



HAL
open science

Utilisation de matériaux recyclés en voirie et réseaux divers. Qualité des ouvrages du point de vue du maître d'oeuvre

Damien Bresson

► **To cite this version:**

Damien Bresson. Utilisation de matériaux recyclés en voirie et réseaux divers. Qualité des ouvrages du point de vue du maître d'oeuvre. Infrastructures de transport. 2017. dumas-01717246

HAL Id: dumas-01717246

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01717246v1>

Submitted on 26 Feb 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
PARIS

MEMOIRE

Présenté en vue d'obtenir le
DIPLOME D'INGENIEUR CNAM
SPECIALITE : CONSTRUCTION ET AMENAGEMENT
PARCOURS : TRAVAUX
OPTION : TRAVAUX PUBLICS
CODE : CYC65

Par
Damien BRESSON

Utilisation de matériaux recyclés en voirie et réseaux divers – qualité
des ouvrages du point de vue du maître d'œuvre
Soutenu le 27 juin 2017

MEMBRES DU JURY :

M. JS. VILLEFORT, Professeur, responsable national du diplôme
M. S. ROHRBACH, Professeur associé, PDG ARTXBAT
M. P. MACQUART, Professeur associé, DG UFME
M. M. DUBOIS, Directeur de Travaux, Demathieu Bard
M. C. GODEBY, Gérant Bureau d'études EVA
Mme N. BEGUIN, Directrice Bureau d'études EVA

Remerciements.

Ce travail a été réalisé sur mon temps personnel, en parallèle de mon activité professionnelle au sein du bureau d'études EVA.

Je tiens tout d'abord à remercier les enseignants du CNAM :

- M. JS. VILLEFORT,
- M. S. ROHRBACH,
- M. P. MACQUART,
- M. M. DUBOIS,

Et les professeurs qui ont assuré les unités d'enseignement que j'ai suivies, notamment Madame Painchaux pour ses précieux conseils.

Je remercie également M. Godeby, Mme Beguin et M. Richefort, du bureau d'études EVA pour leurs conseils et leurs encouragements.

Pour finir je ne saurais jamais assez remercier mon épouse Sabine pour sa patience inépuisable et son soutien infatigable, ainsi que mon fils Roch pour sa patience et sa bonne humeur.

Introduction

Mon employeur, EVA, a été missionné en qualité de sapiteur pour plusieurs expertises suite à des désordres apparus sur des ouvrages pour lesquels il a été fait appel à des matériaux recyclés et/ou du site.

Il est intuitivement possible d'affirmer que ces matériaux proviennent de sources hétérogènes, et que le caractère diffus de la production complique et renchérit le suivi qualité.

Par ailleurs, en tant que maître d'œuvre de conception et d'exécution, je suis souvent interrogé sur la possibilité de réemployer, essentiellement en remblai, en structure de chaussée ou en remblai de tranchée, tel ou tel matériau déjà présent sur le site, ou d'adjoindre une certaine quantité de matériaux recyclés à un ouvrage. En tant que garant de la qualité de l'ouvrage exécuté, quel doit être mon comportement dans pareil cas ? En dehors de l'intérêt économique souvent évident de l'usage de matériaux recyclés, quelles sont les autres opportunités et quels sont les risques à les employer?

Les missions qui me sont confiées dans le cadre de mon activité professionnelle ont un spectre souvent très large. Mon métier consiste donc à agréger et restituer des données provenant de sources diverses. En conséquence, le travail qui va suivre ne cherche pas tant à mener une étude pointue d'un matériau ou d'un paramètre particulier qu'à constituer une sorte de vade-mecum des points d'attention susceptibles d'intéresser un « généraliste » et à lui donner les outils pour communiquer avec un public « non sachant », les maîtres d'ouvrage en particulier.

Plan du mémoire

Remerciements.....	2
Introduction	3
Plan du mémoire.....	4
Mémoire.....	9
1. Recyclage et matériaux non conventionnels : Généralités.....	9
1.1. Contexte de l'étude	9
1.2. Définitions	10
1.3. Typologies des matériaux étudiés	11
1.4. Usages des matériaux	11
2. Caractéristiques des matériaux étudiés.....	11
2.1. Granulométrie	12
2.2. Teneur en eau	13
2.3. Argilosité et propreté.....	13
2.4. Caractéristiques de compactage et de portance	14
2.5. Résistance mécanique des grains	15
2.6. Forme des granulats.....	16
2.7. Propriétés chimiques	18
2.8. Caractérisation des matériaux recyclés	18
2.9. Autres caractéristiques	19
2.10. Caractérisation synthétique des matériaux	19
3. Transformation des matériaux	21
3.1. Cycle des matériaux	21
3.2. Procédés de transformation.....	22
3.2.1. Terres.....	22
3.2.2. Bétons de démolition et matériaux assimilés.....	23
3.2.3. Agrégats d'enrobés.....	23
3.3. Conception des installations de recyclage.....	23

4.	Sites de production	25
4.1.	Carrières.....	25
4.2.	Installations de recyclage.....	26
4.3.	Installations de stockage de déchets	26
4.4.	Localisation des sites de production.....	28
4.4.1.	Etat des lieux.....	28
4.4.2.	Politique et contraintes de localisation.....	31
5.	Statistiques de production.....	34
5.1.	Matériaux entrants sur le chantier.....	34
5.2.	Utilisation des matériaux	36
5.2.1.	Béton	37
5.2.2.	Usages routiers/viabilité.....	38
5.3.	Production de déchets	39
5.3.1.	Evaluation des quantités en jeu.....	39
5.3.2.	Répartition par mode de gestion	40
6.	Normalisation – contrôle qualité des matériaux routiers	41
6.1.	Loi et normes applicables.....	41
6.1.1.	Cadre légal national et européen	41
6.1.2.	Règlementation locale.....	45
6.1.3.	Normes d’application volontaire	47
6.2.	Contrôle qualité	48
6.2.1.	Contrôle qualité dans le cadre du marquage CE.....	49
6.2.2.	ISO 9001	51
6.2.3.	Gestion de la qualité à l’intérieur d’une plateforme de recyclage	52
6.2.4.	Gestion de la qualité des déconstructions – traçabilité...	54
6.2.5.	Coût du contrôle qualité.....	55
7.	Politique des maîtres d’ouvrage	57

7.1.	Intérêt économique	57
7.1.1.	Evolution du coût des approvisionnements en granulats depuis 2000	57
7.1.2.	Coût logistique	59
7.2.	Intérêt technique	61
7.2.1.	Bitumes recyclés :	61
7.2.2.	Granulats de béton recyclé	61
7.3.	Intérêt écologique – certification	62
7.3.1.	Principes de la certification	62
7.3.2.	Mesure de la qualité environnementale	63
7.3.3.	Conception des référentiels	63
7.3.4.	Rôle du maître d’ouvrage	64
8.	Les référentiels de certification	65
8.1.	Certification BREEAM	65
8.1.1.	Présentation de BREEAM	65
8.1.2.	BREEAM Communities	65
8.1.3.	BREEAM Infrastructure	69
8.1.4.	BREEAM New construction	72
8.2.	Certification HQE	73
8.2.1.	Présentation	73
8.2.2.	Référentiel HQE infrastructures	73
8.2.3.	Référentiel Aménagement	78
8.2.4.	Référentiel logement	78
8.3.	Autres référentiels	78
8.4.	Coût de la certification	79
8.5.	Conclusion sur la certification	80
8.5.1.	Investissements liés à la certification	80
8.5.2.	Limite des référentiels existants	80

8.5.3. Propositions de l’auteur.....	81
9. Impact sur la société - Externalités	81
9.1. Consommation d’espace nécessaire à la production.....	81
9.2. Intégration des installations de production de granulats dans leur environnement	82
9.3. Logistique et utilisation du réseau routier.....	84
9.3.1. Statistiques	85
9.3.2. Impacts du transport routier.....	86
9.4. Bilan carbone	87
10. Désordres et non qualités constatées – étude de cas	89
10.1. Sources de désordres potentielles – mécanismes mis en jeu	90
10.1.1. Sulfates.....	90
10.1.2. Effets du gel	91
10.2. Etude de cas : Noyelles-Godault – utilisation de schistes houillers en structure de chaussée.....	96
10.2.1. Description du cas et problématiques rencontrées	96
10.2.2. Solutions mises en œuvre.....	98
10.2.3. Retour d’expérience.....	102
11. Outils et méthodologies pour le maître d’œuvre.....	102
11.1. Proposition des entreprises de travaux.....	103
11.2. Réemploi de matériaux du site	103
11.2.1. Gestion du risque	103
11.2.2. Choix des essais complémentaires	107
11.3. Demande du maître d’ouvrage	107
Conclusion.....	110
Liste des acronymes	111
Liste des annexes.....	112
Bibliographie	112

Liste des figures.....	118
Liste des tableaux	119
Liste des équations.....	120
Résumé	121

Mémoire

1. Recyclage et matériaux non conventionnels : Généralités

1.1. Contexte de l'étude

Ce mémoire traite du contexte le plus fréquemment rencontré dans le cadre de l'activité d'une entreprise de maîtrise d'œuvre privée de voirie et réseaux divers, à savoir des chantiers occupants une emprise allant d'une centaine à quelques dizaines de milliers de mètres carrés pour le compte de maîtres d'ouvrages privés (promoteurs, industriels...), de collectivités territoriales ou d'administrations non spécialisées dans le domaine routier (ministère de l'intérieur ou de la défense par exemple). Il s'agit le plus souvent de travaux neufs (lotissement...) ou de modification/réfection lourde d'une emprise (valorisation de voie communale, création de réseau d'assainissement ou de distribution d'énergie...).

Une grande partie de ces projets est associée à des travaux de création ou de restructuration lourde de bâtiments. Les entreprises de travaux amenées à intervenir sont soit des PME/TPE, soit des agences locales de grandes entreprises spécialisées dans la route ou les travaux de réseaux.

En miroir, ce mémoire ne traite pas des questions d'entretien routier telles que définies dans certains manuels du SETRA ou équivalent, et ne traitera pas non plus, a priori, des procédés spéciaux (retraitement de chaussées en place par exemple), des terrassements en grande ou très grande masse ni des fabrications spéciales en grande quantité (chantier avec centrale d'enrobés mobile...).

En d'autres termes, ce mémoire ne traite pas du réseau routier départemental, national ou autoroutier, ni des chaussées aéroportuaires ou des « grands travaux » en général.

On postulera donc que les procédés étudiés sont ou peuvent être reproduits sur un nombre important d'opérations, et sont donc susceptibles de faire l'objet d'une normalisation.

En corollaire, les essais de caractérisation proposés dans le cadre des opérations étudiées auront pour but de permettre une connaissance plus ou moins fine du matériau, afin de le rattacher à une catégorie connue.

1.2. Définitions

- Déchet : le dictionnaire Larousse le définit comme « *perte, partie irrécupérable de quelque chose* ». La législation le définit comme « *toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire* » (Commission européenne, 2008).

Ces définitions sont colorées assez négativement : on parle de quelque chose d'inutile et encombrant.

- Sous-produit : le dictionnaire Larousse propose plusieurs définitions, à savoir : « *produit dérivé d'un autre* », « *mauvaise imitation, produit de qualité médiocre* », « *corps obtenu accessoirement dans une préparation chimique industrielle, ou comme résidu d'une extraction* » et « *substance utile associée dans le minerai ou le produit recherché par l'exploitation* ». La législation quant à elle le définit comme « *une substance ou un objet issu d'un processus de production dont le but premier n'est pas la production dudit bien ne peut être considéré comme un sous-produit et non comme un déchet [...]*» (Commission européenne, 2008).

- Granulats : petits morceaux de roches, sables et graviers dont la taille est comprise entre 0 et 125mm.

- Recyclage : le dictionnaire Larousse le définit comme un « *ensemble de techniques ayant pour objectif de récupérer des déchets et de les réintroduire dans le cycle de production dont ils sont issus* ».

- Réemploi sur site : il s'agit de l'opération qui consiste à utiliser dans la construction d'un nouvel ouvrage un matériau déjà présent sur le site. En l'espèce, sont utilisés les matériaux formant la structure des ouvrages à démolir tels que des bâtiments ou des chaussées, ou bien du sol en place.

1.3. Typologies des matériaux étudiés

Voici une liste des matériaux usuellement rencontrés dans les chantiers de VRD. Certains d'entre eux peuvent faire l'objet d'un recyclage ou d'un réemploi dans le même type d'application, ou entrent dans la composition de matériaux recyclés :

- terres (éventuellement polluées),
- bétons de démolition,
- agrégats d'enrobés,
- autres : tuiles, carrelage, verre, etc...,
- terres végétales et bio déchets : non concernés car non utilisés pour des applications structurelles,
- sous-produits industriels : mâchefers d'incinération des déchets non dangereux, laitiers de hauts fourneaux : non concernées (production homogène).

1.4. Usages des matériaux

Les matériaux étudiés dans ce mémoire sont, le plus généralement, utilisés de la façon suivante :

- en terrassement (remblais),
- en structure de chaussée (y/c bitumineuse ou traitée aux LH/chaux),
- en remblais de tranchées ou contre ouvrages.

On note donc que les applications telles que le béton et les enrobés bitumineux, faisant déjà l'objet d'une production industrielle et de contrôles qualités assez stricts, ne sont pas inclus dans le champ de ce mémoire. De plus, du point de vue du maître d'œuvre de voirie et réseaux divers, la production de ces matériaux est faite dans des installations assez rarement soumises à son contrôle direct.

2. Caractéristiques des matériaux étudiés

L'objet de ce chapitre est de faire une liste des caractéristiques physiques des matériaux étudiés, et d'indiquer l'incidence de ces caractéristiques sur leur emploi. Cette liste a pour but de présenter les plus usuellement recherchées et n'est pas exhaustive.

La norme NF P18-545 dénombre un grand nombre des caractéristiques susceptibles d'être étudiées et d'essais applicables aux différents types de granulats.

2.1. Granulométrie

C'est la mesure de la dimension des grains d'un mélange, détermination de leur forme et étude de leur répartition dans différents intervalles dimensionnels.

La granulométrie est définie en première intention par une mesure de type d/D , avec :

- d : dimension du plus petit granulat (éventuellement 0),
- D : dimension du plus gros granulat.

Ces dimensions sont généralement exprimées en mm. Il convient de noter qu'elles font l'objet d'une certaine tolérance, il est donc possible qu'un petit pourcentage des grains dépasse la fourchette indiquée.

