

## EVALUATION TECHNIQUE DE PRODUITS ET MATERIAUX N° ETPM-21/0073 du 14.10.2021

concernant le produit de Béton à usage non structural  
« **béton d'Anthropocite** »



**Titulaire :** Néolithe  
5 rue des Ateliers  
49290 Chalonnes sur Loire

Cette Evaluation Technique comporte 20 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 que 10% 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.

Ce béton présente une empreinte carbone diminuée. En effet, en plus du granulats Anthropocite recyclant des déchets, l'utilisation d'un ciment au laitier de haut fourneau CEM III 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, 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 EN 206 [6].

## EVALUATION TECHNIQUE

Les propriétés du granulat Anthropocite et du béton d'Anthropocite présentées ci-après résultent principalement de l'analyse de résultats d'essais réalisés par les laboratoires A.F.Q.S. et Eurofins, présentés au paragraphe 5 du Dossier Technique. Pour les granulats Anthropocite, les essais et l'analyse statistique ont été réalisés sur deux lots de respectivement 44 et 14 big bag de refus du centre de tri étudié.

Le granulat Anthropocite est un granulat de granulométrie 6/20 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 :

- Ciment de haut fourneau (CEM III/B conforme à la norme NF EN 197-1) ;
- Granulats naturels ;
- Granulat Anthropocite ( $\leq 10\%$  de la masse de gravillons) ;
- eau ;
- et adjuvant.

Des essais comparatifs ont été menés sur une formulation analogue, sans substitution de granulats naturels par des granulats Anthropocite. Pour la formulation du béton Anthropocite, la quantité d'eau a été ajustée afin de compenser la demande en eau du granulat Anthropocite.

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

### Caractéristiques du granulat Anthropocite

Le granulat d'Anthropocite est un gravillon de granulométrie 6/20 mm.

Les caractérisations chimique et physique du granulat d'Anthropocite ont été réalisées par le laboratoire A.F.Q.S. et le laboratoire Eurofins.

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.

Paramètres	Granulat Anthropocite (mg/kg de matière sèche)	Seuils du guide Sétra annexe 3, tableaux 3 et 4
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)	0,7	50
Polychloro Biphényles, 7 congénères (PCB)	0,12	1
Benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes (BTEX)	0,26	6
Carbone Organique par oxydation (COT)	1300	60 000
Chlorures	73,5	2400
Fluorures	<5,00	30
Sulfate (SO <sub>4</sub> )	12600	3000
Arsenic (As)	<0,20	1,5
Baryum (Ba)	0,66	60
Chrome (Cr)	<0,10	1,5
Cuivre (Cu)	0,32	6
Molybdène (Mo)	0,273	1,5
Nickel (Ni)	<0,10	1,2
Plomb (Pb)	<0,10	1,5
Zinc (Zn)	<0,20	12
Mercure (Hg)	<0,001	0,03
Antimoine (Sb)	0,023	0,18
Cadmium (Cd)	<0,002	0,12
Sélénium (Se)	0,017	0,3

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

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 fois plus élevée que le seuil du guide.

Caractéristiques	Granulat Anthropocite
Los Angeles (NF EN 1097-2)	78%
Sulfates solubles dans l'eau (NF EN 1744-1)	1,6%
Masse volumique (NF EN 1097-6)	1370 kg/m <sup>3</sup>
Absorption d'eau (NF EN 1097-6)	28,9%
Perte au feu à 950°C (NF EN 1744-1)	36,43%

**Tableau 2 : Caractéristiques du granulat Anthropocite**

Les caractéristiques du granulat Anthropocite 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 n'a pas été analysé sur le béton étudié. Bien que l'utilisation de granulat Anthropocite soit limitée à un taux de remplacement de 10% massique des gravillons, un risque local d'attaque sulfatique interne au niveau des granulats Anthropocite n'est pas à exclure.
- Une résistance à la fragmentation faible (au-delà de la classe LA<sub>50</sub> 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 LA<sub>40</sub>, la résistance à la fragmentation est dite médiocre.
- Une masse volumique de l'ordre de 1400 kg/m<sup>3</sup> classant le granulat comme granulat léger (masse volumique inférieure à 2000 kg/m<sup>3</sup>).
- Et une absorption d'eau importante, à prendre en compte dans la formulation des bétons.

