5 ²
Ciment aux laitiers	CEM III/A 42,5 PMES	NF EN 197-1 ¹
	CEM III/B 42,5 N - LH/SR CE PM NF (référence ciment ETPM 1 ^{ère} édition)	NF EN 197-1 ¹

¹ NF EN 197-1 (avril 2012) : Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants

² NF EN 197-5 (Mai 2021) : Ciment - Partie 5 : ciment Portland composé CEM II/C-M et Ciment composé CEM VI

Essais de lixiviation

Des essais de lixiviations ont été réalisés sur des échantillons de granulats concassés et tamisés au tamis de 10 mm. Les concentrations des différentes espèces chimiques relarguées sont présentées dans le tableau 1.

Les caractéristiques suivantes ont été mesurées et sont comparées aux valeurs limites en lixiviation décrites dans le projet d'arrêté fixant les critères de sortie du statut de déchet pour les granulats élaborés à partir de déchets du bâtiment et des travaux publics pour un usage routier [4], reposant sur la réalisation d'essais de lixiviation (NF EN 12457-2 ou 4) et d'analyses en contenu total.

Tableau 5 : Bilan des essais de lixiviation sur béton de granulats Anthropicite selon la norme NF EN 12457-2

Tests	Béton Témoin CEM III/B (mg/kg de MS)	Béton 10% Anthropicite CEM III/B (mg/kg de MS)	Béton 20% Anthropicite CEM II/A (mg/kg de MS)	Béton 20% Anthropicite CEM III/B (mg/kg de MS)	Seuils projet arrêté du 12/12/2014 (mg/kg de matière sèche)
Hydrocarbures totaux (4 tranches) (C10-C40)	18	57	140	140	500
Somme des HAP	<0,05	0,14	<0,05	0,150	50
Somme PCB (7)	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	1
Somme des BTEX	<0,05	<0,05	0,19	0,06	6
Carbone Organique par oxydation (COT) sur éluat	<50	<51	190	146	500
Chlorures sur éluat	82,3	89,7	29,8	150	1000
Fluorures sur éluat	<5,00	<5,00	<5,00	2,4	13
Sulfate (SO ₄) sur éluat	192	364	622	690	1 000
Arsenic (As) ICP/AES sur éluat	<0,2	<0,20	<0,101	<0,01	0,6
Baryum (Ba) ICP/AES sur éluat	0,38	0,53	2,43	2,90	25
Chrome (Cr) (ICP/AES) sur éluat	<0,10	<0,10	<0,002	0,04	0,6
Cuivre (Cu) ICP/AES sur éluat	<0,20	<0,20	0,15	0,20	3
Molybdène (Mo) (ICP/MS) sur éluat	0,078	0,098	0,128	0,41	0,6
Nickel (Ni) ICP/AES E sur éluat	<0,10	<0,10	0,135	0,04	0,5
Plomb (Pb) ICP/AES sur éluat	<0,10	<0,10	<0,101	0,01	0,6
Zinc (Zn) (ICP/AES) sur éluat	<0,20	<0,20	<0,101	0,04	5
Mercuré (Hg) sur éluat	<0,01	<0,001	<0,001	<0,005	0,01
Antimoine (Sb) (ICP/MS) sur éluat	0,008	0,006	<0,01	<0,01	0,08
Cadmium (Cd) (ICP/MS) sur éluat	<0,002	<0,002	<0,002	0,0005	0,05
Sélénium (Se) (ICP/MS) sur éluat	0,01	0,01	<0,01	<0,01	0,1

Les résultats comparatifs de lixiviation du béton de référence et de bétons d'Anthropicite, confectionnés avec un ciment CEM III/B, avec un remplacement des gravillons à hauteur de 20% massique montrent, en comparant ces valeurs avec les seuils de l'arrêté relatif aux installations de stockage de déchets inertes :

- Des teneurs en hydrocarbures totaux et en hydrocarbures aromatiques polycycliques augmentées mais inférieures aux seuils de l'arrêté du 12/12/2014.
- Une teneur en chlorures légèrement plus forte, mais inférieure au seuil de la NF EN 206/CN tableau 15 ($\leq 1\%$ pour les bétons sans armature ; $\leq 0,4\%$ pour les bétons avec armatures et $\leq 0,65\%$ pour les bétons avec CEM III avec armatures)
- Une teneur en sulfates dans le béton augmentée mais inférieure au seuil de 1000 mg/kg de l'arrêté du 12/12/2014.
- Une teneur en métaux (Mo, Sb et Se) légèrement plus élevée mais restant dans le même ordre de grandeur.

Rhéologie et teneur en air sur béton frais

La consistance et le maintien de rhéologie ont été mesurés sur des formulations de béton Anthropocite et de bétons témoins, pour chaque ciment testé.

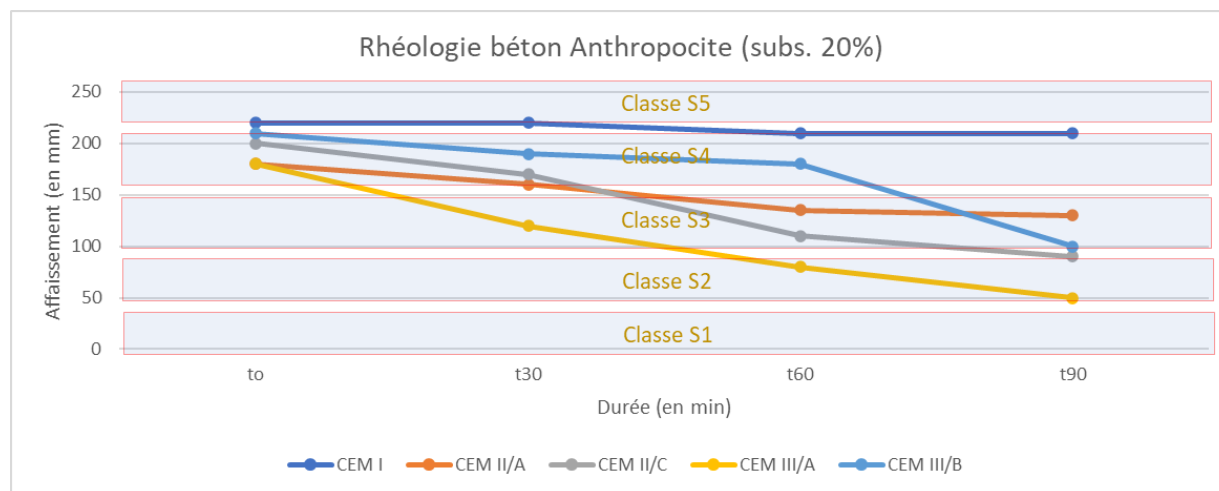


Figure 1 : Maintien de rhéologie des bétons Anthropocite

La classe d'affaissement est S4 ou S5 conformément à la norme NF EN 206/CN [6]. La substitution par 20% de granulats d'Anthropocite a peu d'impact sur la consistance initiale mais son maintien de rhéologie peut être affecté. Il convient de prendre en considération ce constat lors des opérations de bétonnage. Les ciments aux laitiers (CEM II/C-M S-LL et les deux CEM III) semblent les plus fortement impactés.

Les mesures de teneur en air sur béton frais et sur béton durci ont été effectuées sur les formulations de béton selon la norme NF EN 12350-7 [15] et sont synthétisées ci-après.

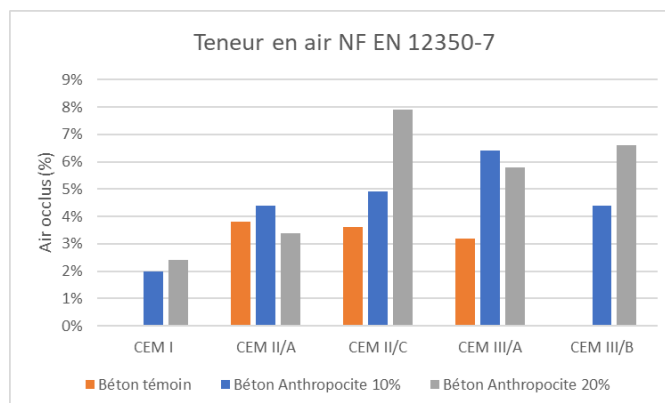


Figure 2 : Teneur en air sur béton frais du béton d'Anthropocite

La substitution de granulats Anthropocite peut induire une augmentation de la teneur en air occlus sur béton frais, par rapport au béton témoin.

Masse volumique sur durci

Les bétons d'Anthropocite évalué dans ce document reste un béton de masse volumique normale au sens de la norme NF EN 206 [6].

Résistance en compression

Les résistances en compression selon la norme NF EN 12390-3 [14] (conservation en eau à 20°C) sur béton durci sont données dans le **Tableau 18** du dossier technique. Elles ont été mesurées sur les formulations de béton d'Anthropocite, sur cylindres Ø11x22 cm et sont présentés dans le dossier technique **Figure 7**.

La substitution à hauteur de 20% de granulats Anthropocite induit une réduction de résistance à la compression de l'ordre de 20% à 30 % à 28 jours. Le choix de la nature du ciment, dans la formulation de béton Anthropocite, semble impacter la résistance mécanique du béton durci.

Les bétons d'Anthropocite évalués dans ce document sont des bétons de classe C16/20 à C20/25 au sens de la norme NF EN 206 et de l'Eurocode 2.

Retrait de séchage

Le retrait de séchage selon la norme NF EN 12390-16 [16] est donné dans le **Tableau 6**. Il a été mesuré sur les formulations de béton d'Anthropocite et les bétons témoins.

Tableau 6 : : Retrait de séchage du béton d'Anthropocite

Ciment utilisé		CEM I	CEM II/A	CEM II/C	CEM III/A	CEM III/B
Retrait de séchage à 56 jours (NF EN 12390-16) (µm/m)	Béton Anthropocite 20 %	439	374	682	596	460
	Béton Anthropocite 10 % (ETPM version précédente)	839	544	794	538	560
	Béton Témoin (ETPM version précédente)	Non réalisé	506	648	506	614

Par rapport à la version précédente de l'ETPM, l'évolution du processus de fabrication du granulat et la modification de la formulation des bétons d'Anthropocite ont amélioré favorablement l'impact de la substitution par le Granulat Anthropocite sur le retrait du béton.

Il est à noter que le retrait mesuré sur les bétons de référence est de ce fait également fort (du fait de leur formulation).

Impact sur la porosité accessible à l'eau

La mesure de la porosité accessible à l'eau, selon la norme NF P18-459 [8], est donné dans le tableau ci-dessous. Il a été mesuré sur les formulations de bétons d'Anthropocite et de bétons témoins.

Tableau 7 : porosité accessible à l'eau des bétons d'Anthropocite

Ciment	CEM I		CEM II/A		CEM II/C			CEM III/A			CEM III/B
Béton	BA 10 %*	BA 20 %	BA 10 %*	BA 20 %	Béton témoin	BA 10 %*	BA 20 %	Béton témoin	BA 10 %*	BA 20 %	BA 20 %
Porosité 28j %	16,4	16,4	15,5	17,1	14,3	13,6	18,2	14,1	14,3	18,5	16,3
Porosité 90j %	15,7	17,9	16,5	18,4	13,9	12,3	19,1	13,0	16,5	17,3	16,3

Dans l'évaluation précédente, la substitution à hauteur de 10% de granulats Anthropocite induisait une augmentation de la porosité accessible à l'eau des bétons. La substitution à hauteur de 20% de granulats Anthropocite induit de nouveau une augmentation de la porosité accessible à l'eau des bétons.