Pour plus de précision, on étudie la courbe granulométrique, qui permet de connaître la distribution des tailles de grains dans l'intervalle défini :

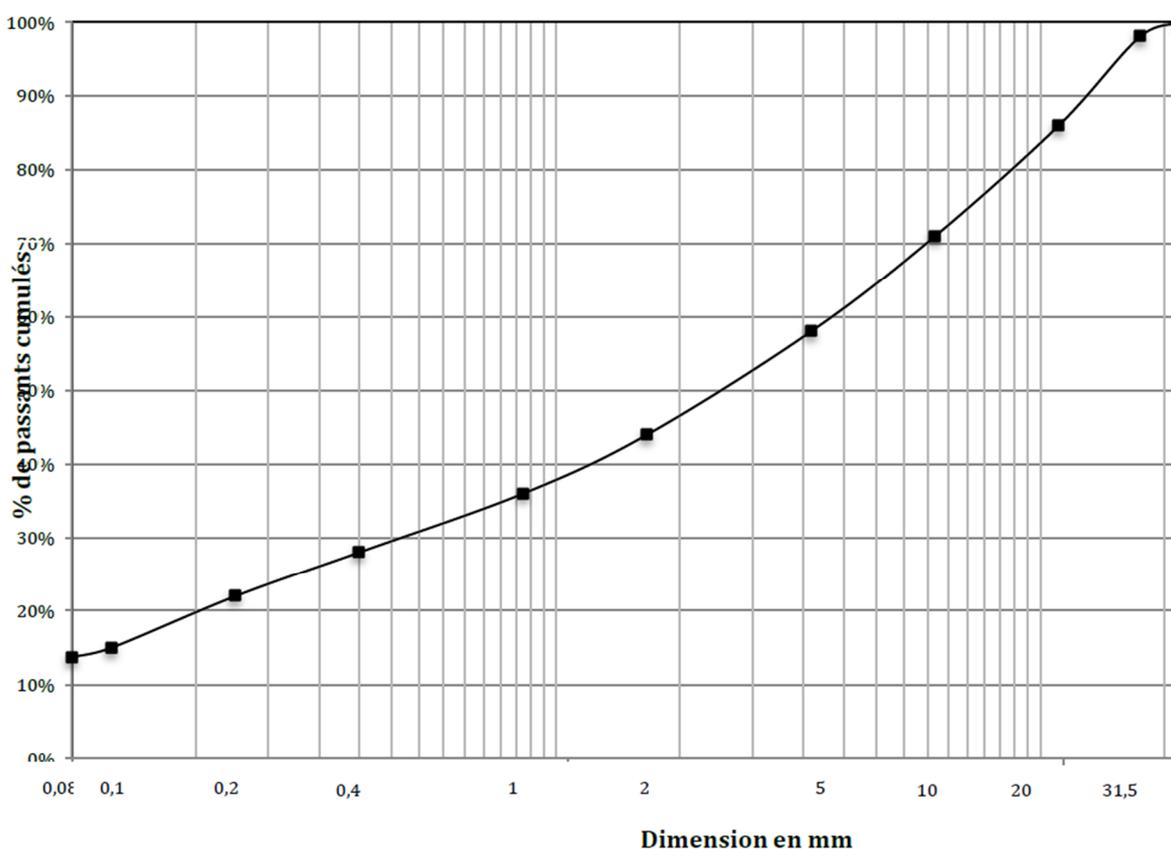


Figure 1 : exemple de courbe granulométrique (source : fiche produit grave HQE 0/31,5, RFM)

La granulométrie se détermine le plus souvent par tamisage, suivant le protocole défini par la norme NF EN 933-1. Elle permet d'anticiper sur les conditions de mise en œuvre des matériaux (atelier de terrassement, de compactage, de malaxage, épaisseur des couches de remblai), et constitue une donnée d'entrée pour le choix des autres essais susceptibles d'être conduits par la suite.

2.2. Teneur en eau

La teneur en eau est la proportion d'eau libre contenue dans le matériau. Elle est exprimée par le rapport en pourcentage entre le poids d'eau dans un échantillon et le poids de cet échantillon. Cette mesure peut être obtenue par séchage de la prise d'essai en étuve suivant le protocole défini par la norme NF EN 1097-5.

Pour un même matériau, une variation de teneur en eau va entraîner des effets sur la traficabilité de chantier, l'aptitude au compactage et au terrassement.

2.3. Argilosité et propreté

L'argilosité d'un matériau est sa teneur en éléments fins (argiles).

Pour les sols argileux à très argileux, on utilise la mesure de l'indice de plasticité (I_p), réalisée suivant le protocole décrit dans la norme NF P94-051. Les seuils sont les suivants, d'après le GTR (CORTE, et al., 2000) :

- 12 : limite supérieure des sols faiblement argileux,
- 25 : limite supérieure des sols moyennement argileux,
- 40 : limite entre les sols argileux et très argileux.

Pour les sols peu argileux, on utilise la mesure de la valeur au bleu de Méthylène (VBS), réalisée suivant le protocole décrit dans la norme NF P94-068. Les seuils sont les suivants, d'après le GTR (CORTE, et al., 2000) :

- 0.1 : seuil en dessous duquel on peut considérer que le sol est insensible à l'eau,
- 0.2 : seuil au-dessus duquel apparaît à coup sûr la sensibilité à l'eau,

- 1.5 : seuil distinguant les sols sablo-limoneux des sols sablo-argileux,
- 2.5 : seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques des sols limoneux de plasticité moyenne,
- 6 : seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux,
- 8 : seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux.

L'argilosité d'un sol ou d'un matériau permet d'anticiper sa sensibilité à l'eau. Les sols peu argileux sont difficiles à compacter (l'eau ne peut pas agir comme un « lubrifiant »), les sols très argileux sont très sensibles aux conditions climatiques ou à la présence d'eau dans le sol (retrait gonflement) et sont souvent délicats à terrasser et à circuler.

Par ailleurs, la présence d'impuretés dans un matériau normalement exempt d'éléments fins est à l'origine d'effets indésirables lorsque celui-ci est mis en présence de liants hydrauliques : surconsommation de liants, mauvaise adhérence entre les grains et la matrice cimentaire, résistance mécanique plus faible qu'attendue, prise incomplète par manque d'eau...

En sens contraire, les éléments fins donnent une cohérence au matériau et permettent, dans une certaine mesure, un meilleur compactage en remplissant les vides inter-granulaires. Les sols dont les éléments fins sont absents sont donc souvent délicats à régler et à circuler pendant le chantier.

2.4. Caractéristiques de compactage et de portance

Afin d'assurer la pérennité d'un ouvrage géotechnique, autrement dit de faire en sorte que celui-ci ne subisse pas de variations géométriques au cours du temps (tassement, glissement...) malgré la présence de surcharges (constructions, trafic), il est nécessaire d'assurer une bonne cohésion entre les grains constituant le matériau. Cette cohésion est obtenue par compactage, opération consistant à réduire autant que possible les vides entre les grains.

L'essai PROCTOR décrit par la norme NF P94-093 permet de déterminer, par essais successifs sur un matériau donné, la teneur en eau

permettant d'obtenir le meilleur compactage du matériau pour une énergie de compactage donnée, caractérisée par la densité du matériau.

Il existe deux versions de l'essai PROCTOR, l'essai dit « normal », adapté pour les remblais généraux, et l'essai « modifié », dont l'énergie de compactage est augmentée, pour les couches les plus proches de la surface, ou soumises à des contraintes plus importantes.

L'Indice de Portance Immédiate (IPI) indique quant à lui la capacité du sol à résister aux sollicitations du trafic pour une teneur en eau donnée. Cet essai, décrit par la norme NF P94-078, consiste mesurer la résistance du sol à l'enfoncement d'une tige.

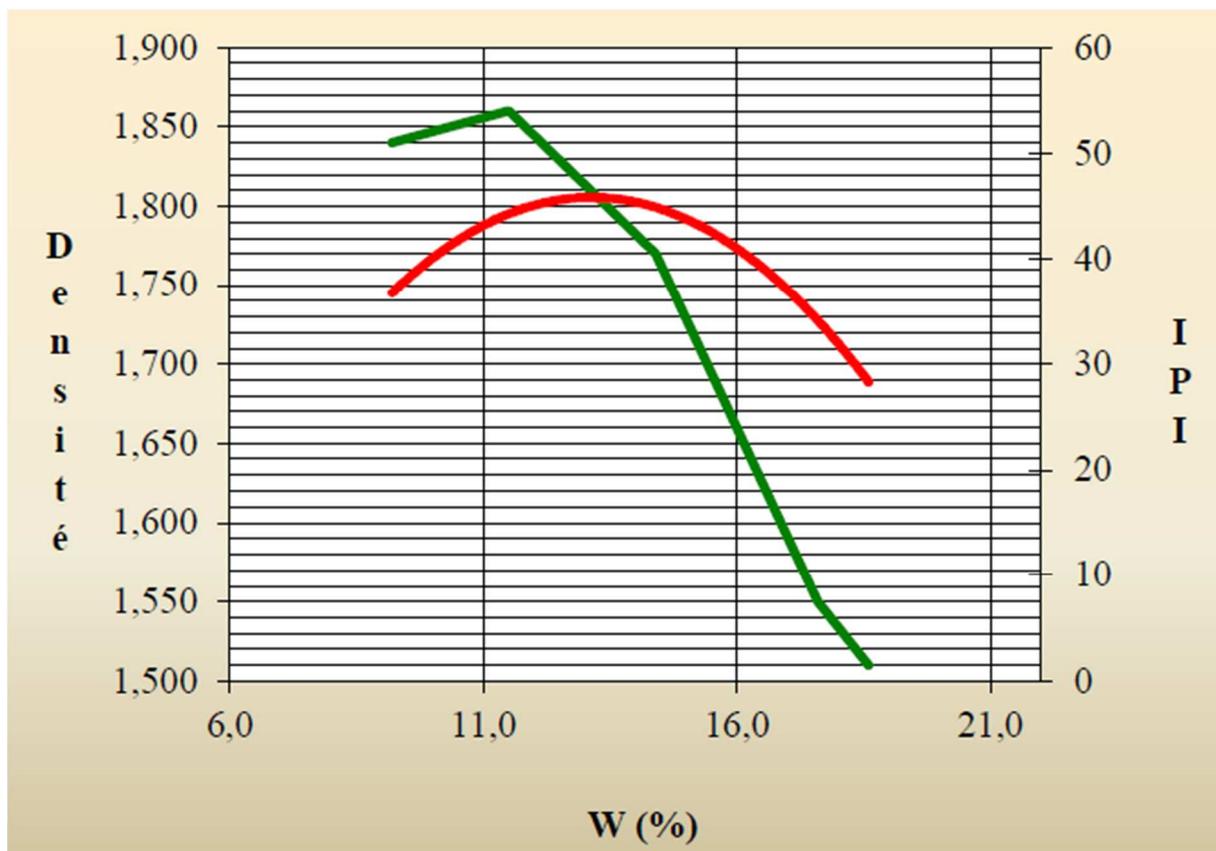


Figure 2 : Courbe donnant la relation entre la teneur en eau (W), la densité (en rouge) et l'IPI (en vert) - source : fiche produit STABIBASE - AMR

On constate que la courbe de la densité atteint son maximum pour une certaine valeur de teneur en eau, qui est appelée « optimum Proctor ».

2.5. Résistance mécanique des grains

Au cours de son cycle de vie, les grains constituant le matériau vont subir des sollicitations de natures diverses susceptibles de les altérer et de diminuer la qualité de l'ouvrage.

Plusieurs essais permettent d'évaluer la résistance du matériau à différentes sollicitations.

Le principe des essais décrits ci-dessous est le suivant : une certaine quantité de matériaux, d'une granulométrie de type d/D avec $d \neq 0$, est introduite dans un tambour doté d'ailettes comparable à celui d'une machine à laver, avec un certain nombre de boulets ou de billes calibrés, en présence ou non d'eau, et subit un certain nombre de tours à une fréquence donnée. Les paramètres de l'essai sont adaptés suivant que l'on cherche à obtenir des chocs ou des frottements entre les grains.

L'essai « Los Angeles », décrit par la norme EN 1097-2, mesure la résistance aux chocs et aux frottements. A la suite de cet essai, on mesure la fraction en masse de matériaux suffisamment « cassés » pendant l'expérience pour passer à travers un tamis sensiblement plus fin que le plus petit élément de la prise d'essai. Plus ce chiffre est faible, meilleure est la qualité du matériau.

L'essai « Micro-Deval en Présence d'Eau (MDE) », décrit par la norme EN 1097-1, mesure la résistance à l'usure par frottement réciproque des granulats. On procède ensuite de façon analogue à l'essai « Los Angeles » pour déterminer le niveau d'usure des granulats.

Ces deux essais s'appliquent principalement à des matériaux granuleux, c'est à dire avec une proportion importante d'éléments dont la taille caractéristique est supérieure à 6mm.

Pour évaluer la résistance mécanique des sables, l'essai de friabilité des sables, décrit par la norme NF-P 18-576, est utilisé. Aux paramètres près, il est similaire à l'essai MDE.

2.6. Forme des granulats

La bonne mise en place des granulats, notamment lorsque le matériau est granuleux, dépend également de la forme de ceux-ci : aplatissement, caractère anguleux...

L'aplatissement est mesuré par l'essai décrit par la norme EN 933-3, qui consiste à comparer le passant à travers un tamis à maille carré et un tamis à barres de même ouverture.

Le caractère anguleux ou roulé d'un gravillon est caractérisé par l'essai décrit par la norme EN 933-5, qui consiste à trier manuellement des gravillons pour déterminer la proportion de granulats dont toutes les faces sont cassées (granulats concassés), dont la majorité des faces est cassée (granulats semi-concassés), dont peu de faces sont cassées (granulats semi-roulés), et dont aucune face n'est cassée (granulats roulés).



Figure 3 : granulats roulés et semi-roulés (quelques faces cassées)



Figure 4 : granulats concassés

Pour les sables, la forme des grains est décrite indirectement, en mesurant la vitesse de leur écoulement au travers d'un orifice calibré, selon la méthodologie décrite dans la norme EN 933-6. Les sables roulés s'échappent plus vite que les sables anguleux.

Ces caractéristiques vont permettre d'anticiper la facilité pour les grains à se mettre en place et la cohésion de la structure granulaire.

2.7. Propriétés chimiques

L'activité chimique est susceptible de dégrader les performances d'un ouvrage géotechnique, soit par rupture de la matrice granulaire (le grain se divise), soit par gonflement ou perte de cohésion.

Il est indispensable également de savoir, si l'on souhaite mettre en œuvre un liant avec les granulats, si aucun élément chimique ne viendra perturber à plus ou moins long terme la prise dudit liant.

La principale source de perturbations chimique provient des sulfates (voir chap.10). La mesure de la teneur en sulfate est faite selon le protocole décrit dans la norme EN 1744-1. Il existe trois catégories de matériaux, en fonction de leur teneur en sulfate (fraction massique) :

- SSa : Teneur en sulfates inférieure à 0.2%,
- SSb : Teneur en sulfates inférieure à 0.7%,
- SSc : Teneur en sulfates inférieure à 1.3%.

2.8. Caractérisation des matériaux recyclés

En ce qui concerne les matériaux recyclés, ceux-ci provenant de sources hétérogènes, il est pertinent de savoir de quels constituants ils sont composés. La norme EN 933-11 propose un protocole d'essai, qui permet, sur la base d'un tri visuel, de connaître la proportion des constituants suivants :

- béton, produits à base de béton, mortier, éléments de maçonnerie en béton,
- graves non traitées, pierre naturelle, granulats traités aux liants hydrauliques,

- éléments en terre cuite (c'est-à-dire les briques et les tuiles), éléments de maçonnerie en silicate de calcium, béton cellulaire non flottant,
- matériaux bitumineux,
- verre,
- autres : cohésif (c'est-à-dire l'argile et les sols), métaux (ferreux et non ferreux), bois, plastique et caoutchouc, gypse, plâtre. Ces éléments sont qualifiés d'impuretés.