### Caractéristiques du béton d'Anthropocite

Les caractéristiques du béton Anthropocite, comportant une substitution en granulats Anthropocite à hauteur de 10% de la masse de gravillons, sont comparées à celles d'un béton témoin, sans utilisation de granulats Anthropocite. Les formulations des deux 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 au laitier CEM III/B et un taux de substitution de 10% maximum par le granulat Anthropocite. Aucune utilisation de granulats artificiels ou recyclés n'est autorisée.

### 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 l'arrêté du 12 décembre 2014 relatif aux conditions d'admission des déchets inertes dans les installations de stockage des déchets inerte [4] 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.

Tests	Béton Anthropocite (mg/kg de matière sèche)	Béton Témoin (mg/kg de matière sèche)	Seuils arrêté du 12/12/2014 (mg/kg de matière sèche)
Hydrocarbures totaux (4 tranches) (C10-C40)	57	18	500
Somme des HAP	0,14	<0,05	50
Somme PCB (7)	<0,010	<0,010	1
Somme des BTEX	<0,05	<0,05	6
Carbone Organique par oxydation (COT) sur éluat	<51	<50	30 000
Chlorures sur éluat	89,7	82,3	800
Fluorures sur éluat	<5,00	<5,00	10
Sulfate (SO <sub>4</sub> ) sur éluat	364	192	1 000
Arsenic (As) ICP/AES sur éluat	<0,20	<0,2	0,5
Baryum (Ba) ICP/AES sur éluat	0,53	0,38	20
Chrome (Cr) (ICP/AES) sur éluat	<0,10	<0,10	0,5
Cuivre (Cu) ICP/AES sur éluat	<0,20	<0,20	2
Molybdène (Mo) (ICP/MS) sur éluat	0,098	0,078	0,5
Nickel (Ni) ICP/AES E sur éluat	<0,10	<0,10	0,4
Plomb (Pb) ICP/AES sur éluat	<0,10	<0,10	0,5
Zinc (Zn) (ICP/AES) sur éluat	<0,20	<0,20	4
Mercurure (Hg) sur éluat	<0,001	<0,01	0,01
Antimoine (Sb) (ICP/MS) sur éluat	0,008	0,006	0,06
Cadmium (Cd) (ICP/MS) sur éluat	<0,002	<0,002	0,04
Sélénium (Se) (ICP/MS) sur éluat	0,01	0,01	0,1

**Tableau 3 : Bilan des essais de lixiviation sur granulats Anthropocite et béton témoin selon la norme NF EN 12457-2**

Les résultats comparatifs de lixiviation du béton de référence et du béton d'Anthropocite avec un remplacement des gravillons à hauteur de 10% 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 triplées 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 doublée 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

La consistance et le maintien de rhéologie ont été mesurés sur la formulation de béton Anthropocite et le béton témoin.

Consistance (selon NF EN 12350-2)	Affaissement béton Anthropocite (mm)	Affaissement béton témoin (mm)
Consistance à 0 minutes	<b>230</b>	230
Consistance à 30 minutes	<b>150</b>	190
Consistance à 60 minutes	<b>120</b>	160
Consistance à 90 minutes	<b>50</b>	120

**Tableau 4 : Maintien de rhéologie du béton d'Anthropocite**

La classe d'affaissement est S5 conformément à la norme NF EN 206/CN [6]. La substitution par 10% de granulats d'Anthropocite n'a pas d'impact sur la consistance initiale mais son maintien de rhéologie est affecté (perte de 25% de sa rhéologie en 1 heure). Il convient de prendre en considération ce constat lors des opérations de bétonnage.

### Masse volumique sur béton frais et béton durci

Les masses volumiques, sur béton frais et sur béton durci, ont été mesurées sur la formulation de béton Anthropocite et le béton témoin.

Eprouvette	Masse volumique béton frais (NF EN 12350-6) (kg/m <sup>3</sup> )	Masse volumique béton durci (NF EN 12390-7) (kg/m <sup>3</sup> )
<b>Béton Anthropocite</b>	<b>2 243</b>	<b>2 163</b>
Béton Témoin	2 315	2 330

**Tableau 5 : Masses volumiques du béton d'Anthropocite**

La substitution à hauteur de 10% de granulats Anthropocite induit une réduction de la masse volumique sur béton durci, par rapport au béton témoin, de l'ordre de 7%. Il est également observé une réduction de la masse volumique du béton d'Anthropocite entre son état frais et son état durci.

Le béton 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 5. Elles ont été mesurées sur la formulation de béton Anthropocite et le béton témoin, sur cylindres Ø11x22 cm.