Cela aura comme incidence de dégrader leur durabilité potentielle. De plus, nous constatons que suivant la nature du ciment utilisé, la porosité accessible à l'eau est plus ou moins impactée.

Réactivité vis-à-vis d'une attaque sulfatique interne

Du fait de la teneur élevée en sulfates (SO_4) dans le granulat Anthropocite, et suite au constat mentionné lors de l'ETPM, le demandeur a réalisé une étude relative à la réactivité des bétons d'Anthropocite vis-à-vis d'une réaction sulfatique interne.

Cette étude a été menée sur plusieurs formulations de béton formulés avec un ciment Portland type CEM I et avec un ciment aux laitiers type CEM III/B. Plusieurs taux de substitution des granulats naturels par le granulat Anthropocite ont été étudiés : 0% (témoin) ; 3% (référéncé BA10 car 10% des granulats [4-10] ont été substitués) ; 5 (référéncé BA 20 car 20% des granulats [4-10] ont été substitués) et 13 % (référéncé BA 50 car 50% des granulats [4-10] ont été substitués).

Les essais ont été menés selon les recommandations et le protocole des essais de performance LPC n°66 [40] [41].

Le protocole suivant a été mené :

- Fabrication des éprouvettes de bétons
- Traitement thermique incluant 72 h de maintien à 80°C préalablement à un refroidissement d'environ 55 h.
- Conservation en eau à 20°C

Par rapport au protocole du LPC n°66, la conservation en eau s'est effectuée avec un renouvellement en eau.

Les mesures suivantes ont été menées :

- Caractérisation sur béton frais (affaissement et teneur en eau)
- Mesures non destructives lors de la durée d'immersion (masse, gonflement, module dynamique selon NF P18-414)
- Mesures après 28 j, 90j et au-delà de 200 j d'immersion (résistance en compression NF EN 12390-3 ; porosité accessible à l'eau selon NF P18-459 , analyse ATG et MEB)

Tableau 8 : Etude RSI sur les bétons d'Anthropocite

Ciment	CEM I				CEM III/B			
Béton	Béton témoin	Béton Anthropocite			Béton témoin	Béton Anthropocite		
Substitution des granulats naturels 4/10 et 10/20	0%	3%	5%	13%	0%	3%	5%	13%
Affaissement (en cm)	15	14,5	5,5	4	12,5	10	10	4
Teneur en air (en %)	13	7,3	4,0	3,3	5,3	5,3	4,0	3,7
Résistance en compression NF EN 12390-3 (en MPa)								
Après 28 jours d'immersion	17,5	20,0	22,5	21,3	30,0	30,0	24,2	16,2
Après 200 jours d'immersion	20,8	23,3	25,8	24,9	39,2	37,5	30,0	25,8
Après 700 jours d'immersion	21,6	non mesuré	30,9	28,6	44,1	non mesuré	34,2	30,3
Déformation longitudinale moyenne (en %) – Seuil Essai de performance LPC n°66 : ≤ 0.04 % après 12 mois immersion								
Déformation longitudinale moyenne à 12 mois (en %)	0,010	0,015	0,020	0,015	0,000	0,005	0,010	0,010
Déformation longitudinale moyenne à 680 jours (en %)	0,018	Non mesuré	0,014	0,036	0,021	Non mesuré	0,011	0,007
Porosité accessible à l'eau NF P18-459 (en %)								
Après 28 jours d'immersion	10,0	10,4	14,6	17,9	10,0	5,4	12,1	17,1
Après 90 jours d'immersion	16,0	13,8	17,1	20,4	11,3	14,6	15,0	20,4
Après 200 jours d'immersion	13,0	non mesuré	16,7	24,2	10,0	non mesuré	16,3	20,8
Analyse thermogravimétrie ATG – perte de masse entre 85°C et 130°C (en %)								
Après 28 jours d'immersion	0,6	0,8	0,7	1,6	0,5	0,8	0,2	0,3
Après 90 jours d'immersion	0,7	non mesuré	1,5	4,4	0,7	1,0	1,4	1,9
Après 200 jours d'immersion	1,1	non mesuré	0,9	2,4	0,5	non mesuré	0,5	0,5

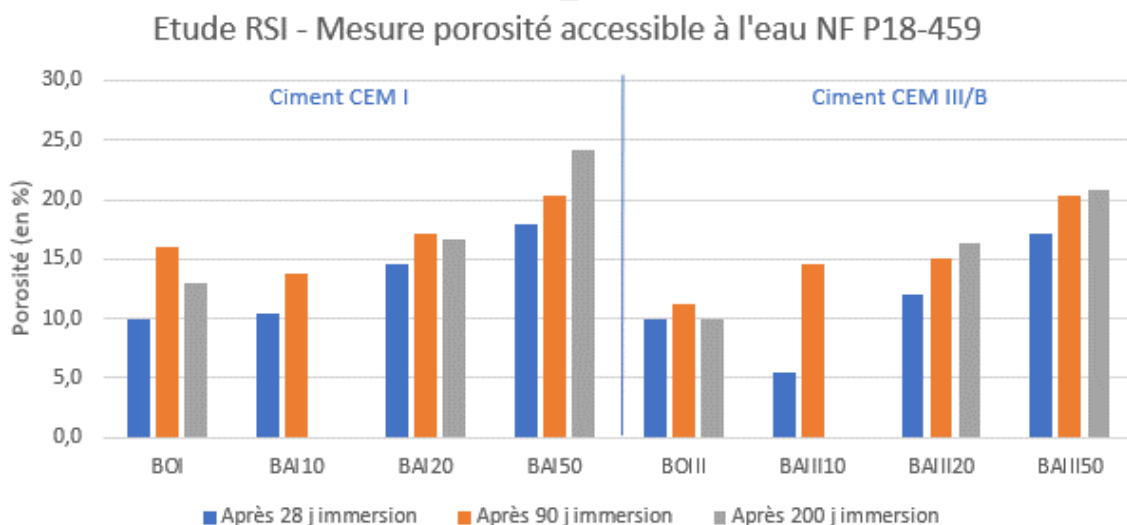


Figure 3 : Etude RSI sur les bétons d'Anthropocite – mesures de porosité NF P18-459

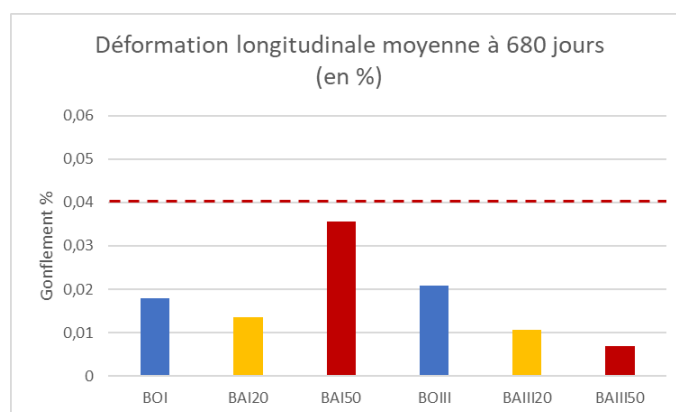


Figure 4 : Etude RSI sur les bétons d'Anthropocite – mesures de gonflement

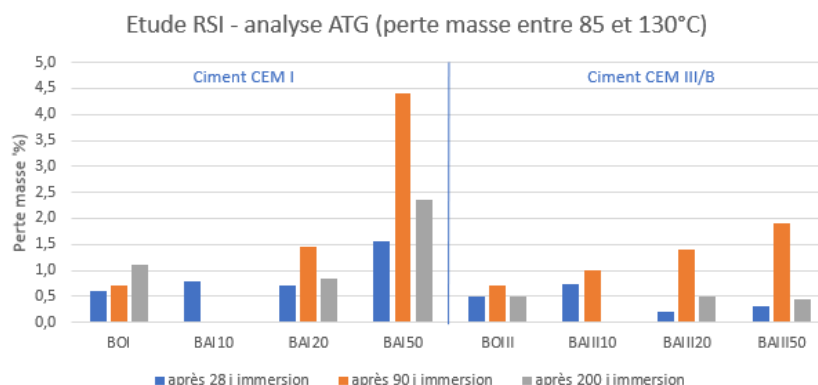


Figure 5 : Etude RSI sur les bétons d'Anthropocite – analyse ATG

Pour l'ensemble des formulations de béton testées, il n'est pas mesuré de gonflement supérieur à celui mesuré sur les bétons témoins, et le seuil de gonflement de 0.04% après 22 mois d'immersion n'est pas atteint.

La porosité accessible à l'eau des béton Anthropocite augmente avec la durée d'immersion, notamment pour les formulations à base de CEM I et notamment pour le taux de substitution le plus élevé.

Les mesures complémentaires d'ATG et d'observations en MEB montrent qu'il existe une relation entre taux de substitution, nature du ciment utilisé et l'apparition d'ettringite dans la matrice cimentaire. Après 90 jours d'immersion, on observe une forte augmentation de la teneur en ettringite. A 200 jours, cette quantité d'ettringite présente diminue, signe d'une transformation. Des observations en MEB ont été réalisées sur des échantillons de béton (CEM I et substitution Anthropocite à hauteur de 13%) après 200 jours d'immersion et ponctuellement la présence d'ettringite massive a été localisée dans la matrice cimentaire (dans certains résidus de clinker, pas à l'interface granulat / pâte).

Néanmoins, le dossier technique ne présentant pas de données fiables sur la teneur en sulfate des granulats testés dans l'étude de RSI, le taux de substitution d'Anthropocite dans les bétons est à limiter 13% d'Anthropocite pour les applications pouvant générer ce risque (pièces massives, risque de température à cœur supérieure à 80°C pendant le durcissement du béton, environnement humide).

CONTROLES

La fabrication du granulat Anthropocite doit faire l'objet d'un contrôle portant sur la régularité de la fabrication. Les contrôles à réaliser sont décrits au paragraphe 2.3 du Dossier Technique.

CONCLUSIONS

Appréciation globale

Le dossier technique présenté dans ce rapport a été établi dans l'hypothèse de l'utilisation du granulat Anthropocite pour la fabrication de béton utilisant plusieurs ciments conformes à la norme NF EN 197-1 (de type CEM I, CEM II/A, CEM III/A et CEM III/B) ou à la norme NF EN 197-5 (de type CEM II/C) pour les résultats d'essais présentés, et un taux de substitution du granulat Anthropocite à hauteur de 20% maximum de la masse de gravillon et pour un usage non armé, tel le béton de propreté, le béton de tranchés, le béton de pose de bordure et le béton de remplissage non armé.

Les éléments du dossier technique n'ont pas fait apparaître d'incompatibilité de nature à écarter à priori l'utilisation envisagée.