La proportion des flottants est aussi mesurée.

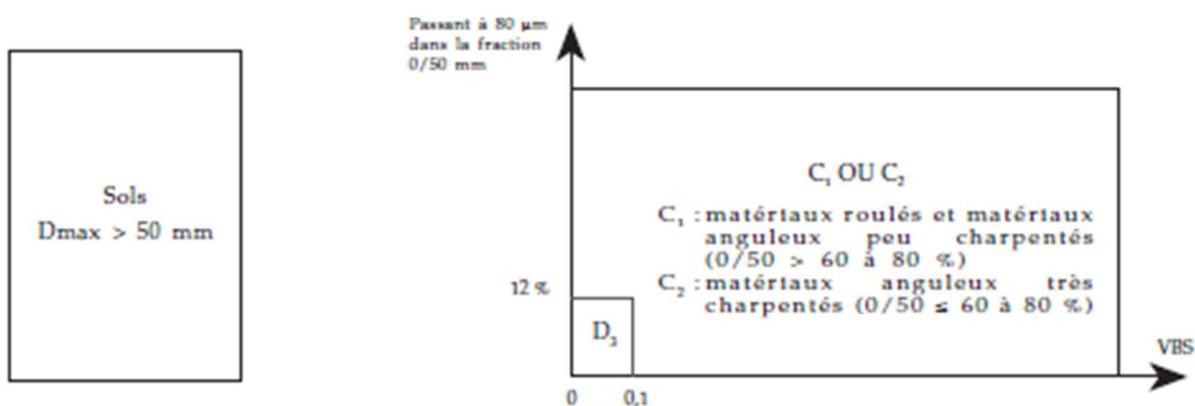
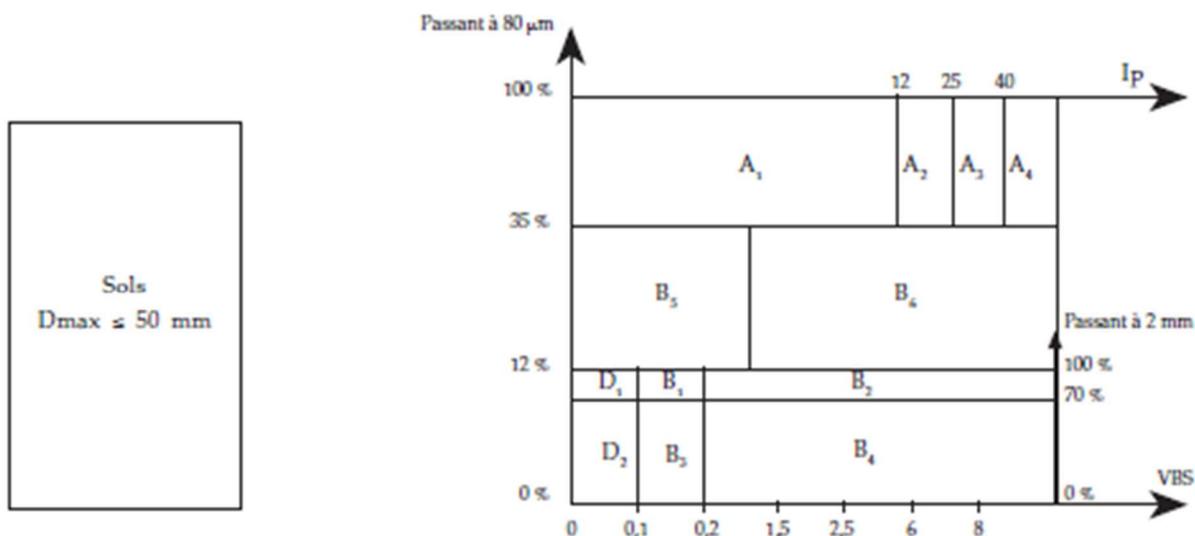
2.9. Autres caractéristiques

La liste de caractéristiques ci-dessus correspond à celles les plus couramment étudiées. Néanmoins, certaines applications particulières nécessitent de connaître le comportement du matériau vis-à-vis d'autres sollicitations telles que le gel (voir chapitre 10), les fortes chaleurs, le soleil... Enfin, les paramètres de couleur (esthétique) ou de masse volumique des grains (emploi sur infrastructure ou manutention difficile) peuvent entrer en ligne de compte dans le choix du produit utilisé.

2.10. Caractérisation synthétique des matériaux

Pour des raisons pratiques, il est pertinent de produire une classification permettant de donner rapidement une bonne idée des caractéristiques d'un matériau. La classification « GTR », reprise par la norme NF P 11-300 est la plus usitée.

Elle est particulièrement adaptée en cas de réemploi direct de matériaux sur le chantier, cas rencontré fréquemment lors des chantiers de terrassement en grande masse.



Matériaux rocheux	Roches sédimentaires	Roches carbonatées	Craies	R ₁
			Calcaires	R ₂
		Roches argileuses	Marnes, argilites, pélites...	R ₃
		Roches siliceuses	Grès, poudingues, brèches...	R ₄
	Roches salines	Sel gemme, gypse	R ₅	
	Roches magmatiques et métamorphiques	Granites, basaltes, andésites, gneiss, schistes métamorphiques et ardoisiers...	R ₆	
Matériaux particuliers	Sols organiques et sous-produits industriels			F

Figure 5 : Classification "GTR" - Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature (CORTE, et al., 2000)

En ce qui concerne les matériaux recyclés, le guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Île-de-France – bétons et produits de démolition recyclés propose la catégorisation suivante :

Référence à la norme	NF P 11-300		XP P 18-540 et NF P 98-129 (GNT A)		
	F 72	F 71			
Catégorie de Grave Recyclée	GR0	GR1	GR2	GR3	GR4
Granularité	Non calibrée	0/D D ≤ 80 mm	0/D D ≤ 31,5 mm	0/D D ≤ 20 mm	0/D D ≤ 20 mm
Dureté	Non spécifiée	LA ≤ 45 MDE ≤ 45	LA ≤ 45 MDE ≤ 45 LA+MDE ≤ 80 soit E	LA ≤ 40 MDE ≤ 35 LA+MDE ≤ 65 soit E+	LA ≤ 35 MDE ≤ 30 LA+MDE ≤ 55 soit D
Propreté	Non spécifiée	VBS ⁽¹⁾ ≤ 0,2	(ES ≥ 50 ou MB ⁽²⁾ ≤ 2,5) soit b	(ES ≥ 50 ou MB ⁽²⁾ ≤ 2,5) soit b	(ES ≥ 50 ou MB ⁽²⁾ ≤ 2,5) soit b
Sulfates	Selon utilisation	SS b (≤ 0,7 %)			

Figure 6 : catégorisation des graves de recyclage par le guide technique régional IDF (DESTOMBES, et al., 2003)

3. Transformation des matériaux

3.1. Cycle des matériaux

Le diagramme ci-dessous représente de façon schématique le parcours des matériaux utilisés dans la construction. Ce mémoire s'intéresse tout particulièrement au chantier et aux étapes en rouge de cette représentation. On note que tous les points de passage - formes rectangulaires - du schéma ont au moins une entrée et une sortie, à l'exception des installations de stockage. Ce qui signifie que ces dernières ne participent pas, même partiellement, à l'équilibrage des ressources.

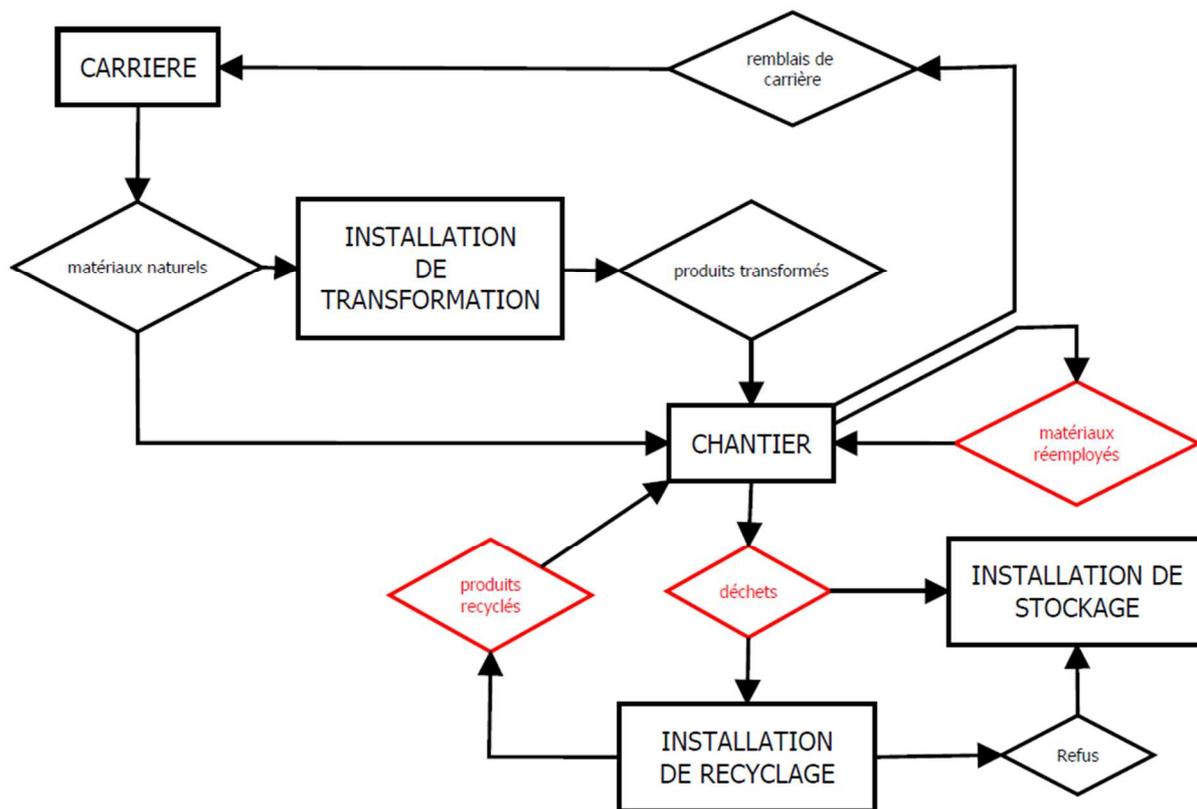


Figure 7 : diagramme simplifié du cycle des matériaux

3.2. Procédés de transformation

3.2.1. Terres

Ce procédé est défini, entre autres sources, par le guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Île-de-France – Valorisation des excédents de déblais de travaux publics (CIMPELLI, et al., 2003).

Ces matériaux sont commercialisés sous des dénominations commerciales telles que « URBASOL » (Yprema), « REGESOL » (DLB) ou « Grave HQE » (RFM). Ils proviennent des couches superficielles du sol (limons des plateaux, sables argileux...) et sont généralement extraits lors de chantiers de voirie et réseaux divers ou lors de la réalisation de plateformes de bâtiments. Leur préparation se fait le plus souvent en installation industrielle, par tri (élimination des substances indésirables), scalpage (élimination des gros éléments, recyclés par ailleurs), criblage-émottage ou malaxage avec un réactif approprié (chaux ou liant hydraulique routier).

La granulométrie typique de ce genre de matériaux est 0/31,5, et ils relèvent généralement de la catégorie B5 au sens de la NF P 11-300. Ils

sont d'un emploi courant en remblai de tranchée (réseaux secs ou d'assainissement), en remblai contre ouvrage ou en remblais généraux.

3.2.2. Bétons de démolition et matériaux assimilés

Le guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Île de France – Les bétons et produits de démolition recyclés (DESTOMBES, et al., 2003) donne une définition de ce type de produit, ainsi que leurs caractéristiques de fabrication et d'emploi.

Ils proviennent pour l'essentiel de la déconstruction des bâtiments et des ouvrages d'art, ainsi que des chaussées. Composés de béton pour l'essentiel, ils peuvent également contenir de la terre cuite (briques et tuiles), des granulats naturels et des agrégats d'enrobés.

Après la sélection des matériaux entrants, ils sont préparés par concassage et criblage en installations fixes ou sur chantier (concasseurs ou cribles mobiles ou godets spécialisés portés par une pelle mécanique). En installation fixe, un lavage des matériaux peut aussi être envisagé. Une adjonction de liants hydrauliques, ou de mousse de bitume est également possible (GAUVAIN, 2006).

Cette gamme de matériaux comprend des sables, des gravillons, des cailloux et des graves. Elle est utilisable en terrassement (remblais), remblais de tranchée, et assise de chaussée.

3.2.3. Agrégats d'enrobés

Les agrégats d'enrobés sont des matériaux riches en liant bitumineux, provenant des déconstructions de chaussées existantes (fraisage ou décrouitage) et des résidus de production des centrales d'enrobés (fonds de bennes et « blancs » de production).

Ils ont vocation à être réemployés en centrale d'enrobage en vue de produire de nouveaux enrobés. Leur préparation se limite à un éventuel concassage afin d'obtenir une granulométrie apparente de 0/14 au plus.

3.3. **Conception des installations de recyclage**

Qu'il s'agisse d'installations à caractère permanent ou provisoire (installés sur ou à proximité d'un chantier donné), les plateformes de

recyclage sont conçues pour valoriser de façon optimale une ressource constituée de déchets. Quelques paramètres sont à prendre en compte :

- les ressources à traiter (disponibilité, nature, pureté),
- les exutoires de la production et des matériaux non valorisables,
- la zone de chalandise,
- l'espace disponible pour le procès,
- la capacité technique et humaine disponible,
- ...

Le guide de conception et de fonctionnement des installations de traitement des déchets du BTP (Syndicat des recycleurs du bâtiment et des travaux publics, 2014) donne un cadre concernant notamment les aspects suivants de ce type d'installations :

- administratifs,
- juridiques,
- sécuritaires,
- sociaux,
- économiques,
- techniques.