Echéances	Résistance en compression (MPa) (valeur moyenne, écart type et valeur caractéristique, basées sur 3 essais)	
	Béton Anthropocite	Béton Témoin
7 jours	$f_{cm} = 18,1$ (E.T. = 0,6), $f_{ck} = 16,5$	$f_{cm} = 24,6$ (E.T. = 0,7), $f_{ck} = 22,5$
14 jours	$f_{cm} = 21,0$ (E.T. = 1,2), $f_{ck} = 17,5$	$f_{cm} = 29,4$ (E.T. = 1,3), $f_{ck} = 25,5$
28 jours	$f_{cm} = 24,6$ (E.T. = 0,2), $f_{ck} = 23,9$	$f_{cm} = 34,0$ (E.T. = 0,3), $f_{ck} = 33,1$
56 jours	$f_{cm} = 27,5$ (E.T. = 0,8), $f_{ck} = 25,0$	$f_{cm} = 41,4$ (E.T. = 0,8), $f_{ck} = 39,1$
90 jours	$f_{cm} = 28,2$ (E.T. = 0,3), $f_{ck} = 27,3$	$f_{cm} = 41,5$ (E.T. = 0,4), $f_{ck} = 40,4$

**Tableau 6 : Résistance en compression du béton d'Anthropocite**

La substitution à hauteur de 10% de granulats Anthropocite induit une réduction de résistance à la compression, par rapport au béton témoin, de l'ordre de 28% à 28 jours et 32% à 90 jours.

Le béton d'Anthropocite évalué dans ce document est un béton de classe C16/20 au sens de la norme NF EN 206 [6] 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 la formulation de béton Anthropocite et le béton témoin.

Eprouvette	Retrait de séchage à 56 jours (NF EN 12390-16) (µm/m)
<b>Béton Anthropocite</b>	<b>560</b>
Béton Témoin	614

**Tableau 7 : Retrait de séchage du béton d'Anthropocite**

La substitution de gravillons à hauteur de 10% de granulats Anthropocite induit une réduction du retrait de séchage, par rapport au béton témoin, de l'ordre de 10% à 56 jours.

## 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 un ciment de haut fourneau, de type CEM III/B 42,5 N pour les résultats d'essais présentés, et un taux de substitution du granulat Anthropocite à hauteur de 10% maximum de la masse de gravillon et pour un usage non structural et 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 :

- Une teneur élevée en sulfates ( $SO_4$ ) dans le granulat. La présente ETPM n'émet pas de conclusions quant à l'absence de risques liés à la présence de sulfates dans le matériau et à son utilisation dans un béton.
- Un coefficient élevé d'absorption d'eau du granulat, à prendre en compte dans la formulation du béton. Dans les cas où une résistance au gel/dégel sera à justifier, il conviendra de réaliser la justification du bon comportement du béton vis-à-vis de cette sollicitation environnementale.
- Un impact de l'utilisation du granulat Anthropocite sur les 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 : 14.10.2026 (5 ans)**

Direction Sécurité, Structures et Feu  
Le Directeur

Nicolas RUAUX



## 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 à 10% 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 granulat Anthropocite qui fait du stockage carbone (sanctuarisation du bois, plastique et autres déchets par rapport à l'enfouissement ou l'incinération), l'utilisation de CEM III permet de diminuer drastiquement 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 granulat 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

Afin d'assurer une constance minimum de la source de déchet pour la fabrication de granulat, nous avons lancé une étude statistique sur les déchets produits par le centre de tri qui sera notre première source de déchet.

Cette analyse statistique a été menée sur deux lots de respectivement 44 et 14 big bag (lots prélevés à 4 mois de décalage) de refus du centre de tri. 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 ; nous adapterons les formules de liant afin que les caractéristiques des granulats correspondent à minima à celles énoncées dans la partie granulats 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 les 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 processus 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
- Ajout du liant et mélange
- Mise en forme-Vieillessement
- Sortie de process

## 2.3 Contrôle

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

Un premier contrôle visuel est réalisé sur le lot de granulats. 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, forme et coefficient d'aplatissement (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, un granulats pour être considéré comme conforme doit avoir des caractéristiques égales ou meilleures à celles proposées dans l'ETPM. Pour la masse volumique et l'absorption d'eau une variation de plus de 2% par rapport aux caractéristiques énoncées devra être notifiée aux utilisateurs.