Il convient néanmoins de prendre en considération les éléments suivants, dans la formulation et l'utilisation du béton d'Anthropocite :

- Les bétons d'Anthropocite sont destinés à un usage non armé et exempts de risques liés à l'abrasion, l'attaque chimique ou par le gel-dégel (Classe d'exposition X0 au sens de la norme NF EN 206+A2/CN).
- Du fait de l'absence de justification, l'emploi de granulats recyclés est exclu des formulations de bétons Anthropocite.
- Dans le cas d'un emploi de béton Anthropocite dans des applications pouvant générer un risque d'attaque sulfatique interne, au sens des Recommandations³ pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne (pièces massives pouvant présenter une température à cœur supérieure à 80°C pendant le durcissement, environnement humide prolongé), le taux de substitution du granulat Anthropocite est limité à 13%.
- Dans les cas où une résistance au gel/dégel serait à justifier, il conviendra de documenter le bon comportement du béton d'Anthropocite vis-à-vis de cette sollicitation environnementale.
- Le coefficient élevé d'absorption d'eau du granulat est à prendre en compte dans la formulation d'un béton (pré humidification du granulat cf. dossier technique §3.3).

³ Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne, Guide Technique IFSTTAR, Octobre 2017

- L'utilisation du granulat Anthropocite induit un impact sur certaines propriétés du béton : réduction du maintien de rhéologie, réduction des performances mécaniques par rapport à une formulation analogue sans granulat Anthropocite.

Il est rappelé que cette évaluation n'a pas vocation à couvrir l'ensemble des critères d'aptitude à l'emploi pour chacune des applications envisagées. C'est normalement l'objet des Avis Techniques qui pourront être instruits sur la base de la présente évaluation et des éventuelles justifications complémentaires nécessaires.

Validité jusqu'au : 26.07.2028 (5 ans)

Direction Sécurité, Structures et Feu
La Directrice

« Valérie GOURVES »

DOSSIER TECHNIQUE ETABLI PAR LE DEMANDEUR

1. INTRODUCTION

Le béton d'Anthropocite est un béton innovant créé par la société Néolithe. La caractéristique principale de ce béton réside dans le fait qu'il est constitué jusqu'à 20% de granulats Anthropocite. Ces granulats sont composés à 80% de déchets non-inertes non dangereux ne pouvant faire l'objet d'un recyclage. Ils sont communément appelés les refus de tri des déchets de chantiers. Le procédé de transformation de ces déchets en granulats utilisables pour le béton est la fossilisation, procédé utilisant une machine appelée fossilisateur développée par Néolithe.

Le béton d'Anthropocite permet ainsi la création d'un exutoire pour 30 millions de tonnes de déchets habituellement enfouis ou incinérés [1]. Ce béton se distingue des autres bétons par la faible empreinte carbone issue de sa fabrication. En effet en plus du granulats Anthropocite qui fait du stockage carbone (sanctuarisation du bois, plastique et autres déchets par rapport à l'enfouissement ou l'incinération), l'utilisation de ciments à empreinte carbone réduite permet de diminuer l'empreinte environnementale de ce béton.

La fabrication des granulats est réalisée en broyant les refus des centres de tri du BTP et en mélangeant ces refus avec un liant spécialement créé par Néolithe puis en mettant sous pression ce mélange afin de réaliser un granulats à la bonne densité.

La présente Evaluation Technique porte sur le béton d'Anthropocite.

Au sein de ce rapport nous distinguons :

- Les granulats Anthropocite dont la phase de fabrication est assurée par les fossilisateurs Néolithe ;
- Et la fabrication du béton d'Anthropocite réalisée par les centrales de béton dans des conditions communes aux autres bétons.

2. FABRICATION DU GRANULAT

2.1 Compositions des matières premières

La composition de ce refus de tri était très peu connue jusqu'à peu. Néolithe a fait le choix de monter un bureau d'étude en interne pour connaître leur composition. Une méthode a été conçue par l'entreprise pour l'analyser, la méthode Expertriz, très proche de la méthode MODECOM utilisée par l'ADEME pour analyser la composition des Ordures Ménagères réalisée selon la norme NF X30-408 : Déchets ménagers et assimilés – Méthode de caractérisation. Les résultats sont présentés ci-dessous :

Tableau 9 : Répartition des différentes matières sur les échantillons étudiés

<i>Etiquettes de lignes</i>	Répartition des matières	%Ecart Type
<i>Bitumineux</i>	3,1%	1,40%
<i>Bois</i>	15,5%	0,36%
<i>Inerte</i>	33,0%	0,19%
<i>Laine de Verre</i>	0,7%	0,41%
<i>Mousses</i>	1,0%	0,31%
<i>Polystyrène</i>	0,9%	0,31%
<i>Métaux</i>	1,9%	0,33%
<i>Papier ou carton</i>	10,0%	0,23%
<i>Plastique mou</i>	1,6%	0,54%
<i>Plastiques durs</i>	10,2%	0,46%
<i>Plâtre</i>	10,3%	0,20%
<i>PoidsFraction0-4</i>	8,5%	1,07%
<i>Textile ou moquette</i>	3,4%	0,55%
<i>Total général</i>	100,0%	0,04%

Cette étude a permis de dégager la composition moyenne des déchets non dangereux non recyclables utilisés pour les premiers granulats et de prouver la relative homogénéité au cours du temps de ce type de déchet. L'étude a comporté les étapes suivantes :

- Réception des déchets du centre de tri
- Tri effectué à l'aide d'un trommel sur une base granulométrique
- Tri manuel réalisé par différents opérateurs selon la typologie de déchets. Les catégories de déchets retenues sont :
 - o Textile
 - o Plâtre
 - o Métaux (qui ne feront pas partis du granulat car nous faisons un tri métallique des déchets)
 - o Bois
 - o Plastiques durs
 - o Isolants (séparés entre isolant plastique et laines minérales)
 - o Plastiques mous
 - o Papier / Carton
 - o Poussières

Comme cela a été écrit plus haut, cette composition est susceptible de subir des variations selon :

- La localisation du centre de tri et les procédés de constructions locaux
- La période de l'année
- La qualité du tri effectué

Aussi, pour chaque nouveau fossilisateur, une étude en amont des déchets sera réalisée afin d'évaluer une composition standard des déchets du fossilisateur étudié qui donnera la référence de celui-ci.

Dans le cas d'une différence significative entre cette composition et les compositions de référence, les formules de liant seront adaptées afin que les caractéristiques des granulats correspondent à minima à celles énoncées dans la partie granulat de cette ETPM.

6 mois après la première étude, une nouvelle étude est réalisée afin d'évaluer si une modification significative des déchets a eu lieu du fait de la saisonnalité de la production de déchet. Cette étude sera comparée à l'étude de référence, si des déviations sont constatées, une étude sur les granulats et leur utilisation dans le béton sera menée afin de vérifier si nous sommes toujours dans caractéristiques énoncées et dans le cas contraire des correctifs seront appliqués.

De plus Néolithe se réserve le droit de faire une nouvelle étude sur les déchets si une déviation importante des caractéristiques des granulats est observée.

Le liant employé pour la fabrication des granulats Anthropocite a été développé par Néolithe.

La fabrication du liant est réalisée au sein des locaux de Néolithe, des contrôles sont effectués régulièrement pour vérifier la constance de ses caractéristiques.

2.2 Fabrication

Le processus de fabrication des granulats Anthropocite est un processus industriel multi-étapes innovant.

Les principales étapes sont nommées ci-dessous. Ce process de transformation des matières premières en granulats a été breveté par Néolithe le 14 août 2020 sous le numéro FR3092578 A1.

La fabrication a lieu dans une installation appelée fossilisateur. Les étapes clés du processus sont :

- Chargement des matières
- Evacuation des matières non-traitées (métaux, masse trop importante)
- Différentes étapes de broyage jusqu'à l'obtention d'une granulométrie satisfaisante
- Ajout du liant et mélange
- Mise en forme-Vieillissement
- Sortie de process

2.3 Contrôle

Dans le cadre du contrôle de production, des essais sont effectués sur nos granulats par le laboratoire interne à Néolithe et au besoin par un laboratoire extérieur à Néolithe.

Un premier contrôle visuel est réalisé sur le lot de granulat. Puis, nous procédons à des essais sur la production selon la date de début d'exploitation du fossilisateur et donc de la production de granulats.

Les principaux essais réalisés sont :

- Granulométrie (NF EN 993-1)
- Sulfates solubles dans l'eau (NF EN 1744-1)
- Los Angeles (NF EN 1097-2)
- Masse volumique et absorption d'eau (NF EN 1097-6 §8 et 9)
- Perte au feu à 950°C (NF EN 1744-1)
- Lixiviation (NF EN 12457-4)

Les seuils de non-conformité sont définis par les caractéristiques décrites dans l'ETPM. Ces caractéristiques sont la borne maximale que les granulats peuvent atteindre à l'âge de 28 jours, un granulat pour être considéré comme conforme doit avoir des caractéristiques égales ou meilleures à celles proposés dans l'ETPM.

Le contrôle qualité des granulats prend pour base la norme des granulats béton selon la norme NF EN 12620 [5]. Des essais supplémentaires (lixiviation par exemple) sont réalisés. La fréquence de certains contrôles (absorption d'eau) est augmentée.

2.4 Condition de conservation et traitement thermique

A l'issue du process de fabrication, les granulats Anthropocite sont stockés, par jour de production, sur des zones distinctes et identifiables. Ces zones sont identifiables grâce à un numéro ainsi qu'un marquage au sol.

Ces zones doivent être sèches, couvertes et sans humidité afin de fiabiliser l'intégration des granulats dans le béton et de permettre :

- Un processus simple et reproductible d'intégration des granulats
- De limiter la fragmentation et la production de fines des granulats au jeune âge.

Les aires de stockage sont propres pour limiter au maximum un risque de contamination.

Les granulats sont protégés des intempéries, y compris après la livraison aux centrales à béton

2.5 Conditionnement et livraison

L'entreprise Néolithe délègue la livraison des granulats. Les granulats sont livrés aux centrales BPE par camion devant recouvert d'une bâche pour éviter l'humidité, dans des bennes ou des big-bags en vue d'un stockage au sein de cases à granulats.

Chaque livraison est accompagnée d'un bon de livraison récapitulant les informations les plus importantes. Il indique :

- Nom du client
- Numéro du bon et la date
- La destination des livraisons
- Le nom du transporteur et la plaque d'immatriculation du véhicule
- Le produit chargé et son code⁴
- Le poids brut, la tare et le poids net

⁴ Le code donne le fossilisateur, le jour de production et l'opérateur présent.

3. FABRICATION DU BETON A BASE DE GRANULATS NEOLITHE

Le béton d'Anthropocite proposé par Néolithe est un béton à caractéristique à base de différents types de ciments.

3.1 Centre de fabrication

Pour pouvoir être utilisé en centrale à béton, celle-ci doit disposer de la marque NF et être équipée de :

- Silos de stockage pour le ciment
- Cases à granulats couvertes pour l'Anthropocite
- Pompes à adjuvant
- Malaxeur

La centrale aura une formation pour l'utilisation du granulat en préalable des premiers chantiers. Cette formation comprendra notamment le rappel des formules autorisées par l'ETPM ainsi que des recommandations de mise en œuvre par rapport aux caractéristiques spécifiques de l'Anthropocite.

