

departement de la Seine-Saint-Denis

**Etude de faisabilité technique**

*PRODUCTION et expérimentation DE BORDURES DE VOIRIE ECO-CONCUES*

**Avec le soutien financier de :**

Une image contenant texte, Police, logo, capture d’écran

Description générée automatiquement

|  |  |
| --- | --- |
| Destinataire | |
| Gestionnaire du dossier | Conseil départemental de la Seine-Saint-Denis |
| Document | |
| Titre | Etude de faisabilité technique |
| Contexte | Etude de création d'une filière de production de bordures de voirie éco-conçues |
| Prestataire | |
| Société | Neo-Eco |
| Activité | Bureau d’études en ingénierie environnementale spécialisé dans la création de boucles d’économie circulaire |
| Adresse | 1 rue de la source  59320 Hallennes-Lez-Haubourdin |
| Téléphone | 03.20.10.31.18 |
| Rédacteurs | Brenda OMAÑA-SANZ |
| Poste | Chef de projets |
| E-mail | bomanasanz@neo-eco.fr |
| Téléphone | +33(0)6 45 81 53 10 |
| Rédacteurs | Emilien VASMER |
| Poste | Chef de projets |
| E-mail | evasmer@neo-eco.fr |
| Téléphone | +33(0)6 75 56 27 87 |

# TABLE DES MATIERES

[TABLE DES MATIERES iii](#_Toc185323041)

[1. INTRODUCTION 1](#_Toc185323042)

[1.1. Rappel 1](#_Toc185323043)

[1.2. Objet du document 1](#_Toc185323044)

[1.3. Programme expérimental 2](#_Toc185323045)

[1.4. Cahier des charges 2](#_Toc185323046)

[2. MATERIAUX 3](#_Toc185323047)

[2.1 Matériaux « courants » utilisés 3](#_Toc185323048)

[2.2 Matériaux « alternatifs » utilisés 3](#_Toc185323049)

[2.3 Materiau supplémentaire 4](#_Toc185323050)

[3 METHODES 4](#_Toc185323051)

[3.1 Méthode de fabrication de bordures 4](#_Toc185323052)

[3.2 Méthodes de caractérisations 5](#_Toc185323053)

[4 RESULTATS 7](#_Toc185323054)

[4.1 Résultats techniques 7](#_Toc185323055)

[4.2 Analyse des impacts environnementaux 8](#_Toc185323056)

[Annexes a](#_Toc185323057)

[Annexe 1 : Fiches techniques des gisements utilisés pour la formulation a](#_Toc185323058)

[Annexe 1.1 : Sable naturel a](#_Toc185323059)

[Annexe 1.2 : Ciment standard CEMII-A b](#_Toc185323060)

[Annexe 1.3 : Sable Recyclé issu des boues de curage c](#_Toc185323061)

[Annexe 1.4 : Liant Alternatif : Argile flash calcinée d](#_Toc185323062)

[Annexe 1.5 : Agent de compaction e](#_Toc185323063)

[Annexe 2 : Méthode de fabrication bordures f](#_Toc185323064)

[Annexe 2.1 : Malaxeur f](#_Toc185323065)

[Annexe 2.2 : Presse h](#_Toc185323066)

[Annexe 3 : Méthode de caractérisation j](#_Toc185323067)

[Annexe 3.1 : Flexion 3 points j](#_Toc185323068)

# INTRODUCTION

## Rappel

L‘ambition du Département de la Seine-Saint-Denis, en partenariat avec Neo-Eco, est de contribuer à la création et au développement d’une filière industrielle de bordures éco-conçues, afin de **réduire la consommation de ressources naturelles et l’emprunte carbone associées à la production de bordures de voirie**.

Le projet consiste ainsi à incorporer dans les bétons de bordures des matériaux issus de l’économie circulaire tels que des matières premières secondaires, en **substitution des portions de matériaux « courants » utilisés pour la fabrication de bordures, à savoir sable naturel et ciment clinker**.