Pour permettre de garder le contrôle de nos granulats et repérer les non-conformités, nous gardons chaque lot produit durant minimum deux semaines sur le site de production. Les lots sont identifiés par jour de production (une case par jour) sur la zone du fossilisateur. Au bout de maximum 3 jours, un échantillonnage est effectué afin de prélever la quantité de granulats nécessaires aux essais à J+7.

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.

La sélection du jour de production testé se fait de manière aléatoire. Par exemple, pour un test hebdomadaire, un jour parmi les 5 est tiré au hasard. L'échantillonnage se fait ensuite sur cette case. En cas de détection d'une non-conformité des essais complémentaires sur les lots de production non sélectionnés sont effectués. Si la non-conformité est confirmée par les essais complémentaires, les lots de granulats incriminés sont retirés de la vente. Les lots faisant l'objet de la non-conformité sont éliminés selon la méthode adéquate (nouveau passage dans le fossilisateur, enfouissement selon la classe appropriée...), tout en recherchant les actions correctives à mettre en place. Une méthode pour obtenir la qualité des granulats en temps réel sera à terme implémentée dans les fossilisateurs.

## 2.4 Condition de conservation et traitement thermique

A l'issue du processus 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.

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 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 récapitulatif des 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 code\*
- Le poids brut, la tare et le poids net

\*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 ciment CEM III

### 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 CEM III/B. Ce ciment a été choisi pour ces caractéristiques bas carbone ainsi que pour la résistance aux attaques chimiques du béton final.

Le béton est fabriqué sur place ou en centrale, tant que le ciment CEM III est couvert par la marque NF et que la formule granulaire correspond aux caractéristiques énoncées.

La composition du béton utilisé dans l'étude est la suivante. Une substitution des granulats naturels par l'Anthropocite a été réalisée autour de 10% 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 10% de granulat naturel par de l'Anthropocite (exclusion d'un mélange avec des granulats artificiels ou recyclés) et un ciment CEM III/B. Toute nouvelle formulation doit faire l'objet d'essais préliminaires.

Composant	Dosage	Unité
CEM III/B 42.5	320	Kg/m <sup>3</sup>
Sables 0/2	795	Kg/m <sup>3</sup>
Granulat 4/20 *	940	Kg/m <sup>3</sup>
Anthropocite	104,5	Kg/m <sup>3</sup>
Eau totale	190	Kg/m <sup>3</sup>
Adjuvant	1,06	kg/m <sup>3</sup>

**Tableau 8 : Formulation du béton d'Anthropocite destiné aux essais initiaux**

\* les granulats naturels utilisés pour cette étude sont des granulats en grés peu durs (coefficient Los Angeles : 29%) donc les différences de résistances mécaniques entre les deux bétons peuvent varier.

La composition du béton pour les essais initiaux réalisés est présentée ci-dessus. Le détail de la formulation a été déposé auprès du CTB. Cette composition a été utilisée pour l'ensemble des essais sur béton réalisés dans le cadre de l'ETPM.

### 3.3 Fabrication (process)

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 béton classique à base CEM III/B. 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 [13]. 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 Néolith recommande au minimum une épreuve d'étude des résistances à la compression à 7 et 28 jours selon la norme NF EN 12390-3 [14] ainsi qu'un test au cône d'affaissement selon la norme NF EN 12350-2 [13].

#### 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 :**

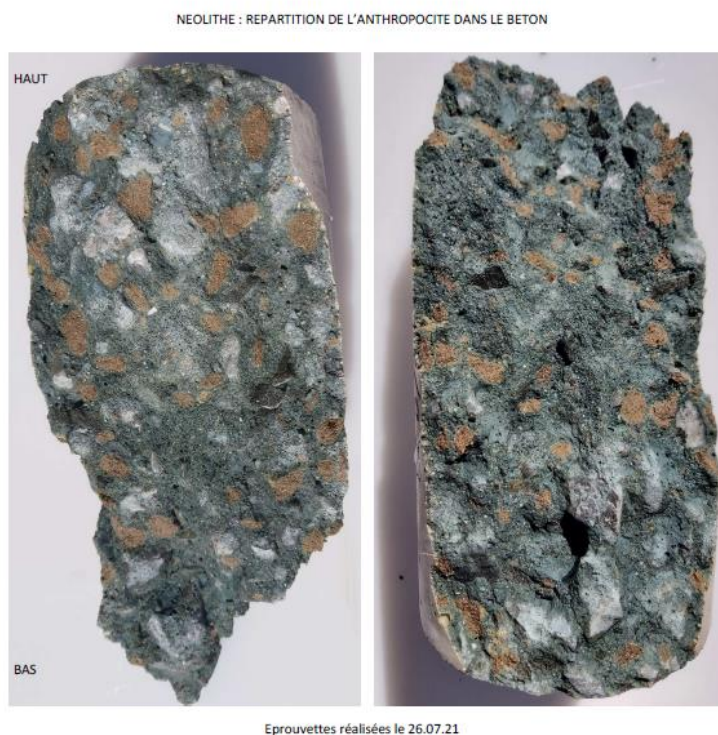
- Béton de propreté
- Béton de tranché
- Béton de pose de bordure de trottoir
- Béton de remplissage non ferrailé