3.2 Composition

Le béton proposé est défini par l'utilisation d'un mélange granulaire respectant les caractéristiques présentées précédemment et d'un ciment de type listé dans le Tableau 10 ci-dessous.

Tableau 10 : Choix des ciments validés pour la formulation de béton d'Anthropocite

Types de Ciment	Abréviation
CEM I 52,5 N CE PM CP2 NF	CEM I
CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N NF	CEM II/C
CEM II/A-LL 42,5 R CE PM - CP2 NF	CEM II/A
CEM III/A 42,5 N-LH CE PM-ES NF	CEM III/A
CEM III/B 42,5 N - LH/SR CE PM NF	CEM III/B

Le béton est fabriqué sur place ou en centrale, tant que les ciments sont couverts par la marque NF et que la formule granulaire correspond aux caractéristiques énoncées.

La composition des bétons utilisés dans l'étude est la suivante. Une substitution des granulats naturels par l'Anthropocite a été réalisée entre 5% et 20% en masse (seuls les gravillons sont substitués). Il est évidemment possible de modifier la formule de ce béton en utilisant le savoir-faire de l'homme du métier.

Les caractéristiques du béton décrites restent cependant valables uniquement pour une substitution de 20% maximum de granulat naturel par de l'Anthropocite (exclusion d'un mélange avec des granulats artificiels ou recyclés) et un ciment de la nature décrite Tableau 10 ci-dessus. Toute nouvelle formulation doit faire l'objet d'essais préliminaires.

Tableau 11 : Formulation du béton d'Anthropocite destiné aux essais initiaux

Composant	Formulations béton Anthropocite	Unité
Taux de substitution Anthropocite	5% à 20%	
Ciment	230 à 300	Kg/m ³
Eau totale*	Entre 140 et 170	Kg/m ³
E _{eff} /C	0,51 à 0,65	

*La quantité d'eau utilisée sera différente pour chaque formulation et dépendra de chaque type de ciment utilisé.

La composition des différents bétons est présentée en annexe. Le détail des formulations a été déposé auprès du CSTB.

3.3 Fabrication (process)

Du fait du taux d'absorption élevé des granulats anthropocites et pour minimiser l'absorption des adjuvants par les granulats anthropocites pendant la fabrication, il existe deux méthodes de fabrication du béton anthropocite :

- Méthode 1 (pour les petits volumes de fabrication, en laboratoire par exemple) : Saturer les granulats dans l'eau avant 15 minutes de production, puis continuer avec le même processus que pour le béton normal.
- Méthode 2 (pour les volumes de béton plus importants) : Introduire les granulats secs avec les matériaux secs dans le malaxeur, puis ajouter 50% de la quantité d'eau sans adjuvant et mélanger pendant 30 à 60 secondes, puis ajouter le reste de l'eau + l'adjuvant et mélanger pendant 2 à 3 minutes.

La fabrication du béton à base de granulats Anthropocite ne diffère pas de la fabrication habituelle de béton. Le mélange est réalisé en centrale BPE avant d'être transporté jusqu'au lieu d'installation par camion toupie. Des essais seront réalisés dans un second temps pour déterminer le temps idéal de transport pour permettre une meilleure rhéologie.

3.4 Conditions de conservation et traitement thermique

Les conditions de conservation du béton à base de granulats Anthropocite sont les mêmes que pour un béton traditionnel. Il convient d'éviter une évaporation de l'eau avant que celle-ci n'ait hydraté les grains de ciment.

3.5 Réception de la gâchée et contrôle

Lorsque la gâchée est réceptionnée sa rhéologie est vérifiée à l'aide de la mesure d'affaissement réalisée au cône d'Abrams selon la norme NF EN 12350-2 [14]. Le contrôle du béton devra être mené avec les mêmes attention qu'un béton classique fournis par une centrale de marque NF.

En cas de modification de la formule proposée, Néolithe recommande la réalisation d'au minimum une épreuve d'étude avec mesure des résistances à la compression à 7 et 28 jours selon la norme NF EN 12390-3 [16] ainsi qu'un test au cône d'affaissement selon la norme NF EN 12350-2 [14]. Si les classes de résistance et de consistance sont respectées, l'épreuve d'étude est validée.

4. DOMAINE D'EMPLOI

Le béton d'Anthropocite proposé est un béton bas carbone destiné pour des applications utilisant des bétons non normés sans problématique de classe d'exposition ni de durabilité.

Exemples non exhaustifs d'ouvrages visés :

- Béton de propreté
- Béton de tranché
- Béton de pose de bordure de trottoir
- Béton de remplissage non ferrailé
- Gros béton

5. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les granulats soumis aux essais ci-dessous ont été réalisés sur plusieurs jours consécutifs. La production se faisant en intérieur, l'humidité est restée constante tout au long de cette période de fabrication. Les granulats ont été Extrudés et la fraction 11-22 récupérée après tamisage. Un prélèvement de 300 kilogrammes a été réalisé sur cette production pour la réalisation des éprouvettes béton et des tests sur granulats.

5.1 Description visuelle

La figure ci-dessous présente la répartition de l'Anthropocite au sein du béton fabriqué pour les essais présentés dans l'ETPM.



Figure 6 : Répartition de l'Anthropocite au sein d'un béton (coupe d'échantillon et vue après rupture en compression)

5.2 Sur les granulats

5.2.1 Lixiviation – Selon norme NF EN 12457-4

Les essais de lixiviation sur granulats ont été effectués sur un lot de 15 granulats par le laboratoire Eurofins [20], suivant la norme NF EN 12457-4 [9].

La lixiviation réalisée sur les granulats a permis l'obtention des résultats du tableau 8 ci-dessous. Afin de proposer une référence, l'ensemble des résultats peut être comparé avec les recommandations du guide SETRA [3].

Ainsi par rapport à ce guide nous pouvons noter que nous rentrons dans les recommandations d'utilisation pour la caractérisation environnementale de niveau 1 sauf pour les sulfates.

Tableau 12 : Synthèse des résultats de lixiviation sur granulats Anthropocite selon la norme NF EN 12457-4 [9]

Tests	Granulat (lix<10 mm) (mg/kg de matière sèche)
Somme des HAP	0,3
Somme PCB (7)	0,02
Somme des BTEX	0.05
Carbone Organique Total (COT) sur éluat	2060
Chlorures sur éluat	295
Fluorures sur éluat	<5.00
Sulfate (SO4) sur éluat	14800
Arsenic (As) ICP/AES sur éluat	<0.10
Baryum (Ba) ICP/AES sur éluat	0.7
Chrome (Cr) (ICP/AES) sur éluat	0.37
Cuivre (Cu) ICP/AES sur éluat	4,1
Molybdène (Mo) (ICP/MS) sur éluat	0.491
Nickel (Ni) ICP/AES sur éluat	0.35
Plomb (Pb) ICP/AES sur éluat	<0.10
Zinc (Zn) (ICP/AES) sur éluat	<0.10
Mercure (Hg) sur éluat	<0.001
Antimoine (Sb) (ICP/MS) sur éluat	0.007
Cadmium (Cd) (ICP/MS) sur éluat	<0.002
Sélénium (Se) (ICP/MS) sur éluat	0.014
pH du lixiviat	11,1 ± 0,2

5.2.2 Analyse de la radioactivité – Selon norme NF EN 12457-4

Les analyses de radioactivité sur granulats ont été effectuées par le laboratoire Algave [34], suivant la norme NF EN ISO 18589-3 [8], sur un échantillon de granulat Anthropocite.

Les principaux résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 13 : Synthèse des résultats de caractérisations radiologiques sur granulats Anthropocite selon la norme NF EN ISO 18589-3 [8]

Tests	Granulat Anthropocite
Radium 226 (Bq/kg MS)	33,6
Thorium 232 (Bq/kg MS)	19
Potassium 40 (Bq/kg MS)	578
Indice de concentration d'activité	0,40

5.2.3 Los Angeles – Selon norme NF EN 1097-2

Les mesures du coefficient Los Angeles ont été effectuées sur un lot de 15 prélèvements de granulat Anthropocite par Néolith [33] selon la norme NF EN 1097-2 [10].

Cette mesure a été effectuée sur un lot de granulat Anthropocite.

La valeur du coefficient de Los Angeles est de **55,7%**.

5.2.4 Sulfates – Selon norme NF EN 1744-1

Les mesures du teneur en sulfate ont été effectuées sur un lot de 15 prélèvements de granulat Anthropocite par Néolith [33] selon la norme NF EN 1744-1 [11].

Cette mesure a été effectuée sur un lot de granulat Anthropocite.

Le pourcentage de sulfates solubles dans notre granulat est de **3,66%**.

5.2.5 Masse volumique – Selon norme NF EN 1097-6

Les mesures de masse volumique ont été effectuées sur un lot de 15 prélèvements de granulat Anthropocite par Néolithe [33] selon la norme NF EN 1097-6 [12].

Cette mesure a été effectuée sur deux lots de granulat Anthropocite.

La masse volumique réelle du granulat Anthropocite est de **1,56 t/m³**.

5.2.6 Absorption d'eau – Selon norme NF EN 1097-6

Les mesures du coefficient d'absorption d'eau ont été effectuées sur un lot de 15 prélèvements de granulat Anthropocite par Néolithe [33] selon la norme NF EN 1097-6 [12].

Cette mesure a été effectuée sur deux lots de granulat Anthropocite.

L'absorption d'eau mesurée est de **18,3%**.

5.2.7 Perte au feu à 950 °C – Selon norme NF EN 1744-1

Les mesures de perte au feu ont été effectuées sur un lot de 15 prélèvements de granulat Anthropocite par le laboratoire AFQS [33] selon la norme NF EN 1744-1 [11].

La perte au feu mesurée à 950°C est de **21,64%**

5.2.8 Classement relatif aux émissions de polluants volatils

Des mesures d'émissions de polluants volatils ont été effectuées sur le granulat Anthropocite par le CSTB [35] selon la norme NF ISO 16000-3 et NF ISO 16000-6.

Les émissions des granulats de construction ANTHROPOCITE sont classées **A+** selon le décret n° 2011-321 du 23 mars 2011 relatif à l'étiquetage des produits de construction ou de revêtements de mur ou de sol et des peintures et vernis sur leurs émissions de polluants volatils et l'arrêté du 19 avril 2011.

Les émissions des granulats de construction ANTHROPOCITE sont conformes aux exigences du protocole AFSSET 2009.

Les émissions des granulats de construction ANTHROPOCITE sont conformes aux exigences des arrêtés du 30 avril 2009 et du 28 mai 2009 relatifs aux conditions de mise sur le marché des produits de construction et de décoration contenant des substances cancérigènes, mutagènes ou reprotoxiques de catégorie 1 ou 2 (concentrations d'exposition à 28 jours inférieures à 1 µg/m³).

5.2.9 Dangerosité de granulat Anthropocite

Une évaluation de la dangerosité du granulat Anthropocite a été menée par Ineris [41].