Pour ce faire, le Département de la Seine-Saint-Denis et Neo-Eco ont lancé un Appel à Manifestation d’Intérêts (AMI) afin d’établir **deux accords de partenariat tripartites distincts, afin de favoriser une émulation concurrentielle.**

Chaque accord se fera entre :

* D’une part, un **groupement** constitué d’un **fabricant** de béton (fabricant de bordures en béton préfabriquées ou fabricant de béton prêt à l’emploi adapté aux bordures de voirie) et des **fournisseurs** des gisements alternatifs ;
* D’autre part le **Département de la Seine-Saint-Denis** ;
* Et enfin, **Neo-Eco**.

Ces accords permettront la réalisation de **bordures prototypes à l’échelle industrielle** et leur expérimentation par la mise en place de ces bordures sur des **chantiers pilotes du Département.**

La présente étude, et le projet dans son ensemble, bénéficient du soutien financier de la Métropole du Grand Paris et de l’ADEME Ile-de-France.

## Objet du document

Le présent document présente **les** **études réalisées préalablement** **à l’AMI** par le Département de la Seine-Saint-Denis et Neo-Eco. Ces travaux ont consisté à la **caractérisation de matières premières secondaires**, ou matières recyclées, issues de l’économie circulaire, et à la **formulation en laboratoire de bordures** intégrant ces matériaux alternatifs.

Les objectifs de ce document sont de :

* Présenter les **caractéristiques nécessaires** **des matériaux** pour la réalisation des bétons ;
* Montrer qu’il est possible de **développer des bordures** avec ces matières recyclées et de diminuer leur empreinte carbone.

En aucun cas cette étude de faisabilité remplace l’étude de prototypage industriel à la charge du Groupement dans l’AMI. Elle permet en revanche de partir de premiers résultats à adapter en fonction des matériaux sélectionnés, des process industriels et des résultats attendus.

Ainsi les Fabricants sont libres de répondre en groupement avec d’autres Fournisseurs de matériaux recyclés que ceux mobilisés dans le cadre de cette étude, bien que des travaux avec ces Fournisseurs ait déjà été initiés.

## Programme expérimental

Dans un premier temps Neo-Eco a caractérisé des matériaux alternatifs au sable et au ciment clinker. L’objectif était d’identifier des matériaux locaux pouvant répondre aux caractéristiques de matériaux utilisés dans le béton. Après une analyse multicritère, le sable recyclé issu de boues de curage a été retenu comme matériau pouvant se substituer à une part de sable naturel. Par ailleurs, l’argile flash calcinée a été retenu comme liant pouvant substituer un ciment clinker « courant » type CEM II.

Dans un second temps, Neo-Eco a fait appel au laboratoire CERIB pour la fabrication de bordures dans le cadre de l’étude de faisabilité, et les essais à réaliser sur les bétons pour différents taux de matériaux. Le travail réalisé avec le CERIB a été décomposé en trois phases :

* Phase 1 : bordures de références ;
* Phase 2 : bordures avec sable de curage ;
* Phase 3 : bordures avec sable de curage et argile calcinée.

Pour chaque phase, plusieurs formulations ont été étudiées et testées à la centrale à béton du CERIB. Ces formulations ont d’abord été réalisées et caractérisées sur éprouvettes girocompactées (cylindres de 10 cm de hauteur et 10 cm de diamètre) avant d’être réalisées et caractérisées sur bordures préfabriquées de type A2.

La phase 1 a servi à réaliser des bordures de référence pour les comparer aux bordures incluant les matériaux alternatifs, testées aux phases 2 et 3.

Pour les phases 2 et 3, différents paramètres de la formulation des bétons ont été modifiés (teneur en sable de curage, teneur en argiles calcinées, teneur en eau totale et en eau efficace, recours à un agent de compactage) afin de tenter d’obtenir les mêmes performances que la référence mais avec des taux élevés d’argiles calcinées et de sable de curage.

Les résultats présentés dans ce rapport sont les résultats finaux de chacune des 3 phases. Les résultats intermédiaires sur éprouvettes girocompactées et sur bordures seront transmis aux deux Groupements signant des accords de partenariat avec le Département de la Seine-Saint-Denis et Neo-Eco.