Diverses techniques sont mises en œuvre pour traiter les matériaux à recycler, et particulièrement les matériaux routiers. Le schéma ci-dessous donne un exemple des différentes étapes d'un processus de traitement de matériaux recyclés :

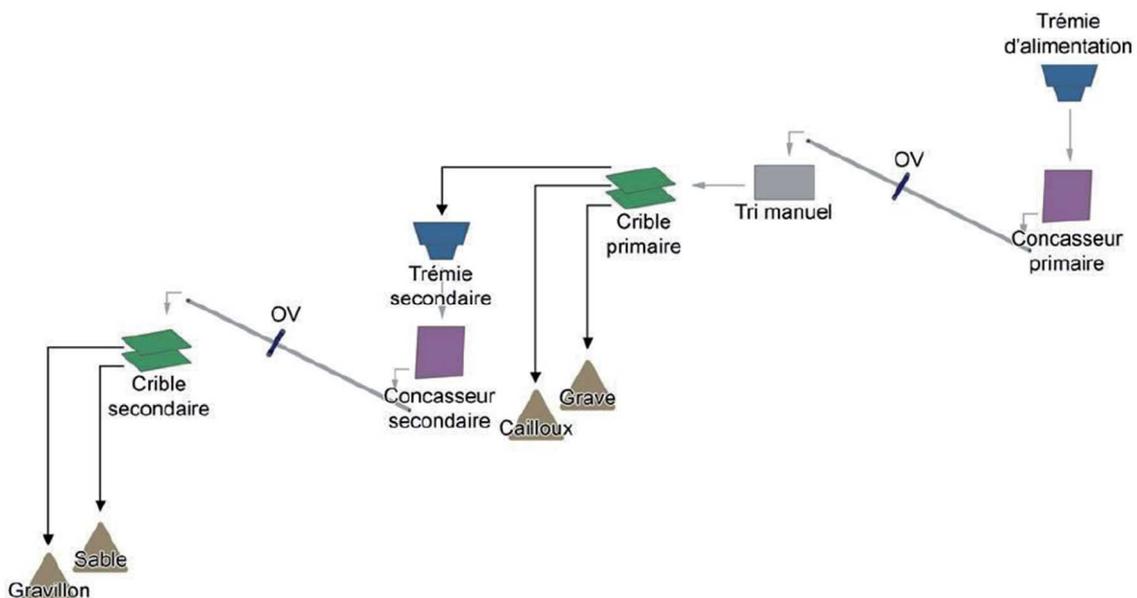


Figure 8 : Schéma de principe de l'installation DLB de Gonesse (Syndicat des recycleurs du bâtiment et des travaux publics, 2014)

La conception de ce genre d'installation répond aux objectifs suivants :

- éliminer les substances indésirables (scalpage, tri manuel, overband – élimination des métaux, lavage),
- corriger la granulométrie du produit (concassage et criblage),
- éventuellement améliorer ses performances (ajout de liants ou correction granulaire).

4. Sites de production

4.1. Carrières

Fin 2012, la France comptait 4 276 carrières actives pour 105 685 carrières au total, y compris celles abandonnées de plus ou moins longue date (COLIN & URVOIS, 2014), ou 3 770 selon une autre source (Ministère de l'Ecologie, du développement durable et de l'Energie, 2017). Parmi les carrières en activité, 82% de la production autorisée (636 Mt sur 768 Mt) concerne les granulats.

La surface en dérangement des carrières françaises est de 116 600 ha (COLIN & URVOIS, 2014), soit une moyenne de 29 ha par carrière.

Parmi les carrières en activité en 2014, 2 663 se consacrent aux matériaux de construction, les autres produisant des roches ornementales et des minéraux industriels (UNICEM, 2015). Elles ont produit 302,3 Mt de matériaux en 2014 (UNICEM, 2015), soit une production moyenne de 113 500 t/an et par carrière. Un ratio permet d'estimer la productivité des carrières françaises à 3 910 t/an/ha.

L'Île de France abrite 88 carrières occupant environ 1 114 ha (surface « en dérangement¹ »), soit 0.09% de sa surface (DRIEE, 2016), ou 94 selon une autre source (Ministère de l'Ecologie, du développement durable et de l'Energie, 2017), soit une moyenne de 12,6 ha par carrière. Parmi celles-ci, 67 produisent des granulats utilisés dans l'industrie de la construction. La

¹ Les surfaces en dérangement des carrières sont les surfaces exploitées ou en cours de réhabilitation à un instant T. Les surfaces autorisées, qui incluent les surfaces en dérangement, sont les surfaces pour lesquelles l'administration a autorisé une exploitation, sans que celle-ci ne soit nécessairement en cours.

production de granulats de ces 67 carrières s'est élevée, en 2014, à 9,1 Mt (UNICEM, 2015).

En moyenne, chaque carrière francilienne produit donc 135 000 t de granulats par an et par carrière, et 10 714 t/an/ha. Les carrières franciliennes sont donc plus productives et plus compactes que la moyenne nationale.

On note également que 45% des granulats utilisés en Île-de-France proviennent de l'extérieur de la région, la zone d'approvisionnement couvrant toutes les régions voisines, et également le Nord-Pas-de-Calais, le Poitou-Charentes (anciennes régions) et la Belgique.

4.2. Installations de recyclage

Lors de la rédaction de ce mémoire, l'auteur n'a pas trouvé de base de données recensant, à l'échelle nationale, les installations de recyclage de matériaux de construction. L'Île de France comptait 70 installations fixes en 2010 (Institut d'Aménagement et d'Urbanisme, 2013). Ce chiffre a augmenté depuis : la base des installations classées² fait apparaître de nouvelles installations (Inspection des Installations Classées - MEDDE, 2017).

La production totale française de granulats de recyclage s'est élevée à 23,4 Mt en 2014 (UNICEM, 2015), dont 5,1 Mt en Ile de France (UNICEM, 2015). On postule, à défaut d'autres informations, que cette dernière production est répartie sur une centaine d'installations en Île de France, ce qui représente une production moyenne annuelle de 50 000 t par site. En extrapolant ce chiffre à la France entière, il vient un parc d'environ 450 sites au total.

4.3. Installations de stockage de déchets

Ce type d'infrastructure doit faire l'objet d'un enregistrement au titre de la rubrique 2760 de la nomenclature des installations classées. Celle-ci

² La base des installations classées ne fait apparaître que les installations autorisées ou enregistrées. Les installations de petite taille (surface inférieure à 1ha et puissance installée du process inférieure à 200kW), soumises uniquement à déclaration, ne sont pas inventoriées, à moins qu'elles ne soient intégrées à une installation autorisée ou enregistrée à un autre titre, telle qu'une centrale d'enrobage ou de béton, une carrière ou une ISDI.

recense 974 installations de stockage de déchets inertes en France, actives ou en construction (Inspection des installations classées, 2017), dont 20 en Île-de-France :

Tableau I : Liste des ISDI actives en Île-de-France

Nom Etablissement	Code postal	Commune
ECT (ISDI - 2)	77410	ANNET SUR MARNE
LA BUTTE D'ORGEMONT	95100	ARGENTEUIL
ISDI AECD (ex FILLOUX)	95270	BELLOY EN FRANCE
M. DUBRAY	95650	BOISSY L AILLERIE
ECT (ISDI)	77170	BRIE COMTE ROBERT
MAIRIE DE BROUY	91150	BROUY
ECT (ISDI)	77380	COMBS LA VILLE
COSSON (ISDI)	77124	CREGY LES MEAUX
ENVIRO CONSEIL TRAVAUX	91470	FORGES LES BAINS
REP VEOLIA (ISDI)	77410	FRESNES SUR MARNE
ECT	95380	LOUVRES
SITA IDF	91460	MARCOUSSIS
CEMEX (ISDI)	77130	MAROLLES SUR SEINE
COSSON (ISDI)	95380	PUISEUX EN FRANCE
SCSL (ISDI)	77460	SOUPPES SUR LOING
PICHETA (ISDI) - PARCELLE c 245	95270	ST MARTIN DU TERTRE
COSSON ISDI	95470	ST WITZ
CARRIERES NEGOCE TRANSPORTS (CNT)	78850	THIVERVAL GRIGNON
ECT (ISDI)	77230	VILLENEUVE SOUS DAMMARTIN
TERRALIA (ISDI)	77410	VILLEVAUDE

On note que la société Enviro Conseil Travaux (ECT) exploite à elle seule 6 de ces installations, et qu'aucune n'est située dans les départements de Paris et de la petite couronne (75, 92, 93 et 94). Le département des Yvelines (78) n'accueille qu'une seule installation de ce type, l'Essonne (91) 3, le Val d'Oise (95) 7. La Seine et Marne (77) en accueille 9 à elle seule, soit près de la moitié d'entre-elles.

Les déchets de chantier sont également accueillis dans des installations de stockage de déchets dangereux ou non, en raison de leur potentiel polluant, ou pour réaliser des pistes ou des recouvrements de casier. Il y a environ 250 ISDND actives en France, et 13 ISDD (Syndicat des recycleurs du bâtiment et des travaux publics, 2014). L'Île de France abrite 11 établissements actifs de ces 2 types (10 ISDND et 1 ISDD) :

Tableau II : liste des ISDND et ISDD actives en Île-de-France

Nom Etablissement	Code postal	Commune
VAL'HORIZON (ex JFF)	95570	ATTAINVILLE
REP	77410	FRESNES SUR MARNE
EMTA Guitrancourt	78440	GUITRANCOURT
CAPOULADE (Décharge d'Isles-les-Meldeuse)	77440	ISLES LES MELDEUSES
REP	95720	LE PLESSIS GASSOT
REP (Décharge de Monthyon)	77122	MONTHYON
SITA Ile-de-France	77111	SOIGNOLLES EN BRIE
PICHETA	95270	ST MARTIN DU TERTRE
COSSON SARL	95470	ST WITZ
SEMAVERT	91810	VERT LE GRAND
SITA FD ex FRANCE DECHETS (décharge cl1)	77270	VILLEPARISIS

Les remarques sur la répartition des ISDI sont également valables pour ces établissements.

4.4. Localisation des sites de production.

En Île-de-France, il apparaît que les installations de recyclage sont plus proches des centres de consommation que les carrières.

4.4.1. *Etat des lieux*

La carte ci-dessous montre les gisements franciliens (zones colorées) et les carrières (points de couleurs). Les gisements des matériaux les plus recherchés, à savoir les sables alluvionnaires (en jaune), les argiles (en vert, utilisées dans l'industrie) et le gypse (en rose pâle, utilisé pour fabriquer du plâtre) sont exploités de façon assez systématique. Les sablons et les calcaires (différentes teintes de marron), d'usage moins noble, le sont moins.

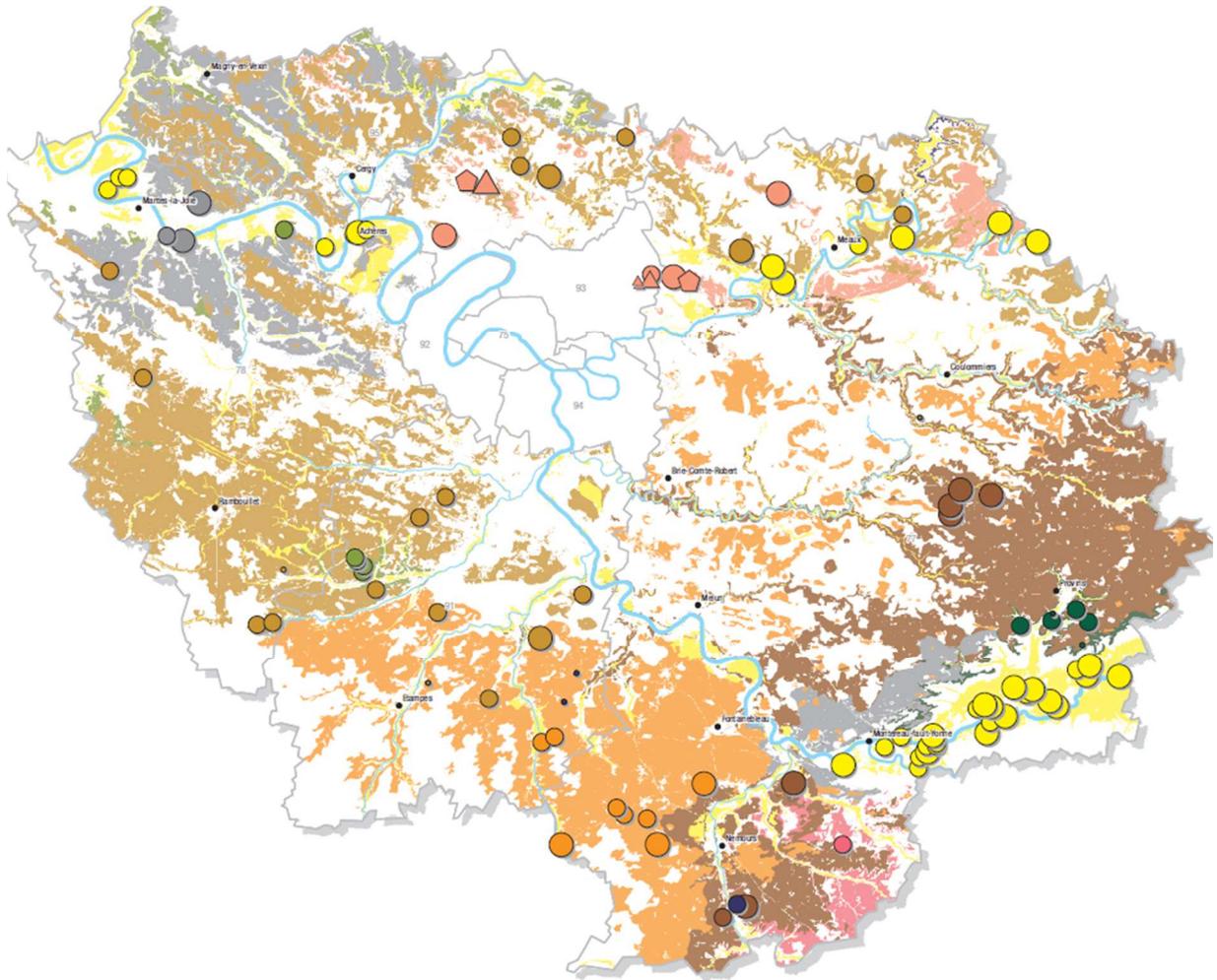


Figure 9 : carte des carrières en Ile de France (source IAU, 2013) – Les points représentent des carrières, tandis que les aplats de couleurs représentent les gisements de matériaux.

La carte des installations de recyclages (associées ou non à une autre activité), ci-dessous, montre une grande densité d'installations dans les départements de la première couronne francilienne (92, 93 et 94), dans la zone la plus active en matière de construction et où la possibilité d'implantation de carrières ou d'installations de stockage est quasi nulle.