Le caractère non dangereux de l'échantillon de granulats Néolithe a ainsi été établi par calcul, au regard des règles fixées par les règlements (UE) n°1357/2014 et n°2017/997 modifiant la Directive 2008/98/CE5, dite Directive Cadre Déchets, selon les hypothèses de spéciation retenues sur la base des informations transmises par Néolithe (notamment sur l'absence de chaux libre permettant d'écarter les propriétés HP4 et HP8 malgré le pH élevé) ; il est souligné que cette conclusion repose sur l'absence d'amiante, de bois potentiellement traités avec des substances POP (notamment, de pentachlorophénol de potassium) et de matières plastiques potentiellement ignifugées dans les gisements de déchets utilisés. Ainsi, Néolithe devra s'assurer que les déchets utilisés ont fait l'objet d'opérations de tri visant à séparer l'amiante et à extraire les bois potentiellement traités et les matières plastiques potentiellement ignifugées.

⁵ Directive 2008/98/CE du Parlement Européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives

5.3 Sur le béton

Voici les deux formulations extrêmes basées sur des substitutions de 20 % et de 5 %, les résultats des autres formulations intermédiaires se trouvent en annexe.

Tableau 14 : Formulation du béton d'Anthropocite

Composant	Formulation 20% de substitution	Formulation 5% de substitution	Unité
Ciment	300	230	Kg/m ³
Sables 0/2	805	835	Kg/m ³
Granulat 4/11	290	380	Kg/m ³
Granulat 11/20	490	673	Kg/m ³
Anthropocite	186	55	Kg/m ³
Eau totale	160-170*	140-150*	Kg/m ³
E_{eff}/C	0,50-0,53*	0,60-0,63*	
Adjuvant**	0,66% /ciment	0,55% /ciment	Kg/m ³

* Le rapport E_{eff}/C utilisée sera différent pour chaque formulation et dépendra de chaque type de ciment utilisé.

** Plusieurs références d'adjuvantation ont été utilisées pour la formulation des bétons. Néolithe met à la disposition de l'utilisateur la liste des adjuvants validés par ses soins.

5.3.1 Affaissement – Selon norme NF EN 12350-2

Les mesures de consistance et de maintien de rhéologie ont été effectuées sur les différentes formulations de béton (béton d'Anthropocite et béton témoin) par le laboratoire AFQS [22] à [33] selon la norme NF EN 12350-2 [14].

Dans l'étude, les granulats ont fait l'objet d'une saturation préalable avant 15 minutes des essais.

Les essais ont été réalisés sur tous les types de ciment indiqués dans le tableau 14 pour la formulation à base de 20% de granulat Anthropocite, et uniquement sur le CEM II/A (le plus utilisé sur le marché français) pour la formulation à base de 5% de granulat Anthropocite.

Les résultats d'affaissement du béton composé d'Anthropocite, en comparaison avec le béton témoin, sont les suivantes :

Tableau 15 : Maintien de rhéologie du béton d'Anthropocite

Taux de substitution de l'Anthropocite	Affaissement Béton d'Anthropocite				
	Ciment utilisé	t0 min	t30	t60	t90
20%	CEM I à 300 kg/m ³	S5	S5	S4	S4
	CEM II/A à 300 kg/m ³	S4	S4	S3	S3
	CEM II/C à 300 kg/m ³	S4	S4	S3	S2
	CEM III/A à 300 kg/m ³	S4	S3	S2	S2
	CEM III/B à 300 kg/m ³	S4	S4	S4	S3
5%	CEM II/A à 230 kg/m ³	S1	S1	S1	S1
0% (référence)	CEM II/A à 230 kg/m ³	S2	S1	S1	S1

5.3.2 Teneur en air sur béton frais et sur béton durci – Selon la norme NF EN 12350-7

Les mesures de teneur en air sur béton frais et sur béton durci ont été effectuées sur les deux formulations de béton par le laboratoire AFQS [22] à [31] selon les normes NF EN 12350-7 [15] et sont présentées ci-dessous.

Tableau 16 : Teneur en air du béton d'Anthropocite

Teneur en air occlus, selon NF EN 12350-7 (en %)		
	Formulations	Béton d'Anthropocite
Formulation 20%	CEM I à 300 kg/m ³	2,4
	CEM II/A à 300 kg/m ³	3,4
	CEM II/C à 300 kg/m ³	7,9
	CEM III/A à 300 kg/m ³	5,8
	CEM III/B à 300 kg/m ³	6,6
Formulation 5%	CEM II/A à 230 kg/m ³	4,8
0% (référence)	CEM II/A à 230 kg/m ³	3,8

5.3.3 Masse volumique sur béton frais et sur béton durci – Selon les normes NF EN 12350-6 et NF EN 12390-7

Les mesures de masse volumique sur béton frais et sur béton durci ont été effectuées sur les deux formulations de béton par le laboratoire AFQS [22] à [33] selon les normes NF EN 12350-6 [13] et NF EN 12390-7 [17] et sont présentées ci-dessous.

Tableau 17 : Masse volumique du béton d'Anthropocite

Masse volumique Béton d'Anthropocite			
	Formulations	Masse volumique béton frais (kg/m ³) (NF EN 12350-6)	Masse volumique béton durci (kg/m ³) (NF EN 12390-7)
Formulation 20%	CEM I à 300 kg/m ³	2 336	2 260
	CEM II/A à 300 kg/m ³	2 315	2 264
	CEM II/C à 300 kg/m ³	2 220	2 176
	CEM III/A à 300 kg/m ³	2 254	2 227
	CEM III/B à 300 kg/m ³	2 239	2 217
Formulation 5%	CEM II/A à 230 kg/m ³	2 425	2 358
0% (référence)	CEM II/A à 230 kg/m ³	2 453	2 370

Le béton d'Anthropocite possède une masse volumique inférieure à celle d'un béton traditionnel.

5.3.4 Résistance à la compression (en MPa) : 7, 28, 90 j – Selon norme NF EN 12390-3

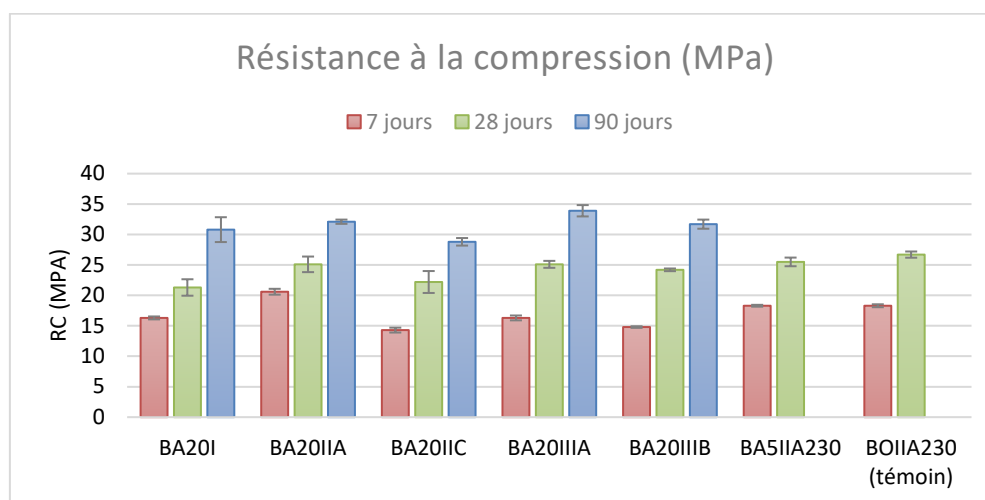
Les mesures de résistance à la compression ont été effectuées sur 3 éprouvettes par formulations de béton par le laboratoire AFQS [22] à [33] selon la norme NF EN 12390-3 [16] sur des cylindres de dimensions Ø11x22 cm conservés en eau à 20°C.

Dans l'étude, les granulats ont fait l'objet d'une saturation préalable avant 15 minutes des essais.

Les résultats de résistance en compression sont les suivants :

Tableau 18 : Résistance en compression du béton Anthropocite et béton de témoin

	Résistance en compression NF EN 12390-3 - Béton d'Anthropocite (moyenne / écart type en MPa)							
	Formulations	7 jours		28 jours		90 jours		Classe de résistance
Formulation 20%	CEM I à 300 kg/m³	16,3	0,2	21,3	1,4	30,8	2,0	C16/20
	CEM II/A à 300 kg/m³	20,6	0,5	25,1	1,3	32,1	0,4	C20/25
	CEM II/C à 300 kg/m³	14,3	0,4	22,2	1,8	28,8	0,6	C16/20
	CEM III/A à 300 kg/m³	16,3	0,4	25,1	0,6	33,9	0,9	C20/25
	CEM III/B à 300 kg/m³	14,8	0,1	24,2	0,2	31,7	0,8	C20/25
Formulation 5%	CEM II/A à 230 kg/m³	18,3	0,2	25,5	0,9			C20/25
0% (référence)	CEM II/A à 230 kg/m³	18,3	0,2	26,7	0,7			C20/25


Figure 7 : Résistance en compression du béton d'Anthropocite

Le béton d'Anthropocite évalué dans ce document est un béton de classe C16/20 et C20/25 au sens de la norme NF EN 206 [6] et de l'Eurocode 2.

5.3.5 Porosité accessible à l'eau (en %) : à 28 et 90 j – Selon norme NF P 18-459

La porosité ouverte est un paramètre de premier ordre qui caractérise les propriétés mécaniques du béton. Elle représente la part de vide contenu dans le matériau à l'état durci.

La mesure de la porosité accessible à l'eau a été réalisée conformément à la norme. Les mesures ont été effectuées sur les différents formulations de béton à base de 20% de granulat Anthropocite par le laboratoire AFQS [22] à [33] selon la norme NF P 18-459 [18] sur des cylindres de dimensions Ø11x5 cm conservés en eau à (20 ± 2°C).

Dans l'étude, les granulats ont fait l'objet d'une saturation préalable avant 15 minutes des essais.

Les résultats de la mesure de porosité accessible à l'eau les suivants :

Tableau 19 : Porosité accessible à l'eau du béton d'Anthropocite et du béton témoin

Formulation	Substitution 20% d'Anthropocite				
	CEM I à 300 kg/m ³	CEM II/A à 300 kg/m ³	CEM II/C à 300 kg/m ³	CEM III/A à 300 kg/m ³	CEM III/B à 300 kg/m ³
codification	BA20I	BA20IIA	B BA20IIC	BA20IIIA	BA20IIIB
Porosité 28j %	16,4	17,1	18,2	18,5	16,3
Porosité 90j %	17,9	18,4	19,1	17,3	16,3

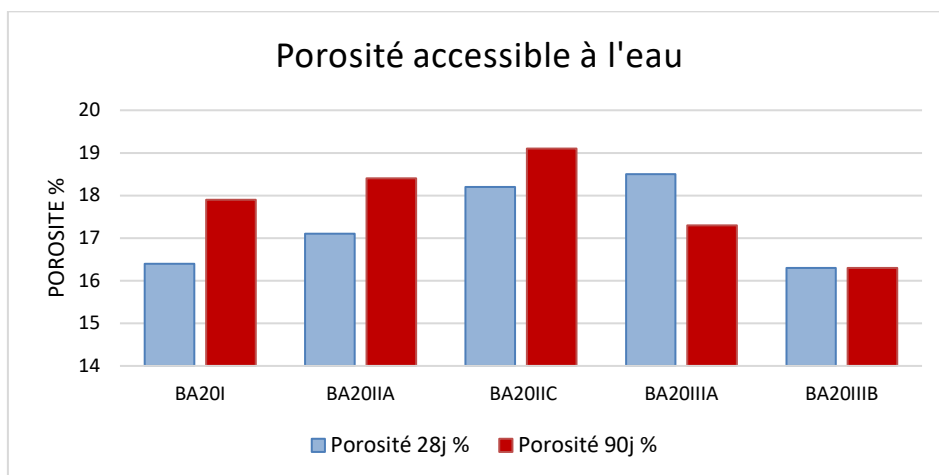


Figure 8 : Porosité accessible à l'eau des bétons d'Anthropocite

5.3.6 Retrait total au séchage – Selon norme NF EN 12390-16

Les mesures de retrait de séchage ont été effectuées sur les deux formulations de béton par le laboratoire AFQS [22] à [33] selon la norme NF EN 12390-16 [19].