#### 5. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les granulats soumis aux essais ci-dessous ont été réalisés sur deux jours consécutifs. La production se faisant en intérieur, l'humidité est restée constante tout au long de cette période. Les granulats ont été concassés et la fraction 6-20 récupérée après tamisage. Un prélèvement de 30 kilogrammes a été réalisée sur cette production pour la réalisation des éprouvettes béton et des tests sur granulats. Les tests sont réalisés sans adaptation particulière des normes, le besoin ne s'étant pas présenté.

##### 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.



##### 5.2 Sur les granulats

###### 5.2.1 Lixiviation – Selon norme NF EN 12457-4

Les essais de lixiviation sur granulats ont été effectués par le laboratoire Eurofins [16], suivant la norme NF EN 12457-4 [8].

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.

Tests	Granulat (lixivi <10 mm) (mg/kg de matière sèche)
Somme des HAP	0,7
Somme PCB (7)	0,12
Somme des BTEX	0,26
Carbone Organique par oxydation (COT) sur éluat	1300
Chlorures sur éluat	73,5
Fluorures sur éluat	<5.00
Sulfate (SO4) sur éluat	12600
Arsenic (As) ICP/AES sur éluat	<0,20
Baryum (Ba) ICP/AES sur éluat	0,66
Chrome (Cr) (ICP/AES) sur éluat	<0,10
Cuivre (Cu) ICP/AES sur éluat	0,32
Molybdène (Mo) (ICP/MS) sur éluat	0,273
Nickel (Ni) ICP/AES sur éluat	<0,10
Plomb (Pb) ICP/AES sur éluat	<0,10
Zinc (Zn) (ICP/AES) sur éluat	<0,20
Mercure (Hg) sur éluat	<0,001
Antimoine (Sb) (ICP/MS) sur éluat	0,023
Cadmium (Cd) (ICP/MS) sur éluat	<0,002
Sélénium (Se) (ICP/MS) sur éluat	0,017

**Tableau 9 : Synthèse des résultats de lixiviation sur granulats Anthropicite selon la norme NF EN 12457-4 [8]**

#### 5.2.2 Los Angeles – Selon norme NF EN 1097-2

Les mesures du coefficient Los Angeles ont été effectuées sur le granulat Anthropicite par le laboratoire AFQS [18] selon la norme NF EN 1097-2 [9].

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

La valeur du coefficient de Los Angeles est de **78%**.

#### 5.2.3 Sulfates – Selon norme NF EN 1744-1

Les mesures du teneur en sulfate ont été effectuées sur le granulat Anthropicite par le laboratoire AFQS [18] selon la norme NF EN 1744-1 [10].

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

Le pourcentage de sulfates solubles dans notre granulat est de **1.6%**.

#### 5.2.4 Masse volumique – Selon norme NF EN 1097-6

Les mesures de masse volumique ont été effectuées sur le granulat Anthropicite par le laboratoire AFQS [18] selon la norme NF EN 1097-6 [11].

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

La masse volumique réelle du granulat Anthropicite est de **1.37 t/m<sup>3</sup>** (valeurs individuelles 1,372 et 1,373 t/m<sup>3</sup>).

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

Les mesures du coefficient d'absorption d'eau ont été effectuées sur le granulats Anthropocite par le laboratoire AFQS [18] selon la norme NF EN 1097-6 [11].

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

L'absorption d'eau mesurée est de **28.9%** (valeurs individuelles : 28,49% et 29,24%).

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

Les mesures de perte au feu ont été effectuées sur le granulats Anthropocite par le laboratoire AFQS [18] selon la norme NF EN 1744-1 [10].