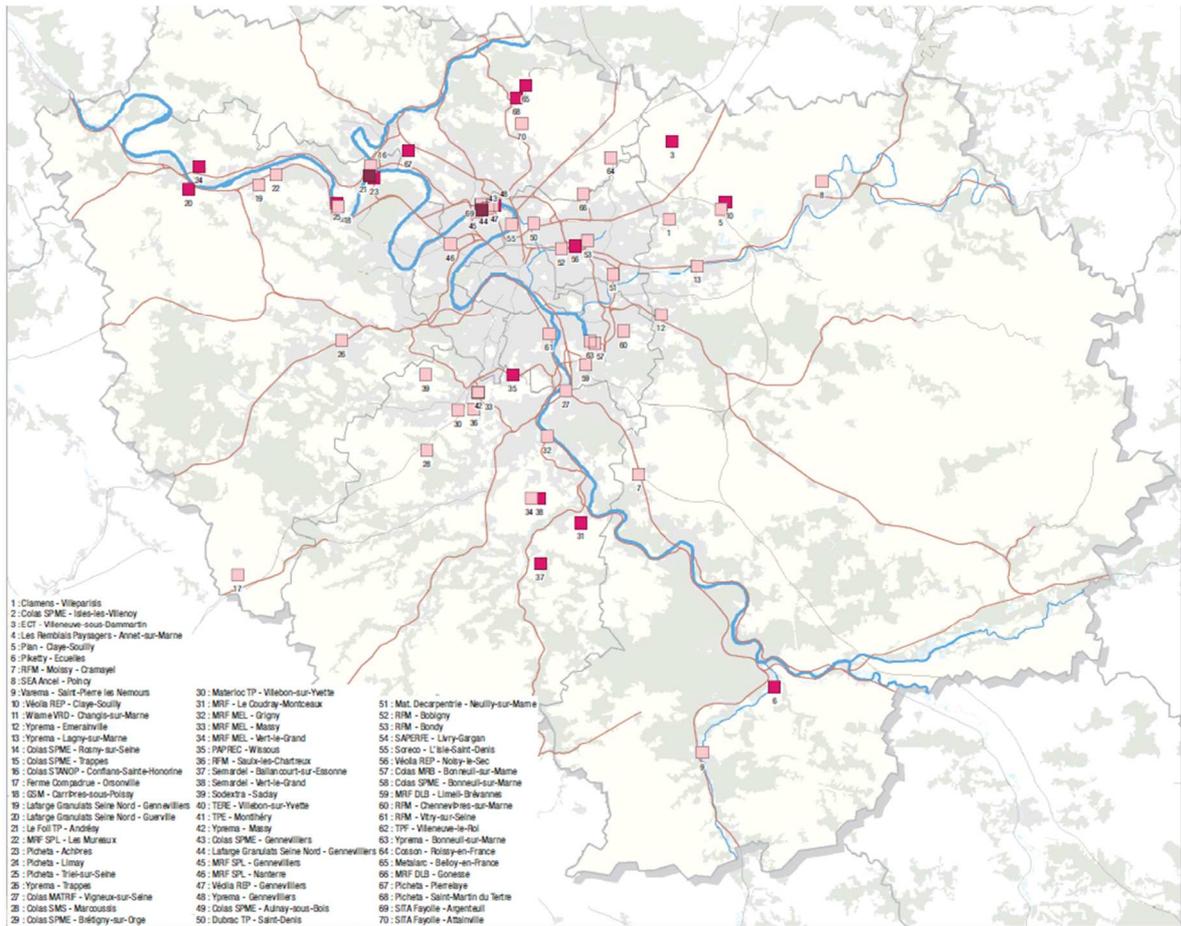


Figure 10 : Carte des installations de recyclage en Ile-de-France (source IAU, 2013)

Sur les deux cartes ci-dessus, et en faisant abstraction des carrières de gypse (transformé en plâtre) hors du champ de la présente étude, on constate une forme de « monopole zonal » : la présence d’une installation de recyclage dans une certaine zone est exclusive à la présence d’une carrière, et réciproquement.

Cette affirmation n’est pas nécessairement valable en dehors de l’Île-de-France : en province, il est courant que les carrières « de proximité » valorisent les déchets de béton qu’elles reçoivent plutôt que de les utiliser comme remblai. Cela se fait par le biais de campagnes ponctuelles : un atelier de concassage/criblage mobile vient sur le site et traite le stock accumulé depuis son dernier passage. Le cadre ICPE auquel sont soumis la plupart des carrières s’y prête sans difficultés particulières et évite les longues et coûteuses études d’impact nécessaire à l’ouverture d’une nouvelle installation classée pour la protection de l’environnement.

4.4.2. Politique et contraintes de localisation

On peut assez facilement conjecturer que les installations de recyclage, indépendantes du contexte géologique, s'installent au plus près des lieux de consommation, tandis que l'implantation des carrières doit faire l'objet d'un compromis entre la qualité géologique du site d'implantation (valeur du produit) et la proximité du lieu de consommation (coût logistique).

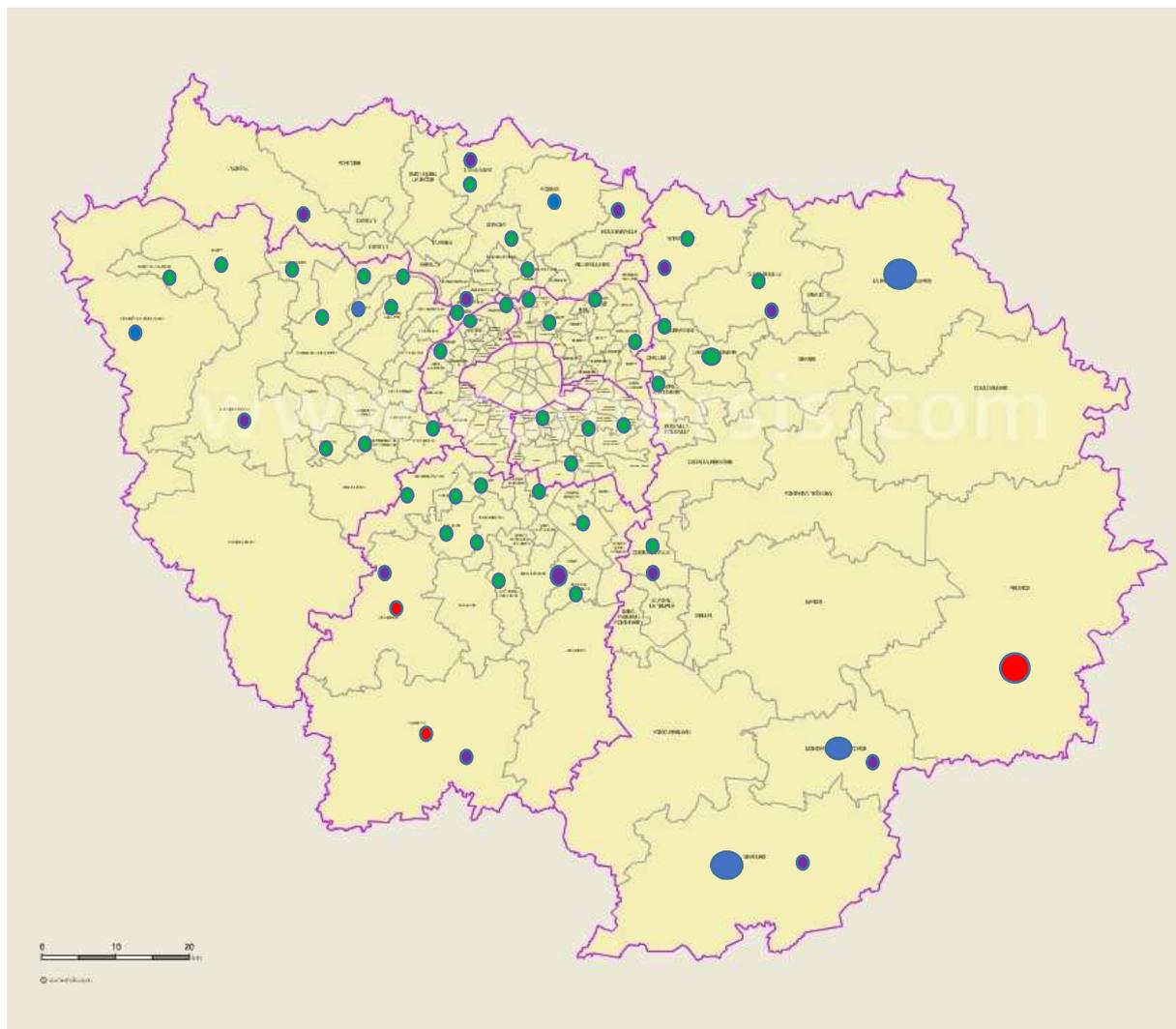
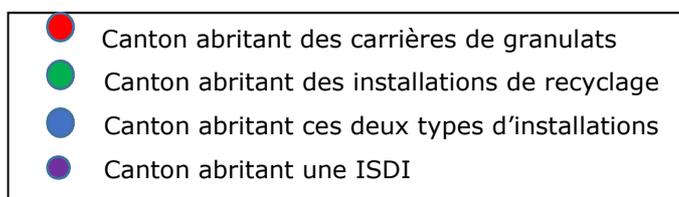


Figure 11 : carte des cantons abritant des installations de recyclage de matériaux et/ou des carrières de granulats ou des ISDI



La carte ci-dessus indique la présence d'installations de recyclage de matériaux, de carrières de granulats ou d'ISDI dans chacun des cantons (découpage de 2015) de l'Île de France. Ce découpage présente l'intérêt de créer une division du territoire assez homogène en nombre d'habitants : la

taille des cantons est inversement proportionnelle à la densité de population.

Sur le plan sociologique, les zones du sud-ouest parisien (axe Paris-Versailles) considérées comme « riches » n'abritent pas d'installations de recyclage, au contraire des zones plus populaires du nord et de l'est parisien (départements de Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne).

On constate que les carrières sont installées dans les cantons les moins densément habités (à l'exception de carrières dans le canton de Poissy, en fin de vie), tandis que les installations de recyclage sont installées dans des cantons de petite surface, donc densément peuplés. En pratique, ces installations sont situées dans des zones industrielles, et idéalement desservies par fer ou voie d'eau.

Il y a seulement 6 cantons où l'on trouve simultanément des installations de recyclage et des carrières. Ils n'abritent au total que 8 installations de recyclage, tandis que le seul canton de Provins (sud-est de la Seine et Marne, plus de 80 km du centre de Paris) abrite plus d'un tiers de la production de granulats naturels francilienne et aucune installation de recyclage en 2010.

En raison de l'épuisement des ressources, cette tendance à l'éloignement des carrières des lieux de consommation va en s'accroissant : la carte ci-dessous montre l'intensité de l'exploitation de certains gisements franciliens, qui entraîne des conflits d'usage avec les exploitants agricoles, ou forestier notamment.



Figure 12 : carte de la Bassée entre Montereau-Fault-Yonne et Bray-sur-Seine. Les étangs sont des carrières en cours d'exploitation ou épuisées (source : Google Maps – la carte couvre une surface d'environ 20km par 12)

L'épuisement des ressources en matériaux naturels nobles se traduit également par une baisse des surfaces de carrière autorisées par des services de l'état, comme l'indique le graphique ci-dessous :

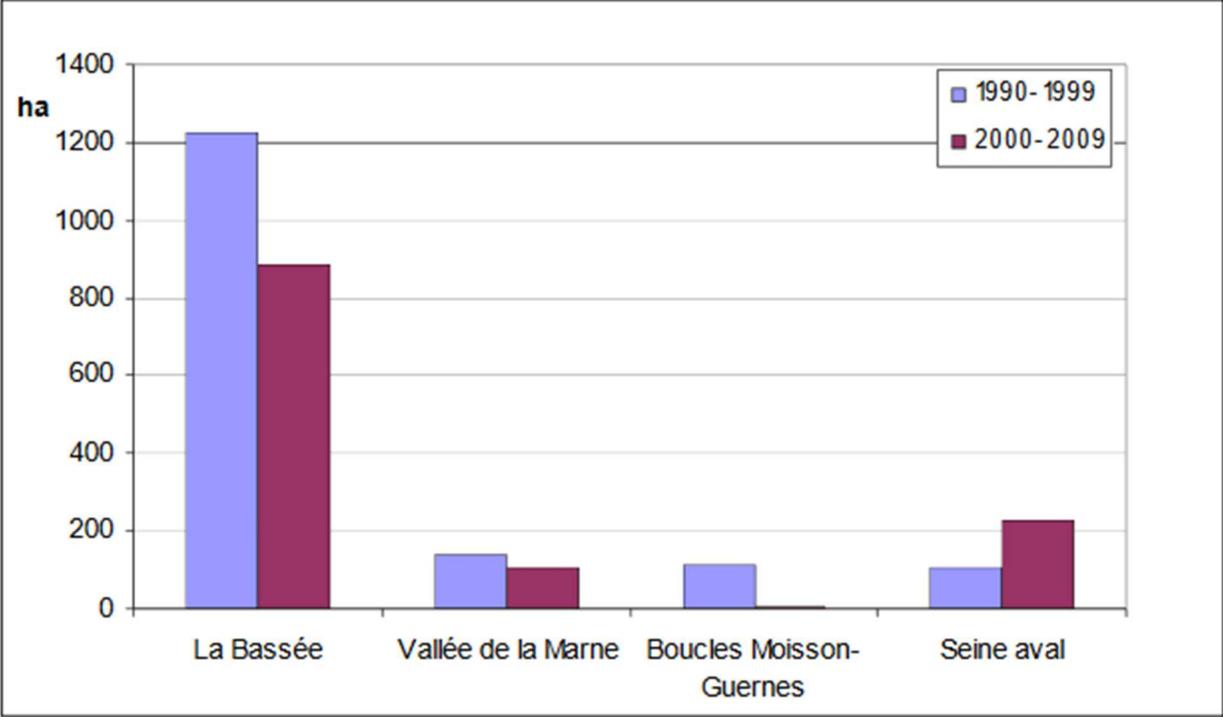


Figure 13 : Surfaces autorisées de carrières de granulats alluvionnaires selon les bassins de gisement (en ha) - source : Drieë/Unicem

On constate par conséquent une tendance à la substitution des matériaux alluvionnaires locaux par des ressources de provenance plus lointaine, dans le cadre d'investissements importants de la part des industriels, tel que le

projet BSV porté par EQIOM (EQIOM, 2015) ou celui de Marolles sur Seine porté par CEMEX (Environnement magazine, 2008). En raison du coût logistique induit par ces solutions, les matériaux ainsi commercialisés sont réservés à des applications nobles (béton, enrobés bitumineux), ce qui augmente le potentiel commercial des matériaux recyclés.

Les implantations des ISDI correspondent à un intermédiaire entre ces deux politiques : elles sont généralement choisies dans les zones rurales immédiatement à proximité de l'agglomération centrale (Brie-Comte-Robert, Claye-Souilly, Villeneuve sous Dammartin...).

5. Statistiques de production

Les statistiques données dans ce chapitre sont issues de données publiques et réputées rigoureuses (syndicats professionnels, INSEE, inspection des installations classées). Néanmoins, un certain nombre d'extrapolations a dû être réalisé. Par conséquent, les chiffres donnés, notamment ceux issus de calculs, sont à considérer avec une certaine incertitude, l'objet de cette partie étant de donner au lecteur un ordre de grandeur des quantités de matériaux en jeu.

5.1. Matériaux entrants sur le chantier

Ce mémoire traite des granulats, il est donc pertinent de consulter à ce propos les statistiques de l'union nationale des producteurs de granulats, complétées par celles publiées par les services de l'état. Celles de 2015 et 2008 sont les suivantes (UNICEM, 2017)(UNICEM, 2015)(Préfecture de Seine et Marne, 2014):

Tableau III : production de granulats comparée entre l'Île-de-France et la France entière

	Roches meubles ³	Roches massives ⁴	Granulats de recyclage ⁵	Total
Production nationale en 2015 (Mt)	117.9	184.4	25.3	327.6

³ Alluvionnaires, granulats marins et autres sables.

⁴ Roches calcaires et éruptives

⁵ Cette catégorie intègre les granulats provenant de démolitions, les mâchefers d'incinération de déchets non dangereux et les coproduits de l'industrie sidérurgique.

%	36.0%	56.3%	7.7%	100%
Chiffre d'affaire en 2015 (M€)				3 415
Production de l'Île-de-France en 2015 (Mt)	6.3	1.6	4.7	12.6
%	50%	12.7%	37.3%	100%
Production de l'Île-de-France (2008)	9.9	1.9	4.3	16.1
Consommation de l'Île-de-France - 2008 (Mt)	Nc	Nc	4.3	33.2
Taux de couverture 2008 (IDF)	Nc	Nc	100%	48.4%

En raison de l'indisponibilité de données plus récentes lors de la rédaction, les chiffres de consommation de matériaux sont ceux de 2008.