Dans l'étude, les granulats ont fait l'objet d'une saturation préalable avant 15 minutes des essais.

Les résultats sont présentés ci-dessous.

Tableau 20 : Retrait de séchage des bétons d'Anthropocite et des bétons de référence

Retrait total après 56 jours de séchage en $\mu\text{m}/\text{m}$ (Valeur moyenne basée sur des séries de 3 mesures)			
Substitution	Ciment	Codification	Moyenne
Formulation 20%	CEM I à 300 kg/m^3	BA20I	439
	CEM II/A à 300 kg/m^3	BA20IIA	374
	CEM II/C à 300 kg/m^3	BA20IIC	682
	CEM III/A à 300 kg/m^3	BA20IIIA	596
	CEM III/B à 300 kg/m^3	BA20IIIB	460

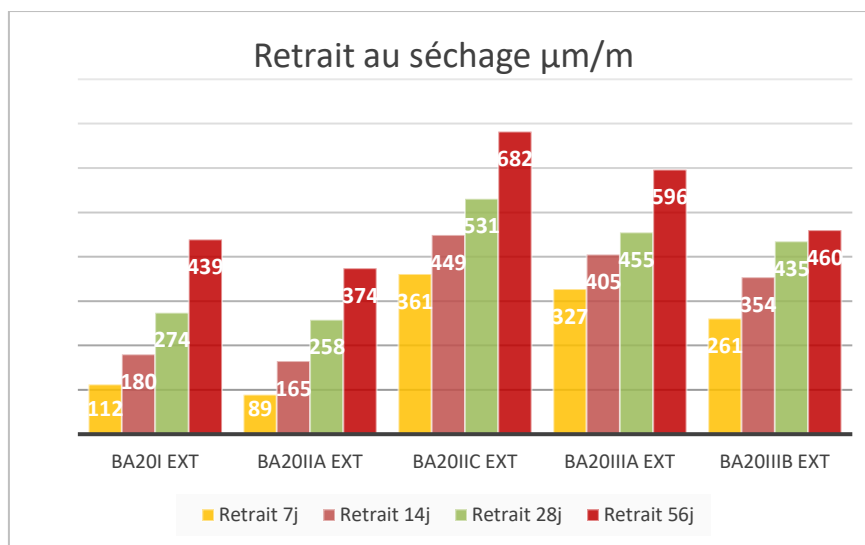


Figure 9 : Retrait de séchage (en $\mu\text{m}/\text{m}$) à différentes échéances (en jours) des bétons d'Anthropocite

5.3.7 Lixiviation sur béton broyé – Selon la norme NF EN 12457-2

Les mesures de lixiviation sur béton durci ont été effectuées sur broyat des deux formulations de béton par le laboratoire Eurofins [21], Inovalys [40] et Filab [42] selon la norme NF EN 12457-2 [7] et sont présentés ci-dessous.

Tableau 21 : Synthèse des résultats de lixiviation sur granulas Anthropocite et béton témoin selon la norme NF EN 12457-2

Tests / Formulations béton d'Anthropocite	BA20IIA (Mg/kg de matière sèche)	BA20IIIB (Mg/kg de matière sèche)
Hydrocarbures totaux (4 tranches) (C10-C40)	140	140
Somme des HAP	<0,05	0,150
Somme PCB (7)	<0,010	<0,010
Somme des BTEX	0,19	0,06
Carbone Organique par oxydation (COT) sur éluat	190	146
Chlorures sur éluat	29,8	150
Fluorures sur éluat	<5.00	2,4
Sulfate (SO4) sur éluat	622	690
Arsenic (As) ICP/AES sur éluat	<0,101	<0,01
Baryum (Ba) ICP/AES sur éluat	2,43	2,90
Chrome (Cr) ICP/AES sur éluat	<0,002	0,04
Cuivre (Cu) ICP/AES sur éluat	0,15	0,20
Molybdène (Mo) ICP/MS sur éluat	0,128	0,41
Nickel (Ni) ICP/AES E sur éluat	0,135	0,04
Plomb (Pb) ICP/AES sur éluat	<0,101	0,01
Zinc (Zn) ICP/AES sur éluat	<0,101	0,04
Mercure (Hg) sur éluat	<0,001	<0,005
Antimoine (Sb) ICP/MS sur éluat	<0,01	<0,01
Cadmium (Cd) ICP/MS sur éluat	<0,002	0,0005
Sélénium (Se) ICP/MS sur éluat	<0,01	<0,01
pH sur lixiviat	-	11,8

5.3.8 Impact environnemental

Selon l'ICV des granulats Anthropocite obtenu à partir de la base INIES, les granulats Anthropocite ont un impact de -338 kg CO₂eq/tonne. Un calcul a donc été effectué pour calculer l'impact environnemental du béton d'Anthropocite et le comparer à celui d'un béton normal et sont présentés ci-dessous. Le détail de l'ICV du granulat d'anthropocite est précisé sur la base INIES.

Tableau 22 : impact environnemental du béton Anthropocite

	Formulation	Impact env. (kg CO ₂ e/m ³ béton)	Impact pour la même formulation sans anthropocite (kg CO ₂ e/m ³)
Formulations 20%	CEM I à 300 kg/m ³	186	251
	CEM II/A à 300 kg/m ³	159	224
	CEM II/C à 300 kg/m ³	97	163
	CEM III/A à 300 kg/m ³	87	153
	CEM III/B à 300 kg/m ³	54	119
Formulation 5%	CEM II/A à 230 kg/m ³	158	177

5.3.9 Etude de la réaction sulfatique interne

Une étude liée aux risques d'attaques sulfatiques internes, du fait de la teneur élevée en sulfates dans les granulats Anthropicite, a été menée. Des mesures d'expansion, d'évolution de la masse, du module rigidité dynamique ont été menées sur plusieurs formulation de béton avec et sans granulats Anthropicite par Néolithe et le laboratoire GeM de Saint-Nazaire [36] et le LERM [37]. Ces mesures sont complétées par des caractérisation de la résistance en compression, de la porosité accessible à l'eau ainsi que de la porométrie mercure, de l'analyse thermogravimétrique ATG et de la micrographie MEB.

Cette étude a été menée sur plusieurs formulations de béton formulés avec un ciment Portland type CEM I et avec un ciment aux laitiers type CEM III/B. Plusieurs taux de substitution des granulats naturels 4/10 par le granulat Anthropicite ont été étudiés : 0% (témoins) ; 10% ; 20 et 50 %, ce qui représentent un taux de substitution global des granulats naturels de 3% ; 5% et 13 %. Le granulat utilisé lors de cette étude est un granulat riche en gypse (fabriqué à partir de déchets riches en plâtre, environ 46%). Le processus actuel de fabrication du granulat Anthropicite limite à 10% le plâtre présent dans les déchets.

Le tableau ci-dessous présente la formulation des différents bétons confectionnés pour l'étude de la réaction sulfatique interne sur béton Anthropicite.

Tableau 23 : Formulation des bétons de l'étude de la réaction sulfatique interne sur béton Anthropicite

Composant	Formulation béton Anthropicite	Unité
Ciment (type CEM I ou CEM III/B)	282	Kg/m ³
Filler calcaire	31	
Sables 0/4	806	Kg/m ³
Granulat naturel 4/10	228 - X	Kg/m ³
Granulat Anthropicite 4/10	X Avec X = 10% ; 20% et 50% du dosage en granulat naturel 4/10	Kg/m ³
Granulat naturel 10/20	636	Kg/m ³
Eau totale	190	Kg/m ³
E_{eff}/C	0,59	
Adjuvant	1,167	kg/m ³

Les essais ont été menés selon les "Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne" et le guide des essais de performance LPC n°66.

Le protocole suivant a été mené :

- Fabrication des éprouvettes de bétons
- Traitement thermique incluant 72 h de maintien à 80°C préalablement à un refroidissement d'environ 55 h.
- Conservation en eau à 20°C

Par rapport au protocole du LPC n°66, conservation en eau s'est effectuée avec un renouvellement en eau.

Les mesures suivantes ont été menées :

- Caractérisation sur béton frais (affaissement et teneur en eau)
- Mesures non destructives lors de la durée d'immersion (masse, gonflement, module dynamique selon NF P18-414)
- Mesures après 28 j, 90j et au-delà de 20 j d'immersion (résistance en compression NF EN 12390-3 ; porosité accessible à l'eau selon NF P18-459 , analyse ATG et MEB)

Le tableau page suivante synthétise les analyses et observation.

Tableau 24 : Etude de la réaction sulfatique interne sur béton Anthropocite

Ciment	CEM I				CEM III/B			
Béton	Béton témoin	Béton Anthropocite			Béton témoin	Béton Anthropocite		
Substitution	0%	3%	5%	13%	0%	3%	5%	13%
Affaissement (en cm)	15	14,3	5,6	4	12,5	10	10	3,8
Teneur en air (en %)	13	7,3	4	3,3	5,3	5,3	4	3,7
Résistance en compression NF EN 12390-3 (en MPa)								
Après 28 jours d'immersion	17,5	20,0	22,5	21,3	30,0	30,0	24,2	16,2
Après 90 jours d'immersion	20,5	23,3	26,6	23,6	35,3	37,5	27,8	21,2
Après 200 jours d'immersion	21,0		25,8	24,5	37,9		30,0	25,6
Après 700 jours d'immersion	21,6		30,9	28,6	44,1		34,2	30,3
Déformation longitudinale moyenne (en %)								
Après 12 mois d'immersion (en %)	0,010	0,015	0,020	0,015	0,000	0,005	0,010	0,010
Après 680 j mois d'immersion (en %)	0,018	Non mesuré	0,014	0,036	0,021	Non mesuré	0,011	0,007
Porosité accessible à l'eau NF P18-459 (en %)								
Après 28 jours d'immersion	10,0	10,4	14,6	17,9	10,0	5,4	12,1	17,1
Après 90 jours d'immersion	16,0	13,8	17,1	20,4	11,3	14,6	15,0	20,4
Après 200 jours d'immersion	13,0	nm	16,7	24,2	10,0	Nm	16,3	20,8
Analyse thermogravimétrie ATG – perte de masse entre 85°C et 130°C (en %)								
Après 28 jours d'immersion	0,6	0,8	0,7	1,6	0,5	0,8	0,2	0,3
Après 90 jours d'immersion	0,7	nm	1,5	4,4	0,7	1,0	1,4	1,9
Après 200 jours d'immersion	1,1	nm	0,9	2,4	0,5	nm	0,5	0,5

Après 12 mois d'immersion, le gonflement sur béton à base de CEM I et de Granulats Anthropocite augmente mais il reste en dessous du seuil de 0.04%. Ces mesures sont encore plus satisfaisantes avec un béton formulé à base de CEM III/B. Ces résultats sont bien validés par les résultats de tous les tests et mesures qui ont été effectués, comme les variations de la masse, et de module de Young restant à un niveau constant.