La perte au feu mesurée à 950°C est de **36,43%**. (valeurs individuelles : 36,56 ; 36,67 ; 36,12 et 36,36%)

## 5.3 Sur le béton

Pour rappel, voici la formule utilisée pour le **béton Anthropocite** :

Composant	Dosage	Unité
<b>CEM III/B 42.5</b>	320	Kg/m <sup>3</sup>
<b>Sables 0/2</b>	804	Kg/m <sup>3</sup>
<b>Granulat 4/20</b>	940	Kg/m <sup>3</sup>
<b>Anthropocite</b>	112	Kg/m <sup>3</sup>
<b>Eau totale</b>	198	Kg/m <sup>3</sup>
<b>E<sub>eff</sub>/C</b>	0.52*	
<b>Adjuvant</b>	1,06	Kg/m <sup>3</sup>

**Tableau 10 : Formulation du béton d'Anthropocite**

\* Rapport E<sub>eff</sub>/C obtenu par calcul mais l'absorption d'eau des granulats étant calculée pour 24h l'eau disponible et donc E<sub>eff</sub>/C au moment de la prise est plus élevée.

Et voici la composition du **béton témoin** réalisé sans substitution des granulats naturels.

Composant	Dosage	Unité
<b>CEM III/B 42.5</b>	320	Kg/m <sup>3</sup>
<b>Sables 0/2</b>	795	Kg/m <sup>3</sup>
<b>Granulat 4/20</b>	1045	Kg/m <sup>3</sup>
<b>Anthropocite</b>	0	Kg/m <sup>3</sup>
<b>Eau totale</b>	190	Kg/m <sup>3</sup>
<b>E<sub>eff</sub>/C</b>	0.59	
<b>Adjuvant</b>	1,06	Kg/m <sup>3</sup>

**Tableau 11 : Formulation du béton témoin**

Le détail des formulations a été déposé auprès du CTB. Ces compositions ont été utilisées pour l'ensemble des essais sur béton réalisés dans le cadre de l'ETPM.

La quantité d'eau apportée à la formulation du béton d'Anthropocite est plus importante que celle du béton témoin, du fait de la demande en eau plus forte liée à l'emploi des granulats Anthropocite.

Les caractéristiques obtenues sont ensuite détaillées dans la suite de cette partie.

### 5.3.1 Affaissement – Selon norme NF EN 12350-2

Les mesures de consistance et de maintien de rhéologie ont été effectuées sur les deux formulations de béton par le laboratoire AFQS [20] et [21] selon la norme NF EN 12350-2 [13].

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

Consistance à un temps donné	Affaissement béton Anthropocite (mm)	Affaissement béton témoin (mm)
Consistance des bétons à 0 minutes	230	230
Consistance des bétons à 30 minutes	150	190
Consistance des bétons à 60 minutes	120	160
Consistance des bétons à 90 minutes	50	120

Tableau 12 : Maintien de rhéologie du béton d'Anthropocite

### 5.3.2 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 [20] et [21] selon les normes NF EN 12350-6 [12] et NF EN 12390-7 [15] et sont présentées ci-dessous.

Eprouvette	Masse volumique béton frais (t/m <sup>3</sup> ) (NF EN 12350-6)	Masse volumique béton durci (t/m <sup>3</sup> ) (NF EN 12390-7)
Béton Anthropocite	2.243	2.163
Béton Témoin	2.315	2.330

Tableau 13 : Masse volumique du béton d'Anthropocite

Le béton d'Anthropocite possède une masse volumique de 2.16 t/m<sup>3</sup> soit une valeur légèrement inférieure à celle d'un béton traditionnel ayant comme dans le cas de notre témoin une valeur comprise entre 2.2 et 2.4 t/m<sup>3</sup>.

### 5.3.3 Résistance à la compression (en MPa) : 7, 14, 28, 56, 90 j – Selon norme NF EN 12390-3

Les mesures de résistance à la compression ont été effectuées sur les deux formulations de béton par le laboratoire AFQS [20] et [21] selon la norme NF EN 12390-3 [14] sur des cylindres de dimensions Ø11x22 cm conservés en eau à 20°C.