## Cahier des charges

**Trois normes encadrent la fabrication de bordures béton préfabriquées :**

* La norme européenne NF EN 1340 qui encadre les propriétés des bordures préfabriquées ;
* La norme française NF P98-340/CN qui encadre les types de bordures (surtout leur formes) ;
* Et le fascicule 31 du Cahier des Clauses Techniques Générales (C.C.T.G.) - Bordures et caniveaux en pierre naturelle ou en béton et dispositifs de retenue en béton

**Les propriétés des bordures préfabriquées définies par la norme NF EN 1340 sont les suivantes :**

* Résistance à la flexion :

Une image contenant texte, capture d’écran, Police, nombre

Description générée automatiquement

* Résistance à l’abrasion :
  + Usage courant : satisfaisante de fait par la qualité du béton ;
  + En option : ≤ 23 mm (essai au disque large), classe H selon le marquage NF.
* Résistance à la glissance :
  + Satisfaisante de fait (en raison de la rugosité naturelle du béton).
* Résistance au gel/dégel :
  + Gel faible : satisfaisante de fait par la qualité du béton (cf. résistance mécanique) ;
  + XF2 : gel faible ou modéré avec agent de déverglaçage : classe B
  + Classe B : valeur d’absorption d’eau moyenne inférieure à 6,0 %.

Les bordures en béton de ce projet ont pour **objectif** de respecter une résistance à la flexion de **classe U** (même si le Département interrogera éventuellement l’utilisation de la classe T**)**, une résistance au gel/dégel de **classe B** et une résistance à l’abrasion de **classe H**.

Un autre objectif de cette étude est d’incorporer un maximum de matériaux alternatifs (sable de curage et argile calcinée) et de diminuer l’empreinte carbone du béton.

# MATERIAUX

Le béton classique se compose de matières premières naturelles provenant de carrières telles que le sable, les graves et le clinker. L’objectif du projet est de substituer au maximum les matières premières naturelles (sable naturel, graves et ciment courant clinker) par des matières premières secondaires issus de du recyclage ou à faible empreinte carbone (sable recyclé et argile flash calciné).

**Les fiches techniques des matériaux utilisés lors de la formulation sont disponibles en** **Annexe 1**.

## Matériaux « courants » utilisés

Sable naturel :

Le CERIB a sourcé le sable naturel de granulométrie 0/4mm sur le site de La Grande Paroisse à Varennes-sur-Seine de l’entreprise de Heidelberg Materials. Ce sable naturel a été choisi notamment pour ses propriétés mais aussi pour son origine géographique. Sa fiche technique est disponible en **Annexe 1.1**.

Ciment courant :

Le ciment CEM II/A-LL, composé majoritairement de clinker et de calcaire, est utilisé dans la formulation comme liant principal. La formation du clinker étant à l’origine de l’impact carbone élevé du ciment, une partie a été substitué par de l’argile flash calciné.

Le ciment de la formulation a été fourni au CERIB par l’entreprise Lafarge provenant de leur usine de Saint-Pierre-la-Cour. Sa fiche technique est disponible en **Annexe 1.2**.

## Matériaux « alternatifs » utilisés

Sable recyclé issu des boues de curage :

Ce matériau provient du traitement des déchets issus du curage des réseaux et ouvrages d’assainissement sous forme de boues. Elles sont nettoyées, triées et lavées afin d’extraire des sables de qualité.

Le sable recyclé utilisé pour la formulation provient de l’entreprise de traitement Ecopur à Bonneuil-sur-Marne qui reçoit une grande partie des boues de curage du Département de la Seine-Saint-Denis.

Durant les formulations il est apparu que certaines propriétés de ces sables recyclés varient un peu selon les lots, entraînant une variation sur les résultats de bordures et donc sur les % de substitution réalisables. Ainsi sur la fiche technique du sable en **Annexe 1.3**, il est présenté des plages de valeurs.