Pour les résultats des essais à petite échelle, la porosité accessible à l'eau est diminuée dans toutes les formulations après 200 jours d'immersion, par rapport à l'échéance précédente de 90 jours d'immersion. En même temps, il a été vu par l'observation MEB qu'il y a de l'ettringite dans les formulations d'Anthropocite, mais peut-être que cette formation se manifeste dans la porosité de ces granulats, car les granulats Anthropocite sont des granulats poreux par rapport aux granulats naturels.

Concernant l'observation MEB est une technique de microscopie électronique capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon en utilisant le principe des interactions électrons-matière.

Les figures 7 et 8 montre observation a été faite à l'âge de 450 jours au laboratoire LERM, sur 3 formulations BOI, BRI et BAI50. Les abréviations des échantillons sont :

- BRI (béton à base granulats recyclés et de CEM I) : 52485-1
- BAI50 (béton Anthropocite de substitution 13% et à base de CEM I) : 52485-2
- BOI (béton de référence à base de CEM I) : 52485-3

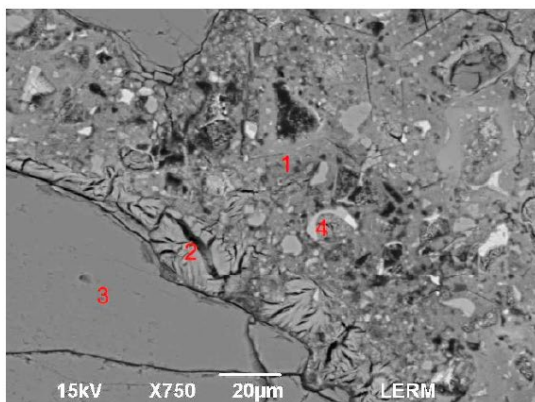


Fig. 7 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 52485-1
Détail de la zone de transition
entre la pâte de ciment et un granulat

1 : matrice, 2 : ettringite, 3 : granulat siliceux,
4 : ettringite dans un résidu de clinker

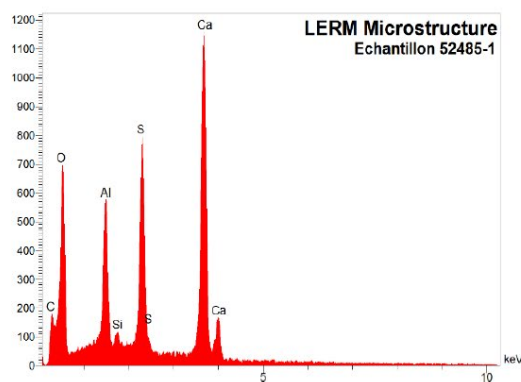


Fig. 8 : Analyse élémentaire par spectrométrie X à dispersion
d'énergie au point 2 de la figure précédente

Figure 7 : Observation au MEB à 450j BRI

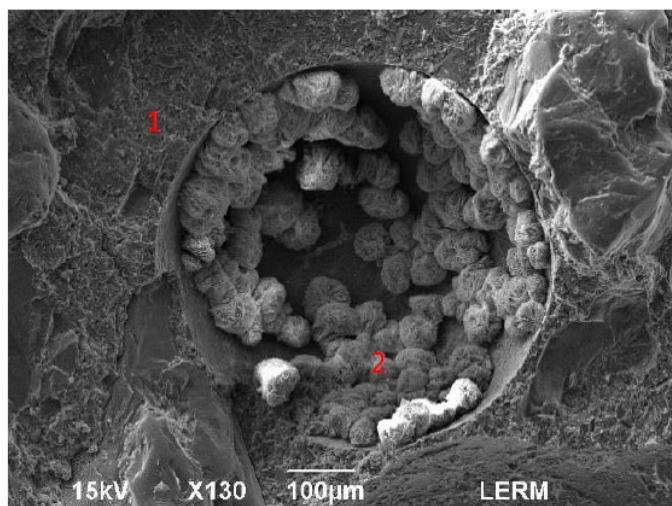


Fig. 9 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 52485-2
Aspect d'une bulle d'air dans la matrice cimentaire

1 : matrice,
2 : pelotes de fins cristaux d'ettringite aciculaire dans la bulle d'air

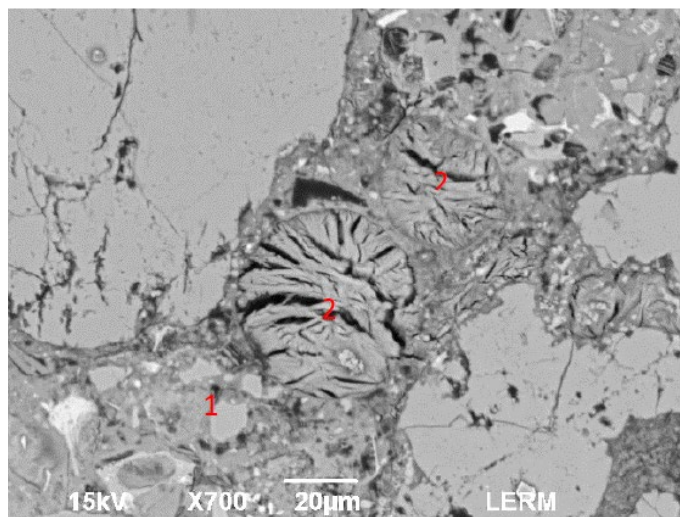


Fig. 10 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 52485-3
Aspect de bulles d'air dans la matrice cimentaire

1 : matrice, 2 : bulles d'air comblées d'ettringite

Figure 8 : Observation au MEB à 450j BAI50 et BOI

Ces observations nous permettent de conclure :

- Les bétons des échantillons 52485-1 et 2 (BRI et BAI 50) apparaissent compacts alors que l'échantillon 52485-3 (BOI) est plus poreux,
- Quelques cristaux secondaires non pathogènes sont également observés dans la pâte de ciment des bétons : portlandite, aluminates de calcium hydratés, chloro-aluminates de calcium hydratés et ettringite aciculaire (sous forme de pelote).
- L'échantillon 52485-1 (BRI) présentent en plus des cristaux d'ettringite palissadique à certaines interfaces pâte / granulat

6. CHANTIERS DE REFERENCE

Pour l'heure, le granulat béton Anthropocite a été utilisé sur cinq chantiers.

- Une dalle de stockage nécessitant la pose de 7 m³ de béton a été réalisée en mai 2021 à Beaucouzé (49).
- Le même mois, 10m³ de béton massif (béton de propreté) ont été également réalisés sur le site de la maison innovante Empreinte [1].

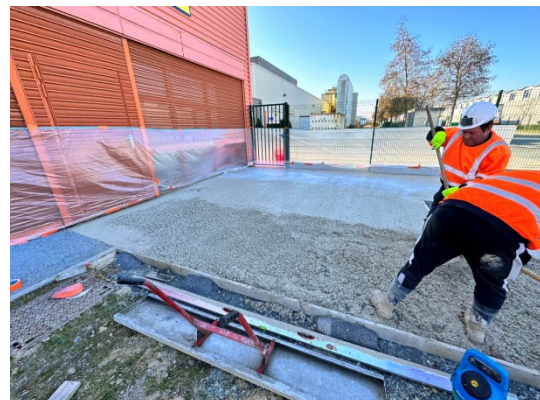


Photos du chantier Empreinte (en marron l'ensemble des bétons Anthropocite)

- L'utilisation de l'anthropocite dans le gros béton (30 m³) dans la fondation sous la tour de liage sur le prochain site Néolithe à Beaulieu en décembre 2022 (Contrôleur Technique : SOCOTEC).



- L'utilisation de l'anthropocite dans une planche d'essai de 4.5 m³ sur le site de TP courant à Avrillé fin mars 2023.



7. REFERENCES

7.1 Articles ou ouvrages

- [1] ERB. (2021). Empreinte - Le concept. (<https://www.concept-empreinte.fr/>)
- [2] Ministère de la transition écologique et solidaire. (2019). Plan national de gestion des déchets. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Plan%20national%20des%20dechets_octobre%202019.pdf
- [3] Sétra. (2011). Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière.
- [4] Projet d'arrêté du 12 septembre 2014 fixant les critères de sortie du statut de déchet pour les granulats élaborés à partir de déchets du bâtiment et des travaux publics pour un usage routier

7.2 Normes

- [5] NF EN 12620+A1 (juin 2008) : Granulats pour béton
- [6] NF EN 206+A2/CN (novembre 2022) : Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206
- [7] NF EN 12457-2 (décembre 2002) : Caractérisation des déchets - Lixiviation - Essai de conformité pour lixiviation des déchets fragmentés et des boues - Partie 2 : essai en bâchée unique avec un rapport liquide-solide de 10 l/kg et une granularité inférieure à 4 mm (sans ou avec réduction de la granularité)
- [8] NF EN ISO 18589-3 (mars 2018) : Mesurage de la radioactivité dans l'environnement - Sol - Partie 3 : Méthode d'essai des radionucléides émetteurs gamma par spectrométrie gamma
- [9] NF EN 12457-4 (décembre 2002) : Caractérisation des déchets - Lixiviation - Essai de conformité pour lixiviation des déchets fragmentés et des boues - Partie 4 : essai en bâchée unique avec un rapport liquide/solide de 10 l/kg et une granularité inférieure à 10 mm (sans ou avec réduction de la granularité)
- [10] NF EN 1097-2 (avril 2020) : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 2 : méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation
- [11] NF EN 1744-1+A1 (février 2014) : Essais visant à déterminer les propriétés chimiques des granulats - Partie 1 : analyse chimique
- [12] NF EN 1097-6 (janvier 2014) : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau
- [13] NF EN 12350-6 (juin 2019) : Essais pour béton frais - Partie 6 : masse volumique
- [14] NF EN 12350-2 (juin 2019) : Essais pour béton frais - Partie 2 : essai d'affaissement
- [15] NF EN 12350-7 (juin 2019) : Essais pour béton frais - Partie 7 : teneur en air - Méthode de la compressibilité
- [16] NF EN 12390-3 (juin 2019) : Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes
- [17] NF EN 12390-7 (juin 2019) : Essais pour béton durci - Partie 7 : masse volumique du béton durci
- [18] NF P 18-459 (mars 2010) : Béton - Essai pour béton durci - Essai de porosité et de masse volumique
- [19] NF EN 12390-16 (octobre 2019) : Essais pour béton durci - Partie 16 : détermination du retrait du béton