Les résultats de résistance en compression sur béton composé d'Anthropocite et sur béton témoin sont les suivants :

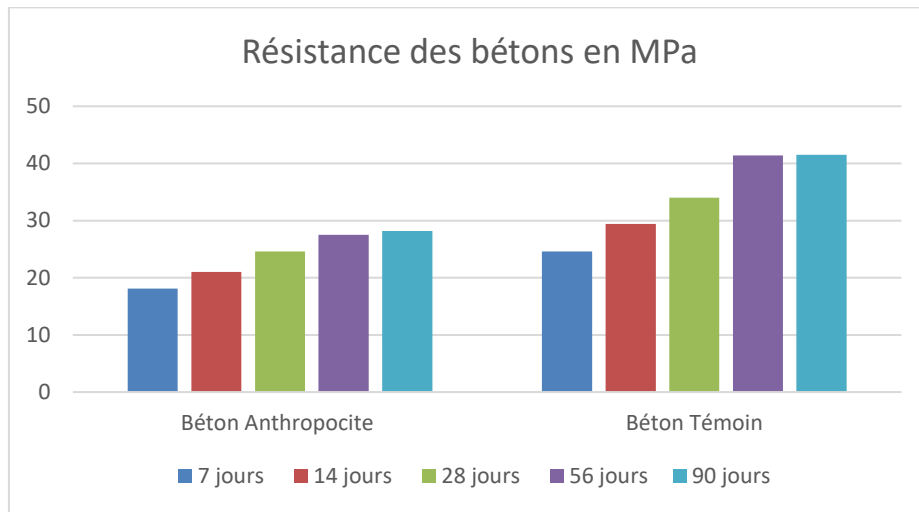
Béton Anthropocite	7 jours	14 jours	28 jours	56 jours	90 jours
1	18.3	19.7	24.7	27,2	28,3
2	17.5	22.1	24.7	28,4	27,9
3	18.6	21.2	24.3	26,8	28,5
Moyenne	18.1	21.0	24.6	27,5	28,2

Tableau 14 : Résistance en compression du béton d'Anthropocite

Béton Témoin	7 jours	14 jours	28 jours	56 jours	90 jours
1	24.9	29.1	33.7	42,3	41,1
2	23.8	30.9	34.0	40,9	41,8
3	25.2	28.3	34.3	41,0	41,6
Moyenne	24.6	29.4	34.0	41,4	41,5

Tableau 15 : Résistance en compression du béton Témoin





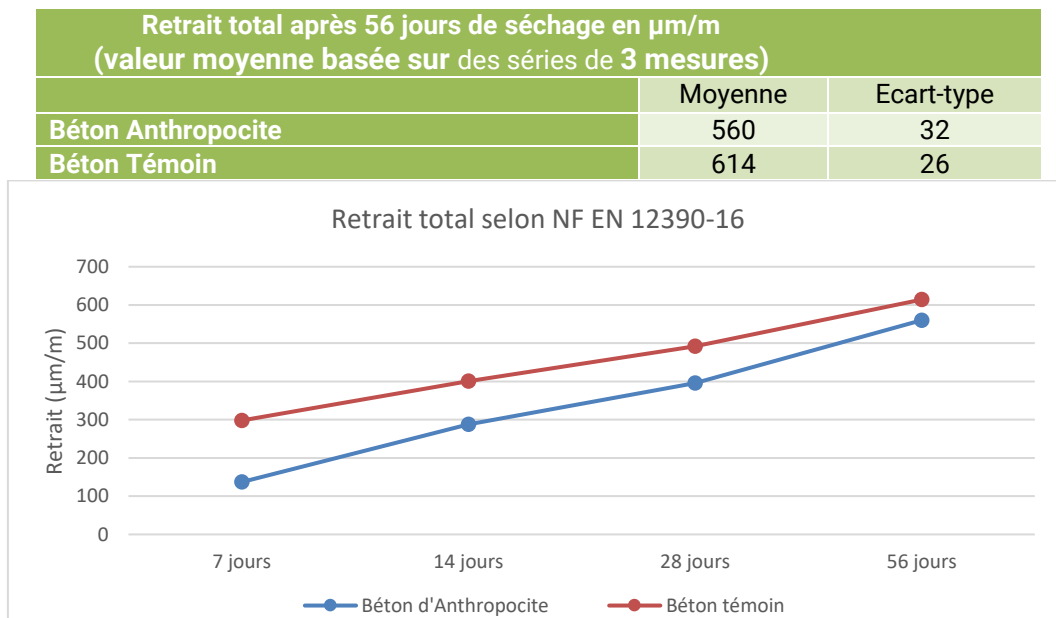
**Figure 1 : Résistance en compression du béton d'Anthropicite**

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

#### 5.3.4 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 [20] et [21] selon la norme NF EN 12390-16 [16].

Les résultats sont présentés ci-dessous.



**Tableau 16 : Retrait de séchage du béton d'Anthropicite et du béton témoin**

**5.3.5 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 [17] et [18] selon la norme NF EN 12457-2 [7] et sont présentés ci-dessous.