Liant argile flash calcinée :

L’argile flash calcinée est un liant alternatif au ciment, obtenu par broyage et calcination rapide à 750°C. Le procédé libère de l’eau au lieu de CO2. En substituant partiellement le clinker dans la formulation, il permet de réduire l’empreinte CO2 du béton.

L’argile utilisée dans la formulation à hauteur provient de chantiers de terrassement, évitant ainsi l'extraction de nouvelles matières. L’argile flash calcinée a été fournie par l’entreprise NeoCem à Saint-Maximin. Sa fiche technique est disponible en **Annexe 1.4**.

## Materiau supplémentaire

Agent de compaction :

Cet adjuvant, utilisé dans les formulations de la phase 2 et 3, améliore la compaction du béton intégrant du sable recyclé et de l’argile flash calciné. Il permet de réduire la porosité du béton, renforçant la résistance mécanique et limitant l’absorption d’eau, ce qui améliore la résistance au gel/dégel). Sa fiche technique est disponible en **Annexe 1.5**.

# METHODES

## Méthode de fabrication de bordures

Malaxage des constituants :

Le malaxeur utilisé par le CERIB (**annexe 2.1**) permet de réaliser des gâchées de 300 litres permettant de produire 6 bordures.

Voici la procédure qui a été suivi :

* introduction de tous les granulats dans le malaxeur à l’arrêt ;
* mise en marche du malaxeur, malaxage pendant 2 min puis arrêt du malaxeur ;
* introduction du liant (ciment et éventuellement argiles calcinées en phase 3) ;
* malaxage pendant 1 min ;
* introduction de 70 % de l’eau d’ajout dans le malaxeur en fonctionnement ;
* introduction de l’agent de compactage le cas échéant dans le malaxeur en fonctionnement ;
* introduction de la quantité restante d’eau d’ajout dans le malaxeur en fonctionnement ;
* malaxage pendant 3 min une fois l’eau d’ajout introduite intégralement dans le malaxeur
* puis arrêt du malaxage.

Fabrication des bordures :

Une fois le béton malaxé, ce dernier est déversé dans des bacs. Le tiroir de la presse est rempli manuellement. La presse (**annexe 2.2**) permet de presser et de vibrer le béton dans le moule. Lors du premier remplissage de chaque gâchée, 115 kg de béton sont introduits dans le tiroir.

Puis pour les remplissages suivants, la masse de béton introduit correspond à la masse de la bordure précédente (environ 64-65 kg). La machine permet un démoulage immédiat des bordures. Une bordure est fabriquée par planche. Pour chaque formulation 6 bordures ont été fabriquées pour mettre de faire les essaies dessus. Les bordures ont été fabriquées avec un moule de bordure A2 ayant un volume de 2,69E-2 m³ :

Une image contenant Rectangle, croquis, diagramme, ligne

Description générée automatiquement

Figure 1 : Profil de bordures A2.

Conditions de stockage :

Une fois confectionnées, les bordures sont conservées dans les conditions suivantes :

* les 24 premières heures, dans une salle régulée à (20 ± 5) °C, sous une bâche afin de limiter autant que possible la dessication du béton ;
* jusqu’à 24 h avant l’essai, les corps d’épreuve sont stockés en salle humide (20 ± 3) °C, > 95 % HR ;
* les 24 heures avant essai, immergées dans l’eau à (20 ± 5) °C comme indiqué dans la norme NF EN 1340.

## Méthodes de caractérisations

Essais de flexion sur bordures :

Les essais de flexion sur bordures sont réalisés conformément au protocole décrit dans l’annexe F de la norme NF EN 1340. Cet essai consiste à soumettre la bordure à une flexion 3 points, la machine utilisée par le CERIB est montrée en **annexe 3.1**.

Les résultats moyens de flexion sur bordures indiqués dans le présent rapport sont des moyennes sur 3 bordures.