Le taux de couverture de 2008 est de l'ordre de 50%, ce qui signifie que seulement 50% des granulats consommés en Île-de-France y sont produits. On peut également constater la forte diminution de la production entre 2008 et 2015 (-21%). L'INSEE indique pourtant que le nombre de logements en cours de construction est passé d'environ 50 000 en 2008 à 70 000 en 2016 (INSEE, 2017). On peut supposer que la consommation de matériaux a également augmenté, ou tout le moins est restée stable : le taux de couverture a donc fortement diminué. En postulant que la consommation de matériaux est restée stable entre 2008 et 2015, on calcule un taux de couverture d'environ 40% en 2015.

Si l'on considère que la production et la consommation francilienne de matériaux recyclés sont égales (pas d'importation ni d'exportation), le taux de couverture en matériaux naturels en 2008 s'établit à 37%. En 2014, et en posant la même hypothèse que précédemment, ce chiffre descend à environ 28%.

Ces statistiques confirment donc que l'Île-de-France est très fortement déficitaire en granulats naturels, et que l'apport des granulats recyclés, s'il

n'est pas négligeable, ne compense pas ce manque. Il tend à s'aggraver en raison de la baisse de la production francilienne de granulats naturels :

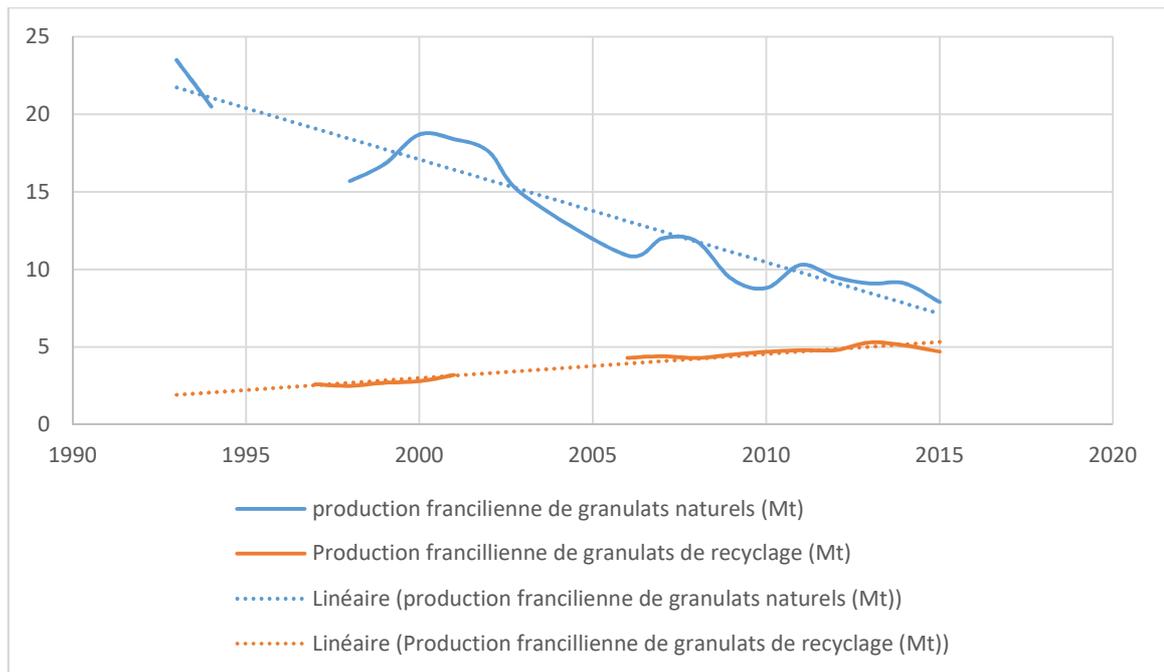


Figure 14 : évolution de la production de granulats en Île de France

On remarque par ailleurs que l'Île-de-France compte en 2015 pour 2.6% de la production française de granulats naturels, mais pour 18.5% de la production de granulats recyclés. On peut conjecturer que, en tonnage, la production de granulats recyclés de l'Île-de-France dépassera sa production de granulats naturels avant 2020.

5.2. Utilisation des matériaux

La littérature fait la distinction entre deux types d'usage des granulats :

- le béton, souvent prêt à l'emploi,
- et la viabilité (route, réseaux et terrassements).

Ce mémoire traitant essentiellement des matériaux routiers, il convient de soustraire aux chiffres ci-dessus la part de béton pour connaître la production et la consommation de granulats entrant dans le champ de cette étude, et ainsi mesurer la part relative des matériaux naturels et de recyclage dans l'industrie routière.

5.2.1. Béton

Le béton étant fabriqué avec, en moyenne 300 kg/m³ de ciment et 2 t/m³ de granulats, il vient les chiffres suivants (Syndicat Français de l'Industrie Cimentière, 2015) :

- consommation de ciment (hors liants géotechniques) : 18,16 Mt,
- production estimée de béton : 60,5 Millions de M³,
- consommation estimée de granulats pour la fabrication du béton : 121 Mt.

Le syndicat national du béton prêt à l'emploi indique quant à lui avoir produit 37,0 millions de M³ et représenter 59.8% de la consommation française de ciment, soit une production totale estimée 61,9 millions de M³, ce qui corrobore le chiffre précédent (Syndicat national du béton prêt à l'emploi, 2015).

On en déduit donc qu'en France, sur 328 Mt de granulats produits (les variations de stocks et l'import/export sont négligés), 121 Mt (37%) sont consacrées à la production de béton et 207 Mt (63%) sont consacrées aux usages de viabilité.

Les producteurs de béton prêt à l'emploi indiquent également que l'Île-de-France a produit, en 2014, 5,19 millions de M³ de BPE, avec un taux de pénétration de 69% (part de la production de BPE sur la production totale de béton), soit une consommation de 7,52 millions de M³ de béton, et 15 Mt de granulats.

Soustrait à une consommation d'environ 33 Mt de granulats, il vient qu'environ 18 Mt (54%) de granulats ont été consommées pour des applications de viabilité en 2014 en Île-de-France.

On voit ici que l'Île de France consomme une proportion plus grande de granulats sous forme de béton plutôt que de produits de viabilité, ce qui s'explique par la densité de construction de la région, qui engendre un moindre besoin de création d'infrastructures et des constructions plus compactes, donc plus consommatrices de béton, tels que des parkings souterrains ou sur plusieurs niveaux.

On note enfin que l'on néglige l'incidence de la consommation de béton sous forme d'éléments préfabriqués (prédalles, parpaings, éléments de voirie et d'assainissement...) puis exportés ou importés entre l'Île-de-France et d'autres régions. A l'échelle nationale, cette industrie a fabriqué 21 Mt de produits en 2013 (Fédération des industriels du béton, 2014), soit une consommation d'environ 16 Mt de granulats (0,5% de la production française et 4% du béton). Le différentiel de 5 Mt regroupe le ciment, les armatures en acier et les accessoires.

5.2.2. Usages routiers/viabilité

En ce qui concerne les enrobés bitumineux, 38,8 Mt ont été produites en France en 2014 (USIRF, 2015). 12,9% de cette masse provient des agrégats d'enrobés (USIRF, 2017), soit 5,01 Mt. Ces agrégats sont en très grande majorité produits et consommés par la même entreprise, aussi, on considère que ces matériaux n'entrent pas dans les chiffres de production de matériaux recyclés indiquée plus haut.

Le solde restant comptant en moyenne 4% de bitume, il vient que les entreprises routières ont consommé sous forme d'enrobés 32,44 Mt de granulats en 2014, soit environ 15,6% du total des matériaux de viabilité et 9,9% du total des granulats consommés en France.

Il vient, par soustraction, qu'environ 175 Mt de granulats sont consommées en France chaque année sous forme traitées ou non aux liants hydrauliques.

Sachant que l'essentiel de la production de granulats recyclés est utilisé sous cette dernière forme, soit 25 Mt, il vient qu'1/7 ou 14% des matériaux « blancs » utilisés en France sont issus du recyclage.

En appliquant, faute d'informations plus précises, les ratios de production d'enrobés français à l'Île-de-France, il vient que 3 Mt de granulats sont consommées par an sous forme d'enrobés, et que 15 Mt le sont sous forme de matériaux « blancs ».

Sachant que l'Île de France a produit et consommé 4,7 Mt de granulats recyclés localement, on calcule que 30% des matériaux « blancs » utilisés

en Île-de-France proviennent du recyclage⁶. Il est néanmoins possible de conjecturer que cette proportion est en réalité plus forte. Les statistiques de l'UNPG ne tiennent en effet pas compte des productions suivantes :

- recyclage sur chantier et réemploi direct ou à proximité,
- installations « clandestines »,
- unités de recyclage internes à l'entreprise (production non commercialisée).

5.3. **Production de déchets**

5.3.1. Evaluation des quantités en jeu

« Selon une évaluation réalisée en 2010 pour le PREDEC, les déchets de chantier représentent 30 Mt par an en Ile-de-France, à comparer aux 5 Mt de déchets ménagers ou au 5 Mt de déchets non dangereux des entreprises. Sur ces 30 Mt, 8 millions sont issues du secteur du bâtiment (dont 65% de déchets inertes), et 22 millions des travaux publics (avec 95% de déchets inertes), une catégorie qui comprend également les excavations liées au secteur du bâtiment. » (Leers, 2016).

La Cellule Economique Régionale de Construction – Île-de-France (CERC-IDF) a réalisé une enquête par sondage sur la production de déchets des entreprises de BTP en 2010 (CERC IDF, 2013). Il en ressort que l'activité de construction (bâtiment et travaux publics) génère un peu plus de 22 Mt de déchets par an sans compter les démolitions, dont 96% d'inertes, et entre 24 et 26 Mt annuelles y compris l'activité des entreprises de démolition. La part des travaux publics sur le total est de 21 Mt.

Enfin, L'ORDIF indique quant à lui une production totale de déchets en Île-de-France de 36,1 Mt (ORDIF, 2016) , dont 17 Mt de terres (47%) et 10 Mt d'autres déchets du BTP (28%). Le BTP génère donc, selon cette source, 27 Mt de déchets chaque année, soit 75% de la masse des déchets produits

⁶ En Île-de-France, la seule production identifiée de granulats recyclés à usage « noble » est commercialisée par la société JOUEN MATERIAUX. Il s'agit de laitiers des 3 aciéries électriques franciliennes, proposés comme granulats pour enduits superficiels ou bétons hautes performances (dureté et résistance élevée) (BARRACHET, F., & MARIN, B. (2015). Valorisation des matériaux alternatifs en techniques routières : Les laitiers sidérurgiques. *Journées COTITA Île-de-France*. Marne-la-Vallée: IFSTTAR.). Cette production représente 145 000 tonnes par an.

chaque année en Île-de-France. Les déchets du BTP sont répartis de la façon suivante :

- 88% d'inertes (23,76 Mt),
- 11% de déchets non dangereux (2,97 Mt),
- 1% de déchets dangereux (0,27 Mt).

L'écart entre les trois études, dont la méthodologie diffère, ne semble pas significatif, notamment en ce qui concerne les travaux publics. On retient donc que la production annuelle de déchets inertes en Ile-de-France est de 23 Mt. Par conséquent, 64% des déchets produits en Ile de France en 2010 entrent dans le champ d'intérêt de ce mémoire.

5.3.2. Répartition par mode de gestion

Selon l'ORDIF, les modes de gestion des déchets inertes sont les suivants (ORDIF, 2016) :

- 0,72 Mt en recyclage inerte (y/c hors BTP),
- 8,5 Mt en réaménagement de carrières,
- 2,38 Mt en ISDI.

Les chiffres ci-dessus semblent erronés : la destination n'est indiquée que pour 11,6 Mt sur 23,76, soit moins de 50% d'entre eux. Le chiffre de 0,72 Mt/an concernant le recyclage des inertes semble notamment largement sous-estimé.

En retenant la production de matériaux de recyclage vue au chapitre précédent, à savoir 4,5 Mt de granulats recyclés par les adhérents de l'UNPG, il vient qu'un peu plus de 15 Mt de déchets inertes ont une destination identifiée, soit 2/3 environ de la production. Le solde, environ 8 Mt, semble correspondre aux différents modes d'élimination ou de recyclage des inertes hors des circuits officiels :

- réemploi sur place ou à proximité,
- décharges sauvages,
- installations de recyclage illégales,
- « arrangements entre gens de bonne compagnie » / création opportune d'ouvrages en remblais,

-

La loi interdit à un maître d'ouvrage de facturer l'apport de matériaux de remblai sur son chantier (sauf construction d'ouvrage routier). Aussi, ces apports ne font pas l'objet d'une comptabilité précise puisqu'ils ne sont pas facturés.

6. Normalisation – contrôle qualité des matériaux routiers

6.1. Loi et normes applicables

6.1.1. Cadre légal national et européen

L'utilisation de matériaux de constructions, éventuellement recyclés, est soumise au respect de différentes lois, dont les suivantes :

- Loi pénale (escroquerie, dol, tromperies diverses, etc.).
- Art 1792 du code civil (Légifrance) : il introduit une présomption de responsabilité du constructeur de l'ouvrage. Cette loi protège le maître d'ouvrage en cas de vice du matériau de construction, fut-il fourni par lui ou recyclé sur place : le constructeur est tenu de s'assurer de la qualité des matériaux qu'il met en œuvre.
- Code de la construction et de l'habitation, art L111-9 (Légifrance, 2015) : l'utilisation de matériaux recyclés, en ce qu'elle permet la réduction des émissions de GES générés par la construction, sera valorisée.
- Code de la construction et de l'habitation, art R111-43 et suivants : la loi prescrit, lors de la démolition de bâtiment d'une certaine taille, d'effectuer un diagnostic permettant d'identifier les matériaux constitutifs (qualité et quantité) du bâtiment à démolir et les possibilités de réemploi sur site ou de recyclage desdits matériaux. La loi incite donc au réemploi et au recyclage suite à démolition, et donne aux techniciens un point de départ pour une démarche de réutilisation des matériaux.

Cette mesure semble peu connue/usitée. En pratique, lorsqu'il est réalisé, ce diagnostic est plutôt orienté vers la gestion des déchets et des matières polluantes (amiante, terre polluée, etc.). Il pourrait aussi représenter un gisement d'économies par une meilleure valorisation des matériaux en place (bâtiments et sols) sur les terrains d'assiette des projets.

- Art L541-1 et suivants du code de l'environnement, Prévention et gestion des déchets – transposition de la directive cadre « déchets » 2008/98/CE : ils établissent la priorité à la prévention et à la réduction des déchets, et donnent des objectifs chiffrés de recyclage et de valorisation des déchets. En ce qui concerne le BTP, l'objectif fixé est d'atteindre, en 2020, un taux de valorisation de déchets sous forme de matière supérieur ou égal à 70% (art L541-1).