7.3 Rapport d'essais

- [20] Eurofins, rapport d'analyse n°AR-22-LK-201925-01 – lixiviation sur granulats Anthropocite
- [21] Eurofins, rapport d'analyse n°AR-22E265401 - lixiviation sur béton 20% d'Anthropocite avec CEM II/A
- [22] A.F.Q.S., rapport d'essais sur prélèvement C3097001 de béton témoin avec CEM II/A à 230 kg/m³
- [23] A.F.Q.S., rapport d'essais sur prélèvement C3097002 de béton 5% d'Anthropocite avec CEM II/A à 230 kg/m³
- [24] A.F.Q.S., rapport d'essais sur prélèvement C3097003 de béton 20% d'Anthropocite avec CEM II/C
- [25] A.F.Q.S., rapport d'essais sur prélèvement C3097004 de béton 20% d'Anthropocite avec CEM III/A

- [26] A.F.Q.S., rapport d'essais sur prélèvement C3097006 de béton 20% d'Anthropocite avec CEM I
- [27] A.F.Q.S., rapport d'essais sur prélèvement C2321016 de béton 20% d'Anthropocite avec CEM III/B
- [28] A.F.Q.S., rapport d'essais sur prélèvement C3061032 de béton 15% d'Anthropocite avec CEM II/A à 250 kg/m³
- [29] A.F.Q.S., rapport d'essais sur prélèvement C3061033 de béton 15% d'Anthropocite avec CEM III/B à 250 kg/m³
- [30] Néolithe., rapport d'essais sur béton 20% d'Anthropocite avec CEM II/A, 7 décembre 2022
- [31] Néolithe., rapport d'essais sur béton 5% d'Anthropocite avec H-UKR, 22 février 2023
- [32] Néolithe., rapport d'essais sur béton 15% d'Anthropocite avec H-UKR, 22 février 2023
- [33] Néolithe, rapport d'essais sur granulat Anthropocite (15 prélèvements), 1^{er} septembre 2022.
- [34] ALGADE, rapport d'essais ALG2204-280-V1, analyse de la radioactivité
- [35] CSTB, rapport d'essais n° SC-2022-10569, concernant le classement des émissions de polluants volatils sur granulats Anthropocite
- [36] Néolithe, étude « RSI et la durabilité en général du béton avec granulats (granulats Anthropocite) fabriqués à partir de déchets non inertes non dangereux du bâtiment », étude effectuée au sein de l'Institut de recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM) à Saint-Nazaire, 28 avril 2023.
- [37] LERM, rapport n°52485.001.01.A, Examens au MEB de béton non structuel à base de granulat issus de déchets contenant du plâtre, 18 juillet 2022
- [38] IFSTTAR, Guide technique : Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne, octobre 2017
- [39] IFSTTAR, Méthode d'essais des LPC n°66 « Réactivité d'un béton vis-à-vis 'une réaction sulfatique interne – essai de performance », septembre 2007
- [40] INOVALYS, rapport d'analyses n°D230204532 de lixiviation sur béton 20% d'Anthropocite avec CEM III/B
- [41] INERIS, rapport d'évaluation de la dangerosité d'un échantillon de granulats anthropocite, 5 Mai 2023
- [42] Filab, rapport d'essai N°A2303739-E0135956 sur échantillon NAIIIB20%, 15 juin 2023

ANNEXES

Formulations de béton Anthropocite supplémentaires

Lors des essais de béton, de nombreuses formulations ont été testées avec différents dosages de ciment et différents taux de substitution.

Ces résultats permettent de valider que toutes les formulations proposées par la centrale à béton peuvent être utilisées.

Concernant le ciment H-UKR c'est un ciment non normalisé (se référer à l'ETPM 18/0056).

Voici les formulations et les résultats ci-dessous,

Tableau 25 : Formulation du béton d'Anthropocite

Constituant	Formulation 15% de substitution (ciment normalisé)	Formulation 10% de substitution (ciment normalisé)	Formulation 15% de substitution (liant H-UKR)	Formulation 5% de substitution (liant H-UKR)
Quantité en kg/m ³				
Sable 0/2	815	815	830	870
GN 4/11,2	355	355	590	590
GN 11,2/22,4	556,32	634,71	120	270
Anthropocite A2022-2	154,31	107,44	150	50
Filler calcaire	0	0	40	40
Ciment	250	250	320	320
Eau	160-170*	160-170*	165	160
Adjuvants	0,55%C	0,55%C	3%C	3%C

* La E_{eff}/C utilisée sera différente pour chaque formulation et dépendra de chaque type de ciment utilisé.

Tableau 26 : abréviation des formulations

Type de ciment	Formulations	Pourcentage de substitution	Désignation	Norme concernée
Ciment Portland composé (calcaire)	BA15IIA250	15%	CEM II/A	NF EN 197-1
	BA10IIA250	10%	CEM II/A	NF EN 197-1
Ciment aux laitier	BA15IIIB250	15%	CEM III/B	NF EN 197-1
	BA10IIIB250	10%	CEM III/B	NF EN 197-1
Ciment aux laitiers très bas carbone	H-UKR 15	15%	H-UKR	ETPM 18-0056
	H-UKR 5	10%	H-UKR	ETPM 18-0056

Affaissement – Selon norme NF EN 12350-2

Les mesures de consistance et de maintien de rhéologie ont été effectuées sur les différentes formulations de béton (béton d'Anthropocite et béton témoin) par le laboratoire AFQS [22] à [31] selon la norme NF EN 12350-2 [14].

Dans l'étude, les granulats ont fait l'objet d'une saturation préalable avant 15 minutes des essais.

Les résultats d'affaissement du béton composé d'Anthropocite sont les suivantes :

Tableau 27 : Maintien de rhéologie du béton d'Anthropocite

Affaissement Béton d'Anthropocite				
Formulation	t0	t30	t60	t90
BA15IIA250	S3	S2	S2	S2
BA10IIA250	S3	S2	S1	S1
BA15IIIB250	S4	S3	S2	S1
BA10IIIB250	S3	S2	S1	S1
H-UKR 15	S4	S4	S4	S4
H-UKR 5	S4	S4	S4	S4

Teneur en air sur béton frais et sur béton durci – Selon la norme NF EN 12350-7

Les mesures de teneur en air sur béton frais et sur béton durci ont été effectuées sur les deux formulations de béton par le laboratoire AFQS [22] à [31] selon les normes NF EN 12350-7 [15] et sont présentées ci-dessous.

Tableau 28 : Teneur en air du béton d'Anthropocite

Teneur en air occlus, selon NF EN 12350-7 (en %)	
Formulation	%AIR
BA15IIA250	4,40
BA10IIA250	4,40
BA15IIIB250	3,00
BA10IIIB250	4,40
H-UKR 15	2,40
H-UKR 5	2,80

Masse volumique sur béton frais et sur béton durci – Selon les normes NF EN 12350-6 et NF EN 12390-7

Les mesures de masse volumique sur béton frais et sur béton durci ont été effectuées sur les deux formulations de béton par le laboratoire AFQS [22] à [31] selon les normes NF EN 12350-6 [13] et NF EN 12390-7 [17] et sont présentées ci-dessous.

Tableau 29 : Masse volumique du béton d'Anthropocite

Masse volumique Béton d'Anthropocite		
Formulations	Masse volumique béton frais (kg/m³) (NF EN 12350-6)	Masse volumique béton durci (kg/m³) (NF EN 12390-7)
BA15IIA250	2,306	2,294
BA10IIA250	2,330	2,273
BA15IIIB250	2,306	2,263
BA10IIIB250	2,313	2,268
H-UKR 15	2,224	2,205
H-UKR 5	2,309	2,287

Résistance à la compression (en MPa) : 7, 28, 90 j – Selon norme NF EN 12390-3

Les mesures de résistance à la compression ont été effectuées sur 3 éprouvettes par formulations de béton par le laboratoire AFQS [22] à [31] selon la norme NF EN 12390-3 [16] sur des cylindres de dimensions Ø11x22 cm conservés en eau à 20°C.

Dans l'étude, les granulats ont fait l'objet d'une saturation préalable avant 15 minutes des essais.

Les résultats de résistance en compression sont les suivants :

Tableau 30 : Résistance en compression du béton Anthropocite et béton de témoin

Résistance en compression NF EN 12390-3 - Béton d'Anthropocite (moyenne / écart type en MPa)					
Formulations	7 jours		28 jours		Classe de résistance
BA15IIA250	15,5	0,48	19,9	0,48	C16/20
BA10IIA250	19,2	0,22	25,7	0,42	C20/25
BA15IIIB250	12,0	0,55	21,0	0,48	C16/20
BA10IIIB250	17,5	0,47	27,0	0,47	C20/25
H-UKR 15	19,9	0,3	28,6	0,61	C25/30
H-UKR 5	27,0	0,85	35,7	1,28	C25/30

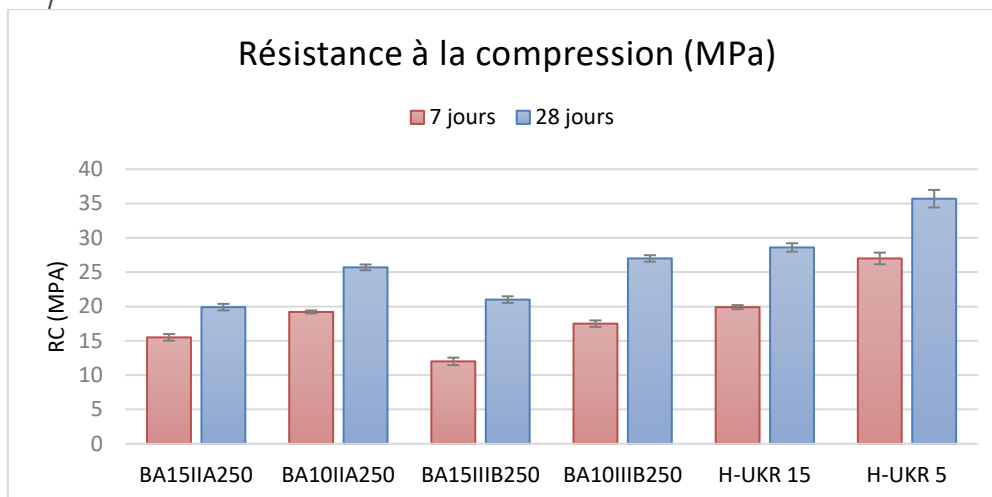


Figure 10 : Résistance en compression du béton d'Anthropocite

Le béton d'Anthropocite évalué dans ce document est un béton de classe C16/20, C20/25 et C25/30 au sens de la norme NF EN 206 [6] et de l'Eurocode 2.

Impact environnemental

Selon l'ICV des granulats anthropocite obtenu à partir de la base INIES, les granulats anthropocite ont un impact de -338 kg CO₂e/tonne. Un calcul a donc été effectué pour calculer l'impact environnemental du béton anthropocite et le comparer à celui d'un béton normal et sont présentés ci-dessous.

Tableau 31 : impact environnemental du béton anthropocite

Formulation	Impact env. (kg CO ₂ e/m ³ béton)	Impact pour la même formulation sans anthropocite (kg CO ₂ e/m ³)
BA15IIA250	136,21	190,73
BA10IIA250	152,83	
BA15IIIB250	48,46	102,98
BA10IIIB250	65,08	
H-UKR 15	62,48	115,42
H-UKR 5	98,13	