Les valeurs moyennes pour valider les classes de résistances de la norme NF EN 1340 doivent être supérieures à :

Essais d’absorption d’eau :

Les échantillons découpés dans la bordure sont immergés dans l’eau pendant au moins trois jours et ce jusqu’à atteindre une masse constante (on considère la masse constante atteinte dès que l'écart entre deux pesées effectuées à 24 h d'intervalle est inférieur à 0,1 %). Cette masse est notée M1. Les éprouvettes ou échantillons issus des bordures sont ensuite mis dans une étuve à (105 ± 5) °C jusqu’à atteindre une masse constante M2. L’absorption d’eau totale Wa (en %) est ensuite calculée selon la formule indiquée ci-dessous :

Les résultats moyens d’absorption d’eau sur bordures indiqués dans le présent rapport sont des moyennes sur 3 bordures.

Essais de résistance à l’abrasion sur bordures :

Cet essai consiste soumettre le produit à une abrasion à l’aide d’un disque large tournant et d’un abrasif dans des conditions normalisées. La taille de l’empreinte suite à l’essai est ensuite mesurée puis corrigée par rapport à une valeur d’étalonnage.

Ces essais ont été réalisés systématiquement sur 3 échantillons découpés dans des bordures.

# RESULTATS

## Résultats techniques

Le tableau 1 présente les résultats obtenus pour chaque phase. Pour rappel la phase 1 a servis de référence, la phase a permis d’étudier l’incorporation de sable recyclé et la phase 3 a permis d’étudier la combinaison d’incorporation de matières recyclées et la diminution de l’empreinte carbone en remplaçant du ciment clinker par un liant argile flash calcinée.

Il a été remarqué que le lot de de curage recyclé utilisé pour la phase 3 a présenté des propriétés moins favorables que le lot utilisé pour la phase 2. Ainsi la comparaison des phases 2 et 3 se fait par l’ajout du liant argile flash calcinée mais aussi par ce changement de lot de sable recyclé.

Tableau 1 : Présentation des compositions des formulations et leurs résultats :

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | **Phase 1** | **Phase 2** | **Phase 3** |
| **Matériaux** | %/masse totale | %/masse totale | %/masse totale |
| CEM II/A-LL 52,2R | 14,9 | 14,7 | 9,6 |
| Liant Argile | 0 | 0 | 5,3 |
| **Liant Total** | **14,9** | **14,7** | **14,9** |
| Sable 0/4 GSM LGP | 79,2 | 31,4 | 31 |
| Sable de curage | 0 | 47,0 | 46,5 |
| **Total des granulats** | **79,2** | **78,4** | **77,5** |
| **Eau totale** | **6,2** | **6,5** | **7,4** |
| Eau efficace | 5,6 | 6,0 | 6,4 |
| Adjuvant | 0 | 0,28 | 0,24 |
| **Résultats** | | | |
| Eeff/C (C = liant total) | 0,38 | 0,38 | 0,432 |
| **Etat frais** |  | | |
| Masse volumique moyenne atteinte(kg/m³) | 2 312 | 2 303 | 2285 |
| Aspect visuel | Satisfaisant | Satisfaisant | Satisfaisant |
| **Etat durci** |  | | |
| Flexion moyenne à 14/15J (MPa) | 7,9 | 6,6 | 5,5 |
| **Flexion caractéristique à 14/15J (MPa)** | **7,3** | **6,3** | **5,2** |
| **Absorption d’eau moyenne (%)** | **4,8** | **5,3** | **5,8** |
| **Résultat d’abrasion sur bordures (mm)** | **15,5** | **18,17** | **En attente** |

La **phase 1** a permis de développer une formulation de béton intégrant les constituants de référence choisis pour l’étude. Cette formulation de béton de référence a servi de base pour le développer les formulations intégrant des constituants alternatifs. La formulation de béton de référence développée répond aux classes suivantes :

* **classe U** de résistance à la flexion ;
* **classe B** de résistance gel/dégel ;
* **classe H** de résistance à l’abrasion.

Suite à l’utilisation de plusieurs leviers dont l’utilisation d’un agent de compactage, l’augmentation de la masse volumique et l’utilisation d’un dosage en eau adapté aux différents granulats et liants utilisés, une formulation a été développée en **phase 2**. Cette formulation intègre une substitution de 60 % de granulats naturels par du sable de curage. Cette formulation alternative avec des sables recyclés issus des boues de curage répond aux classes suivantes :

* **classe U** de résistance à la flexion ;
* **classe B** de résistance gel/dégel ;
* **classe H** de résistance à l’abrasion.