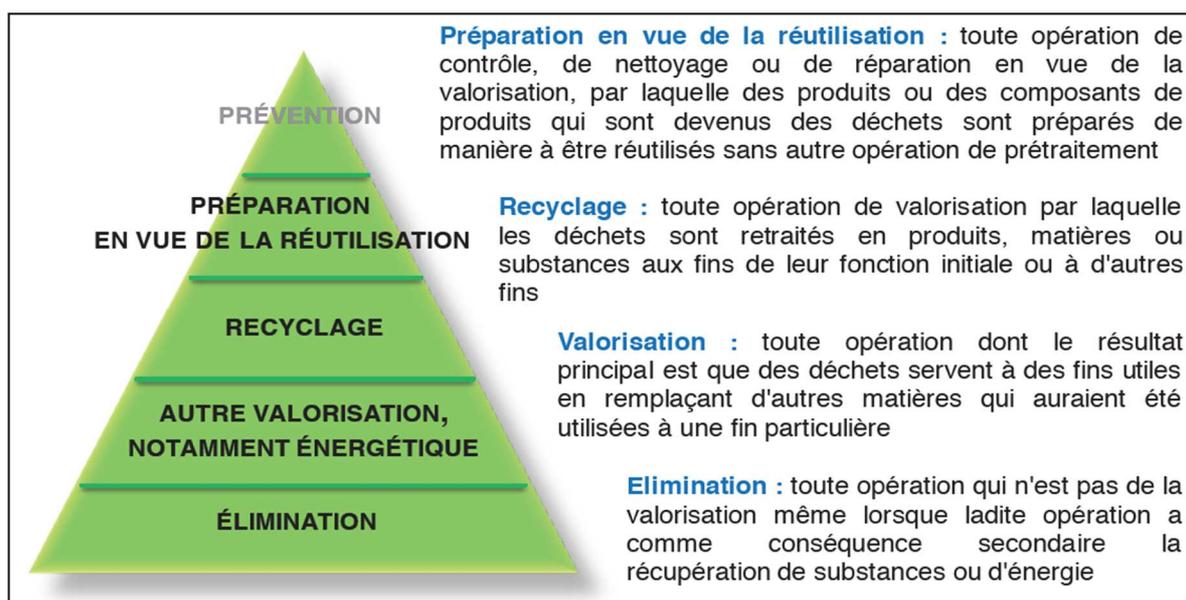


Figure 15 : hiérarchie des modes de gestion des déchets selon le code de l'environnement (art L541-1)

La responsabilité du producteur/détenteur de déchets (le maître d'ouvrage dans le cadre d'un projet de construction) est établie. Cette responsabilité subsiste même si ce déchet est transféré pour traitement ou élimination à un tiers (Art L541-2). Le producteur/détenteur est notamment responsable de caractériser la nature et la dangerosité de son déchet (Art L541-7-1).

La notion de sous-produit est définie ainsi (Art L541-4-2) :

- l'utilisation ultérieure de la substance ou de l'objet est certaine,
- la substance ou l'objet peut être utilisé directement sans traitement supplémentaire autre que les pratiques industrielles courantes,
- la substance ou l'objet est produit en faisant partie intégrante d'un processus de production,
- la substance ou l'objet répond à toutes les prescriptions relatives aux produits, à l'environnement et à la protection de la santé prévues pour l'utilisation ultérieure,
- la substance ou l'objet n'aura pas d'incidences globales nocives pour l'environnement ou la santé humaine.

Le cadre de la « sortie du statut de déchet » est défini de la façon suivante (Art L541-4-3) :

- la substance ou l'objet est couramment utilisé à des fins spécifiques,
- il existe une demande pour une telle substance ou objet ou elle répond à un marché,
- la substance ou l'objet remplit les exigences techniques aux fins spécifiques et respecte la législation et les normes applicables aux produits,
- son utilisation n'aura pas d'effets globaux nocifs pour l'environnement ou la santé humaine.

La loi établit aussi le principe du pollueur payeur : Les producteurs ou détenteurs de déchets ayant causé un dommage à l'environnement peuvent être tenus par la puissance publique de rembourser les dépenses liées à ce dommage (Art L541-6). Elle impose le tri à la source des déchets (Art L541-21-2), et interdit, sauf exceptions, de financer un projet d'aménagement par la mise en remblais de déchets (cas des exhaussements de terrains agricoles ou de certaines créations de golfs), sauf à passer par le statut d'ISDI (Art L541-32). Les distributeurs de matériaux de construction doivent proposer de reprendre les déchets de chantier (Art L541-10-9). La

discrimination d'un produit sur l'unique fondement qu'il est issu de matière recyclée est interdite (Art L541-33).

Les stipulations de l'article L541 du code de l'environnement rendent le maître d'ouvrage responsable des déchets générés par son chantier. La loi incite fortement à réduire la production de déchets, et à recycler ou réemployer ceux qui subsisteraient. En corollaire, l'élimination des déchets (mise en décharge ou incinération sans valorisation énergétique) est défavorisée par la loi.

- Marquage CE : Règlement (UE) **305/2011** du 9 mars 2011 (Parlement Européen, 2011). Il fixe des exigences de performances pour les produits de construction et revêt un caractère obligatoire. Les industriels fabriquant et commercialisant des produits de construction sont obligés de produire une « déclaration de performance » les engageant : « *le fabricant assume la responsabilité de la conformité du produit avec les performances déclarées* ». En retour, ces produits bénéficient d'une présomption d'exactitude de ladite déclaration : « *en l'absence d'indications contraires objectives, les états membres présument que la déclaration de performance est exacte et fiable* ». Le marquage CE n'est pas obligatoire pour les fabrications spéciales ou sur chantier. Les performances des produits sont évaluées selon des normes harmonisées au niveau européen qui, en l'absence d'objection à leur usage, prennent un caractère obligatoire. En l'absence de normes applicable à son produit, le fabricant doit demander une évaluation spécifique de celui-ci. Le marquage CE est demandé par le fabricant du produit à un organisme notifié.

Cette directive donne le cadre dans lequel les normes doivent être élaborées. Elle pose les bases de la démarche qualité du fabricant. Elle s'applique aux produits manufacturés sans distinction d'origine des matériaux constitutifs (« neufs » ou recyclés). La norme applicable pour établir la déclaration de performances au titre du marquage CE, en ce qui concerne les « *granulats pour matériaux traités au liants hydrauliques et matériaux non traités utilisés pour les travaux de génie civil et pour la*

construction des chaussées » est la norme EN 13242+A1 (Commission Européenne, 2011),

- L'article 266 sexies du code des douanes institue la taxe générale sur les activités polluantes. Il s'applique notamment aux installations de stockage de déchets non dangereux (40.16 €/t reçue en 2016 hors exonérations, 150.60 €/t en cas d'installation non autorisée) et aux carrières (0.20 €/t produite). Le recyclage de matériaux, et le dépôt en installations de stockage de déchets inertes ne sont pas soumis à la TGAP.

6.1.2. Règlementation locale

- PREDEC (Conseil régional d'Ile de France, 2015). Le Plan Régional de prévention et de gestion des déchets issus des chantiers du bâtiment et des travaux publics avait pour objectif de fixer un cadre pour une meilleure gestion des déchets de chantiers en Île-de-France, en application de l'article L541 du code de l'environnement. Ce plan, très ambitieux et voté à l'unanimité par le conseil régional en 2015 a été retoqué quelques mois plus tard sur demande du préfet de région, car les restrictions à l'implantation d'ISDI en Seine-et-Marne qu'il prévoyait outrepassaient la position de ce document dans la hiérarchie des normes (Leers, 2016).

- Schéma départemental des carrières. L'article L515-3 du code de l'environnement prévoit, pour chaque département la rédaction du document prévoyant « *les conditions générales d'implantation des carrières dans le département. Il prend en compte l'intérêt économique national, les ressources et les besoins en matériaux du département et des départements voisins, la protection des paysages, des sites et des milieux naturels sensibles, la nécessité d'une gestion équilibrée de l'espace, tout en favorisant une utilisation économe des matières premières. Il fixe les objectifs à atteindre en matière de remise en état et de réaménagement des sites.* » (Légifrance, 2010). Si la loi ne prévoit pas explicitement que ce document doive traiter des matériaux de recyclage, la prise en compte des

ressources et des besoins en matériaux induit un intérêt pour cette production de la part des rédacteurs (Préfecture de Seine et Marne, 2014).

Ce document ayant force réglementaire en ce qui concerne la création de carrières, il vient que la ressource en matériaux recyclés est incluse dans l'évaluation faite par les services de l'état lors de l'instruction d'une demande d'autorisation d'exploiter une carrière. En théorie, on peut imaginer que l'ouverture d'une carrière soit refusée en raison de l'existence d'une ressource alternative, en l'espèce, les matériaux recyclés.

- Schéma directeur de la région Île-de-France : il est prévu par l'article L141-1 du code de l'urbanisme. L'objectif est « *de maîtriser la croissance urbaine et démographique et **l'utilisation de l'espace** tout en garantissant le rayonnement international de cette région. Il précise les moyens à mettre en œuvre pour corriger les disparités spatiales, sociales et économiques de la région, coordonner l'offre de déplacement et **préserver les zones rurales et naturelles** afin d'assurer les conditions d'un développement durable de la région* ». Il vient donc que l'implantation de carrières, de plateformes de recyclage et d'ISDI entre dans son champ d'intérêt. A ce titre, il recense de façon rapide la production et la consommation francilienne de granulats, et donne comme objectif de favoriser les filières alternatives d'approvisionnement en matériaux de construction (recyclage, agromatériaux...) (Conseil Régional d'Île-de-France, 2013).

Si des objectifs sont définis, ce document de portée générale ne fixe pas de contrainte réglementaire en ce qui concerne, par exemple, l'implantation des carrières, installations de recyclage ou ISDI, ni en ce qui concerne l'approvisionnement en matériaux.

- Les SCOT (schémas de cohérence territoriale) et PLU (Plans locaux d'urbanisme) : ces documents, qui s'appliquent à l'échelle locale ou communale, donnent des directives opposables au tiers quant à l'utilisation du sol. En d'autres termes, l'implantation d'une activité d'extraction, de

transformation ou d'élimination de matériaux de construction sur un certain site doit être compatible avec eux.

Par ailleurs, L'article L141-22 du code de l'urbanisme prévoit que « *le document d'orientation et d'objectifs peut définir des secteurs dans lesquels l'ouverture de nouvelles zones à l'urbanisation est subordonnée à l'obligation pour les constructions, travaux, installations et aménagements de respecter des performances environnementales et énergétiques renforcées* ». Le SCOT permet donc à une collectivité territoriale de créer des incitations réglementaires à l'emploi de matériaux performants sur le plan environnemental (recyclés ou réemployés) ou à une meilleure gestion des déchets de construction.

6.1.3. Normes d'application volontaire

L'AFNOR définit de la façon suivante les normes d'application volontaire : « *lancée à l'initiative des acteurs du marché, la norme volontaire est un cadre de référence qui vise à fournir des lignes directrices, des prescriptions techniques ou qualitatives pour des produits, services ou pratiques au service de l'intérêt général. Elle est le fruit d'une co-production consensuelle entre les professionnels et les utilisateurs qui se sont engagés dans son élaboration. Toute organisation peut ou non l'utiliser et s'y référer ; c'est pourquoi la norme est dite volontaire* » (AFNOR, 2017).

Les normes sont usuellement appelées par leur numéro, tel que NF P xxx, EN xxx-x ou encore ISO xxx, selon leur portée française, européenne ou mondiale. Les DTU, très usités dans le bâtiment et les travaux publics, ont également le statut de norme. De nombreux organismes se proposent d'éditer des normes, notamment l'AFNOR et le CSTB en France, ou le CEN au niveau européen.

Si les normes sont conçues pour s'appliquer de façon volontaire, l'obligation de marquage CE entraîne que certaines normes prennent un caractère obligatoire dans l'Union Européenne (voir plus haut).

Sur le plan administratif, les marchés privés sont très souvent soumis aux stipulations du cahier des clauses administratives générales constituant la norme NF P 03-001. Son article 8.2 indique : « *l'entrepreneur est*

responsable de la fourniture des matériaux et de leur mise en œuvre. En conséquence, à moins de prescription contraire des documents particuliers du marché, le maître de l'ouvrage ne peut imposer à l'entrepreneur de s'approvisionner en matériaux et fournitures à des fournisseurs qu'il désigne, ni imposer l'emploi de matériaux et fournitures lui appartenant. Toutefois, les documents particuliers du marché peuvent préciser les matériaux, matériels et équipements à fournir. Dans ce cas, l'entrepreneur doit demander ou requérir en temps utile les instructions nécessaires pour leur commande. En tout cas, l'entrepreneur conserve le droit de refuser l'emploi de matériaux, matériels et équipements fournis par le maître de l'ouvrage, ne présentant pas les conditions de qualité correspondant à leur destination » (AFNOR, 2000). En d'autres termes, quand bien même le maître de l'ouvrage prescrirait à l'entrepreneur d'utiliser un certain type de matériaux (recyclés ou présents sur le site), l'entrepreneur dispose de la faculté de les refuser s'ils lui paraissent impropres à leur usage. Il reste donc seul responsable de la qualité finale de son ouvrage.

6.2. Contrôle qualité

Le contrôle est défini comme la « *détermination de la conformité à des exigences spécifiées* » (ISO, 2015), la qualité comme l'« *aptitude d'un ensemble de caractéristiques intrinsèques d'un objet à satisfaire des exigences* » (ISO, 2015)

En raison du caractère hétérogène des déchets destinés à être recyclés (provenances différentes, histoire de l'ouvrage d'origine inconnue), il est possible d'affirmer que les caractéristiques intrinsèques du matériau peuvent changer de façon conséquente en fonction des différents lots de production. Le contrôle qualité doit donc être adapté à cette contrainte.

Les matériaux industriels, que ce soient des matériaux naturels (issus de carrières), transformés ou recyclés, proviennent souvent d'installations industrielles revendiquant, par exemple, un marquage CE, ou une certification telle que ISO 9001. Il paraît intéressant pour le maître d'œuvre devant se prononcer sur l'acceptation de tels matériaux de lister les informations qu'il peut en tirer.

6.2.1. Contrôle qualité dans le cadre du marquage CE

En ce qui concerne les granulats, les performances prises en compte dans le cadre du marquage CE sont spécifiées dans la norme EN 13242+A1. Elle indique un certain nombre de caractéristiques à renseigner pour les granulats suivant leur nature, avec une marge de tolérance, et la fréquence à laquelle les essais correspondant doivent être réalisés. Les performances sont restituées sous forme de classification indiquant une fourchette ou une performance minimale atteinte par le produit. Par exemple, la classe LA₄₀ indique que le produit doit présenter un résultat inférieur ou égal à 40 au test de Los Angeles (EN 1097-2).

L'obtention du marquage CE n'est pas soumise à l'obtention de certains minima, mais seulement au respect du niveau de performance déclaré du produit (qui peut être nul ou très faible).

L'exemple ci-dessous montre que les informations délivrées sont assez différentes de celles contenues dans une fiche produit (absence de courbe granulométrique ou d'essai PROCTOR par exemple). Si ce type de document constitue un engagement important du producteur, il est aussi plus délicat à utiliser en pratique. En ce qui concerne le maître d'œuvre, il est donc à regarder en complément de la fiche produit du matériau.