<b>Tests</b>	<b>Béton Anthropocite</b> (mg/kg de matière sèche)	<b>Béton Témoin</b> (mg/kg de matière sèche)
<i>Hydrocarbures totaux (4 tranches) (C10-C40)</i>	57	18
<i>Somme des HAP</i>	0,14	<0,05
<i>Somme PCB (7)</i>	<0,010	<0,010
<i>Somme des BTEX</i>	<0,05	<0,05
<i>Carbone Organique par oxydation (COT) sur éluat</i>	<51	<50
<i>Chlorures sur éluat</i>	89,7	82,3
<i>Fluorures sur éluat</i>	<5,00	<5.00
<i>Sulfate (SO4) sur éluat</i>	364	192
<i>Arsenic (As) ICP/AES sur éluat</i>	<0,20	<0.2
<i>Baryum (Ba) ICP/AES sur éluat</i>	0,53	0,38
<i>Chrome (Cr) (ICP/AES) sur éluat</i>	<0,10	<0,10
<i>Cuivre (Cu) ICP/AES sur éluat</i>	<0,20	<0,20
<i>Molybdène (Mo) (ICP/MS) sur éluat</i>	0,098	0,078
<i>Nickel (Ni) ICP/AES E sur éluat</i>	<0,10	<0,10
<i>Plomb (Pb) ICP/AES sur éluat</i>	<0,10	<0,10
<i>Zinc (Zn) (ICP/AES) sur éluat</i>	<0,20	<0,20
<i>Mercurure (Hg) sur éluat</i>	<0,001	<0,001
<i>Antimoine (Sb) (ICP/MS) sur éluat</i>	0,008	0,006
<i>Cadmium (Cd) (ICP/MS) sur éluat</i>	<0,002	<0.002
<i>Sélénium (Se) (ICP/MS) sur éluat</i>	0,01	0,01

**Tableau 17 : Synthèse des résultats de lixiviation sur granulas Anthropocite et béton témoin selon la norme NF EN 12457-2**

## 6. CHANTIERS DE REFERENCE

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

- Une dalle de stockage nécessitant la pose de 7m<sup>3</sup> de béton a été réalisée en mai 2021 à Beaucouzé (49).
- Le même mois, 10m<sup>3</sup> 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)

## 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](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] Arrêté du 12 décembre 2014 : conditions d'admission des déchets inertes dans les installations relevant des rubriques 2515, 2516, 2517 et des installations de stockage de déchets inertes relevant de la rubrique 2760 de la nomenclature des installations classées

### 7.2 Normes

- [5] NF EN 12620+A1 (juin 2008) : Granulats pour béton
- [6] NF EN 206/CN (décembre 2014) : 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 bûchée 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 12457-4 (décembre 2002) : Caractérisation des déchets - Lixiviation - Essai de conformité pour lixiviation des déchets fragmentés et des boues - Partie 4 : essai en bûchée unique avec un rapport liquide/solide de 10 l/kg et une granularité inférieure à 10 mm (sans ou avec réduction de la granularité)
- [9] 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
- [10] NF EN 1744-1+A1 (février 2014) : Essais visant à déterminer les propriétés chimiques des granulats - Partie 1 : analyse chimique
- [11] 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
- [12] NF EN 12350-6 (juin 2019) : Essais pour béton frais - Partie 6 : masse volumique
- [13] NF EN 12350-2 (juin 2019) : Essais pour béton frais - Partie 2 : essai d'affaissement
- [14] NF EN 12390-3 (juin 2019) : Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes
- [15] NF EN 12390-7 (juin 2019) : Essais pour béton durci - Partie 7 : masse volumique du béton durci
- [16] NF EN 12390-16 (octobre 2019) : Essais pour béton durci - Partie 16 : détermination du retrait du béton

### 7.3 Rapport d'essais

- [17] Eurofins, rapport d'analyse n°AR-21-LK-184900-01 – lixiviation sur granulats Anthropicite
- [18] Eurofins, rapport d'analyse n°AR-21-LK-194199-01 - lixiviation sur béton d'Anthropicite
- [19] A.F.Q.S., rapport d'essais sur prélèvement C1207022 de granulats Anthropicite
- [20] A.F.Q.S., rapport d'essais sur prélèvement C1208001 de béton témoin
- [21] A.F.Q.S., rapport d'essais sur prélèvement C1208002 de béton d'Anthropicite