La **phase 3**, a été réalisée avec une substitution des sables naturels par 60 % de sable de curage (comme dans la phase 2) et avec une substitution du ciment clinker courant par 25 % de liant argile flash calcinée. La masse volumique souhaitée (supérieure à 2 300 kg/m³) n’a pas été atteinte comparé à la phase 2 dû à une demande plus importante en eau de l’argile mais aussi dû à une demande en eau plus importante de sable de curage.

En effet le lot de sable de curage utilisé pour la phase 3 présente une absorption d’eau de 3 % comparé à 1,5 % pour le lot utilise pour la phase 2. La faible masse volumique des bordures influencent la baisse des résultats en flexion et l’augmentation de ceux en absorption de la phase 3 comparé aux deux autres phases. Ainsi la formulation de la phase 3 répond actuellement aux classes suivantes :

* **classe T** de résistance à la flexion ;
* **classe B** de résistance gel/dégel ;
* **classe H** de résistance à l’abrasion.

Des leviers sont possibles pour augmenter la masse volumique et ainsi augmenter la résistance à la flexion et diminuer l’absorption d’eau : une augmentation de la teneur en eau, ou en adjuvant, une augmentation de la pression de la presse ou une diminution des matériaux alternatifs.

## Analyse des impacts environnementaux

L’analyse des impacts environnementaux a été réalisée à titre indicatif. Cette analyse est seulement sur les **impacts des matières premières**. En effet les potentiels transports entre les fournisseurs et le lieu de fabrication des bordures n’a pas été pris compte. L’énergie nécessaire à malaxer le béton et à fabriquer les bordures n’a pas été pris en compte.

Pour réaliser l’analyse environnementale des matières premières, ces documents ont servi d’**hypothèses** :

* ICV – Module d’information sur le cycle de vie du CEMII/A-L (France Ciment) ;
* Module d’information environnementale de la production de granulats à partir de roches massives (UNPG) ;
* FDES d’un agent plastifiant comparable à la FDES d’un agent de compactage ;
* Les informations transmises par Ecopur pour l’utilisation d’eau et d’énergie lors de leur process de lavage des sables ;
* Les informations transmises par NeoCem pour la consommation d’énergie lors de la calcination des argiles.

Le tableau 2 ci-dessous expose les impacts environnementaux des matières premières utilisées pour la fabrication d’une bordure pour chaque phase de l’étude en s’appuyant sur les hypothèses exposées au-dessus.

Tableau 2 : Impacts environnementaux des matières premières pour la production d’une bordure selon les différentes phases :

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Impacts** | **Unité** | **Phase 1 : référence** | **Phase 2** | **Phase 3** |
| **Changement climatique** | kg CO2 éq | 6,68E+00 | 6,81E+00 | 4,79E+00 |
| **Eau douce** | m³ | 1,67E-01 | 1,94E-01 | 1,31E-01 |
| **Eau de gachage** | m³ | 3,85E-03 | 4,06E-03 | 4,54E-03 |
| **Eau total** | m³ | 1,71E-01 | 1,98E-01 | 1,36E-01 |
| **Matériaux naturels sauvés** | kg | 0,00E+00 | 2,92E+01 | 3,20E+01 |
| **Energie primaire renouvelables** | MJ | 9,90E-01 | 1,32E+00 | 9,62E-01 |
| **Energie primaire non renouvelables** | MJ | 3,40E+01 | 3,68E+01 | 2,55E+01 |
| **Energie totale** | MJ | 3,50E+01 | 3,82E+01 | 2,64E+01 |
| **Déchets dangereux éliminés** | kg | 3,18E-02 | 2,62E-02 | 1,82E-02 |
| **Déchets non dangereux éliminés** | kg | 3,06E-01 | 2,85E-01 | 1,91E-01 |

Le tableau 3 compare les impacts environnementaux entre les différentes phases.

Tableau 3 : Comparaison des impacts entre les différentes phases :

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Impacts** | **Phase 2 vs référence** | **Phase 3 vs référence** | **Phase 3 vs phase 2** |
| **Changement climatique (CO2)** | +2% | -28% | -30% |
| **Eau douce** | +16% | -22% | -32% |
| **Eau de gachage** | +6% | +18% | +12% |
| **Eau total** | +16% | -21% | -31% |
| **Matériaux naturels sauvés** | +50% | +56% | +10% |
| **Energie primaire renouvelables** | +34% | -3% | -27% |
| **Energie primaire non renouvelables** | +8% | -25% | -31% |
| **Energie totale** | 9% | -25% | -31% |
| **Déchets dangereux éliminés** | -17% | -43% | -31% |
| **Déchets non dangereux éliminés** | -7% | -38% | -33% |

La **phase 2** avec une substitution de 60 % des sables naturels par des sables recyclés atteint l’objectif principal du Département de la Seine-Saint-Denis qui est de **réduire l’utilisation des matériaux naturels par 50 %.**

En revanche cette formulation entraîne une légère augmentation de 2 % de l’impact CO2, une augmentation de 6 % de l’eau douce utilisé pour les matières premières, une augmentation de l’eau de gâchage de 6 % et une augmentation de 9 % de l’énergie. Ces augmentations sont essentiellement dû à l’utilisation d’un agent de compaction nécessaire pour aider les sables recyclés à mieux se compacter et ainsi obtenir les propriétés souhaitées.

L’utilisation d’argile flash calcinée comme substituant de 25 % du ciment, en plus des 60 % de sable recyclé substituant les sables naturels, dans la **phase 3** permet de compenser les effets négatifs de l’agent. En effet cette formulation 3 permet, comparé à la référence, de **réduire de 28 % l’impact CO2**, de **réduire de 32 % l’eau douce** utilisée pour les matières premières et **de réduire de 31 % l’énergie totale**.

Ces résultats positifs sont essentiellement dû à l’utilisation de l’argile flash calcinée qui a un process plus vertueux que le ciment clinker. De plus les argiles de NeoCem proviennent de déblais considérés comme des matières premières secondaires, ce qui permet en plus des sables recyclés d’avoir sur cette formulation une **réduction de 56 % des matériaux naturels utilisés**.

En revanche l’eau de gâchage à augmenter de 18 % comparé à la référence, cela est dû à l’absorption d’eau plus importante des sables recyclés et des argiles flash calcinées. Mais **l’eau total** (eau douce + eau de gâchage (eau recyclée)) quant à elle **diminue de 21 %** car l’eau douce utilisée pour fabriquer les matières premières a une diminution plus importante que l’augmentation de l’eau de gâchage.

# Annexes

## Annexe 1 : Fiches techniques des gisements utilisés pour la formulation

### Annexe 1.1 : Sable naturel

Une image contenant texte, capture d’écran, nombre, Police

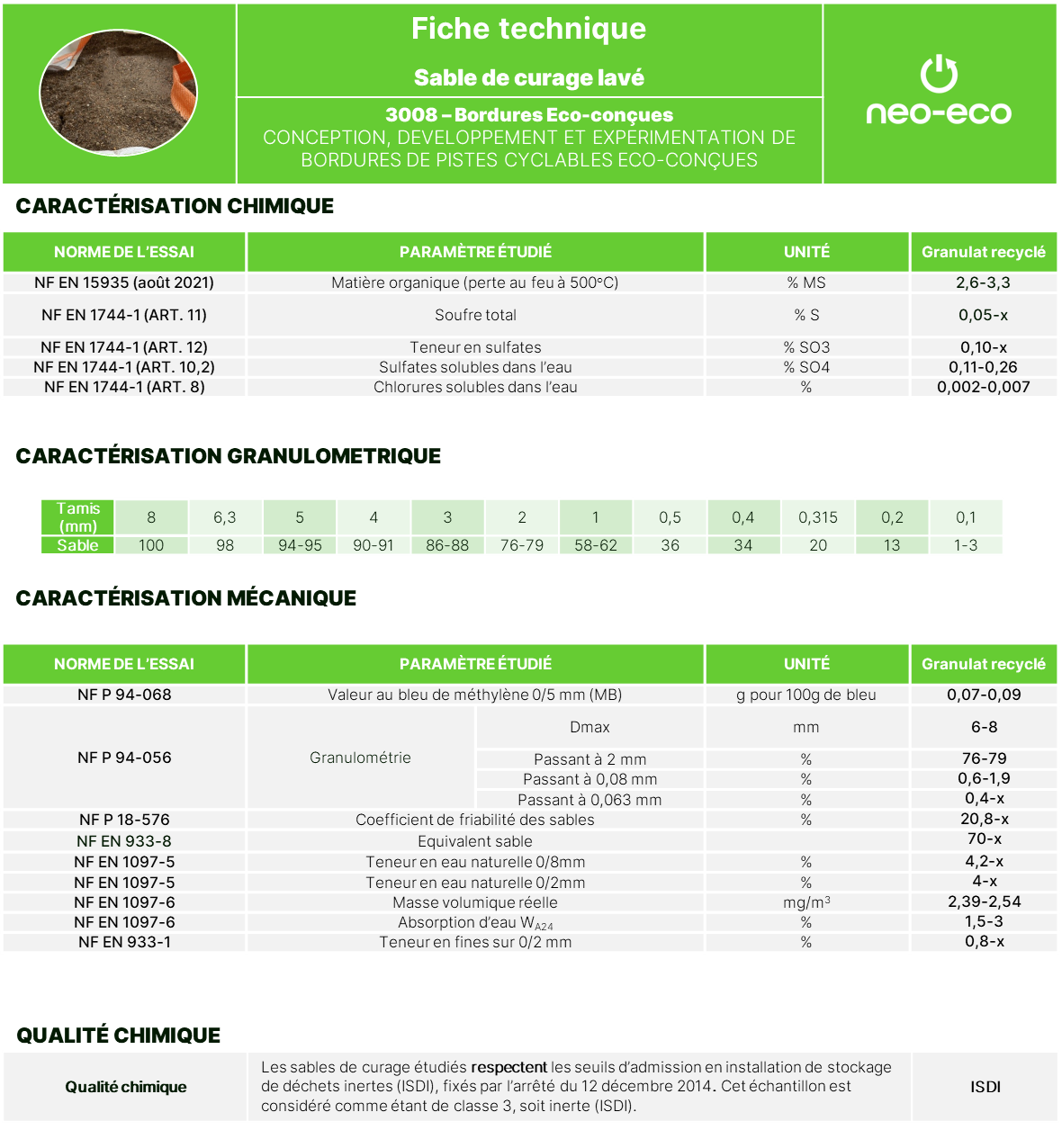
Description générée automatiquement

### Annexe 1.2 : Ciment standard CEMII-A

Une image contenant texte, capture d’écran, Page web, Site web

Description générée automatiquement

### Annexe 1.3 : Sable Recyclé issu des boues de curage



### Annexe 1.4 : Liant Alternatif : Argile flash calcinée

Une image contenant texte, capture d’écran, Police, nombre

Description générée automatiquement

### Annexe 1.5 : Agent de compaction

Une image contenant texte, capture d’écran, Police, nombre

Description générée automatiquement

## Annexe 2 : Méthode de fabrication bordures

### Annexe 2.1 : Malaxeur

Une image contenant ingénierie, industrie, acier, bâtiment

Description générée automatiquement

Une image contenant texte, bâtiment, plein air

Description générée automatiquement

### Annexe 2.2 : Presse

Une image contenant machine, ingénierie, train, intérieur

Description générée automatiquement

Une image contenant bâtiment, table, intérieur, machine

Description générée automatiquement

## Annexe 3 : Méthode de caractérisation

### Annexe 3.1 : Flexion 3 points

Une image contenant intérieur, ingénierie, mur, machine

Description générée automatiquement