Référence interne du granulat : AA			
Etiquette d'information Marquage CE			
DLB 10, carrefour Charles de Gaulles 94380 Bonneuil sur Marne			
Site : DLB rue Albert Garry Prolongée 94450 Limeil Brevannes			
Grave de recyclage 0/20			
Numéro d'identification de l'organisme notifié : 0333			
Numéro du certificat : 0333-CPD-041044			
Année d'apposition du marquage : 18/02/2005			
Norme NF EN 13 242 Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités utilisés pour les travaux de génie civil			
Caractéristique	Type de donnée	Donnée	Unité
Type/Composition chimique	Désignation	Béton concassé	
Classe granulale	Désignation	0/20	
Granularité: caractéristiques générales	Catégorie	G_A 85	
Granularité: spécifications supplémentaires	Catégorie	GT_A 25	
Forme des gravillons: coefficient aplatissement	Catégorie	F₁₅	
Forme des gravillons: indice de forme	Catégorie	APD	
% de grains semi-concassés et roulés dans les gravillons	Catégorie	APD	
Teneur en fines	Catégorie	f₁₅	
Qualité des fines	Catégorie	APD	
Résistance à la fragmentation: LA	Catégorie	LA₄₀	
Résistance à la fragmentation: résistance aux chocs	Catégorie	APD	
Résistance à l'usure: MDE	Catégorie	MDE₃₅	
Masse volumique réelle	Valeur déclarée	2,55	Mg/m ³
Absorption d'eau	Valeur déclarée	APD	
Sulfates solubles dans l'acide *	Catégorie	APD	
Soufre total **	Catégorie	APD	%
Constituants réduisant la vitesse de prise et de durcissement de s mélanges traités aux liants hydrauliques *		APD	
Impuretés	Valeur déclarée	< ou = à 0,2	%
Basalte "Coup de soleil"	Catégorie	APD	
Valeur d'absorption d'eau comme essai crible de résistance à l'action du gel-dégel		APD	
Sensibilité au gel/dégel	Catégorie	APD	
Sensibilité au gel/dégel: essai au sulfate de magnésium	Catégorie	APD	
Émission de radioactivité			
Libération de métaux lourds	Valeurs seuil en vigueur sur le lieu d'utilisation: Ces granulats ne contiennent pas de substances dangereuses au sens de la réglementation applicable en France à la date de la rédaction du présent document		
Libération d'hydrocarbures polyaromatiques			
Libération d'autres substances dangereuses			

Version n°2 du 03/05/2006

Figure 16 : exemple d'étiquette d'information Marquage CE (source : DLB) – la mention « APD » signifie « aucune performance déclarée »

En termes de fréquences d'essai, la norme associée au marquage CE prévoit que la granularité d'un matériau, sa teneur en fines et la qualité de celles-ci doivent être vérifiées toutes les semaines, les autres essais étant prescrits pour la plupart de façon semestrielle, annuelle ou biannuelle. Les

essais spécifiques aux granulats recyclés sont prescrits de façon mensuelle : masse volumique réelle, classification, sulfate solubles dans l'eau.

La fréquence des essais requis pour les matériaux recyclés dénote d'une attention particulière à leur endroit, le principe général étant de définir un « socle » d'essais applicables quelles que soient la nature et la provenance du matériau, et d'y adjoindre des essais complémentaires en cas de spécificité (nature : gravillons, ou provenance : recyclage, laitiers).

En ce qui concerne les enrobés bitumineux, les agrégats ne sont pas soumis directement au marquage CE, à la différence des granulats. Les enrobés bitumineux en sortie de centrale sont soumis quant à eux au marquage CE, ce qui induit des spécifications sur la qualité des agrégats entrant éventuellement dans leur composition. (Commission Européenne, 2011). En d'autres termes, la norme EN 13108-8 relative aux agrégats d'enrobés bitumineux n'est pas d'application obligatoire, à la différence des normes EN 13043 relative aux granulats pour mélanges hydrocarbonés et EN 13108-1 relative aux enrobés bitumineux.

Il convient de noter que le marquage CE bénéficie d'une force probante importante. Par conséquent, un marquage irrégulier est passible, au titre de l'article L441-1 du code de la consommation (tromperie sur la marchandise) de lourdes sanctions, jusqu'à 750 000€ d'amende et/ou 7 ans d'emprisonnement (cas d'une commission en bande organisée), voire 10% du chiffre d'affaire annuel moyen sur les trois dernières années de l'entreprise ayant commis ce délit.

En substance, le marquage CE n'est pas à regarder comme une attestation de performance en soi, mais comme l'engagement que la performance réelle du produit correspond à celle indiquée par le fabricant.

6.2.2. ISO 9001

Si le marquage CE concerne les produits, la certification ISO 9001 concerne les organisations. Elle n'est pas spécifique à la production de

matériaux ou même à l'industrie de la construction, mais peut s'appliquer à tout type d'organisation, à but lucratif ou non, de droit privé ou public.

L'introduction de la norme décrit les avantages recherchés lors de la mise en place de cette certification (ISO, 2015) :

- *« aptitude à fournir en permanence des produits et des services conformes aux exigences du client et aux exigences légales et réglementaires applicables,*
- *plus grandes opportunités d'amélioration de la satisfaction du client,*
- *prise en compte des risques et des opportunités associés au contexte et aux objectifs de l'organisme,*
- *aptitude à démontrer la conformité aux exigences spécifiées du système de management de la qualité ».*

Si la certification ISO 9001 ne donne aucune indication concernant directement le thème de ce mémoire, cette démarche constitue un indice pour le maître d'œuvre de l'intention du fabricant de matériaux de fournir un produit qui satisfera aux exigences du marché de travaux dans le cadre duquel il est employé. Une très grande majorité des producteurs étant certifiée ISO 9001, elle peut également être vue, en négatif, comme un moyen d'identifier un fournisseur douteux en raison de l'absence de cette certification.

6.2.3. Gestion de la qualité à l'intérieur d'une plateforme de recyclage

Les matériaux recyclés trouvant leur origine dans des ouvrages faits de la main de l'homme, on peut postuler qu'ils ont eu, à un moment donné de leur vie, une qualité suffisante pour assurer un certain niveau de service, puisqu'ils ont été choisis et, à priori, contrôlés par des constructeurs.

Les usages routiers étant considérés comme peu exigeants par rapport aux usages du bâtiment et des ouvrages d'art, on peut également postuler que des matériaux provenant soit d'ouvrages routiers, soit d'ouvrages en béton sont aptes à un usage en viabilité. On peut même ajouter que la raréfaction récente des matériaux de carrière dits « nobles » a pour réciproque que les ouvrages anciens, qui sont à la source des matériaux de

recyclage, sont très potentiellement faits de ces matériaux plus qualitatifs que ceux employés couramment aujourd'hui. On trouve par exemple la trace de voiries réalisées en grave alluvionnaire, matériau aujourd'hui employé exclusivement pour la production de béton hydraulique (A2C Matériaux, 2007)⁷.

En d'autres termes, il y a lieu de penser que les matériaux anciens constituent un gisement de matériaux dotés de caractéristiques pertinentes pour les usages considérés dans le cadre de ce mémoire.

Néanmoins, l'expérience montre que ces matériaux aux bonnes qualités intrinsèques sont mélangés, lors des opérations de construction et durant la vie des ouvrages, à d'autres produits dont l'influence est néfaste à la bonne qualité d'un potentiel matériau recyclé : plâtre, plastiques, argiles, bois...

L'enjeu est donc de faire en sorte de séparer le granulats des substances indésirables, qui pourront éventuellement être recyclées par ailleurs. Deux moyens, complémentaires, permettent d'y parvenir.

Le premier, de la responsabilité du recycleur, consiste à sortir les indésirables du matériau reçu : les industriels du secteur se sont dotés de procédures et d'outils pour y parvenir : inspection des chargements entrant, tri manuel, déferrisation... Lorsque ce dispositif fonctionne, le matériau en sortie de chaîne de traitement peut être qualifié d'exempt de pollution. Cette affirmation peut être vérifiée grâce, par exemple, au test de caractérisation des matériaux recyclés, défini par la norme EN 933-11 créée pour en quantifier la pollution.

A ce stade, et sous réserve des essais de caractérisation communs aux granulats naturels et recyclés, il est possible pour le producteur de s'engager sur un certain niveau de qualité de production, sanctionné par le marquage CE. Néanmoins, ces procédés de dépollution sont relativement

⁷ Cette perte de qualité intrinsèque récente est fréquemment compensée par une mise en œuvre plus technique telle que l'usage de liants routiers spécialisés, d'ateliers de malaxage et de compactage plus performants, de correction granulaire.

laborieux et coûteux, et le nombre d'étapes est déterminé par le nombre de polluants différents plus que par leur proportion.

Le second moyen, une bonne maîtrise des matériaux entrant, par un meilleur tri sur le chantier, sera donc une manière pour le producteur de réduire ses coûts de production (moins d'étapes de tri) et d'améliorer la qualité de celle-ci. Cette optimisation permet de réduire également le coût d'élimination des refus de tri de la plateforme.

6.2.4. Gestion de la qualité des déconstructions – traçabilité

En préambule, on remarque que les apporteurs de déchets dans les plateformes industrielles de recyclage sont assez souvent les clients des matériaux produits par lesdites plateformes. Ce constat est encore plus vrai dans le cadre de valorisation de matériaux directement sur le chantier. L'intérêt de celui qui apporte des matériaux à une plateforme de recyclage est donc de fournir une base de travail de qualité.

Comme vu ci-dessus, le tri sur plateforme de recyclage, et donc le produit de celle-ci, est d'autant moins coûteux que le matériau entrant est propre. C'est pourquoi il est communément admis que le coût de réception des matériaux entrants soit ajusté en fonction de leur qualité, et justifie que les gestionnaires de plateforme de recyclage se donnent toute latitude pour accepter ou non un chargement.

Aussi, il importe pour l'apporteur de déchet de mettre en place une procédure permettant de garantir, aux yeux de celui qui les reçoit, la conformité des chargements qu'il lui envoie, afin de fluidifier sa chaîne logistique. En effet, un renvoi de chargement se traduit par le divertissement d'un camion des rotations du chantier, voire le refus préventif des camions suivants. En dehors du surcoût d'élimination des déchets, la productivité du chantier risque de s'en trouver amoindrie. Si l'entreprise fait le choix de ne pas prêter attention à la qualité des chargements qu'elle expédie, elle devra donc assumer des coûts de prise en charge de ses déchets plus importants, et prendre le risque de se passer des services de plateformes de recyclage à proximité au profit d'installations moins strictes mais plus lointaines.

Dans le cadre de travaux de construction, si l'entreprise de travaux est l'apporteur de déchet, le producteur est toujours le maître d'ouvrage, et celui-ci, au travers de son contrat de travaux, supporte le coût de valorisation ou d'élimination des déchets produits par son chantier. Le rôle du maître d'œuvre vis-à-vis du maître d'ouvrage est donc de bâtir un marché garantissant la gestion la plus optimisée des déchets produits par le chantier, et de faire exécuter celui-ci dans de bonnes conditions.

A ce titre, il convient de noter qu'un tri sur chantier exige de la place : bennes séparées, stock tampon, atelier de tri, etc. L'organisation du chantier doit donc prendre en compte très en amont ces problématiques si le maître d'ouvrage veut se donner les moyens de grandes ambitions à ce sujet : convention de mise à disposition de parcelles voisines, ordonnancement et calendrier du chantier permettant le bon déroulement des opérations de démolition... La configuration des ouvrages construits dans le terrain peut également être impactée par les problématiques de recyclage : l'accessibilité des zones de stockage depuis la voie publique sera-t-elle assurée ?

La conséquence de cette affirmation est que la politique de gestion des déchets d'un chantier repose pour une grande part dans les mains du maître d'ouvrage, et qu'il est du rôle du maître d'œuvre d'aborder ces éléments suffisamment tôt dans la vie du projet de construction.

6.2.5. Coût du contrôle qualité

Il est bien entendu très délicat, sinon impossible, d'évaluer en dehors d'exemple précis le différentiel de coût lié à l'obtention d'un certain niveau de qualité par rapport à un autre. De même, le coût d'une non-qualité peut varier de 0 € (en l'absence de désordres) au coût de reconstruction total d'un ouvrage défaillant additionné aux pertes d'exploitations associées.

Le contrôle qualité des matériaux reposant essentiellement sur les essais géotechniques listés plus avant, il est toutefois possible de donner un exemple de leur prix, et, en fonction de leur fréquence, de donner leur impact sur le prix du matériau. Ces exemples sont basés sur des devis réels émis par des prestataires spécialisés et obtenus dans le cadre de l'activité

professionnelle de l'auteur de ce mémoire. Ils sont basés sur un échantillon n'ayant pas la prétention d'être représentatifs et devront être retenus uniquement comme ordres de grandeur.

Tableau IV : estimation du coût du marquage CE d'une production de granulats recyclés

ESSAI	PRIX (€ HT)	FREQUENCE SUIVANT EN 13242+A1	COÛT ANNUEL (€ HT)
GTR (granulométrie + argilosité + teneur en eau)	220	1 par semaine	11 440
Proctor	300	1 par mois	3 600
Los Angeles	330	2 par an	660
MDE	330	2 par an	660
Teneur en sulfates	95	1 Par mois	1 140
Caractérisation des matériaux recyclés	500	1 par mois	6 000
Total (€ HT)			23 500

Dans le cas d'une plateforme produisant 5 références de produits et 200 000 tonnes annuelles, le coût des mesures nécessaires à l'obtention du marquage CE (externalisé) serait donc d'environ 120 000 €, soit 0,60 €/t. Toujours en ordre de grandeur, on peut donc considérer que le coût du contrôle qualité est de l'ordre de 5 à 10% du prix de vente des matériaux recyclés.

Ces 120 000 € sont légèrement inférieurs au CA annuel par employé du secteur de l'ingénierie, à savoir 127 000 €/an (Syntec Ingénierie, 2017). Autrement dit, le contrôle qualité de cette plateforme de recyclage devrait occuper un équivalent temps plein de personne qualifiée (technicien de laboratoire) en moyenne.

Il peut s'agir là d'une façon relativement simple d'évaluer la pertinence du contrôle qualité revendiqué par le fabricant de matériaux recyclés : si une entreprise propose des dizaines de produits différents et n'emploie qu'une ou deux personnes dans son laboratoire, il y a lieu de s'interroger

sur la capacité de celles-ci à mener les essais prévus par la réglementation, et donc sur la maîtrise de la qualité par ce producteur.

7. Politique des maîtres d'ouvrage

7.1. Intérêt économique

Dans le cas d'espèce des travaux de VRD, et le BTP de façon plus générale, les productions « principales » de déchets (en volume et en masse) sont la démolition d'un ouvrage ou la réalisation d'un terrassement en déblai, le complément venant des chutes et des excédents de production. Les matériaux issus de ces opérations ont *a priori* le statut de déchet quand le producteur (le maître de l'ouvrage) les transfère à l'extérieur de son chantier : il s'en défait, et paye pour cela (de façon directe : transport et droits de décharge, de façon indirecte : nuisances diverses), ce qui représente une dépense difficile à valoriser.

Parallèlement à cela, le maître d'ouvrage doit supporter le coût des matériaux naturels servant de matière première aux ouvrages qu'il fait édifier.

Il est d'usage dans l'industrie du VRD de dire que le coût d'une construction se répartit en trois parts sensiblement égales : matériels, main d'œuvre et matériaux (y compris élimination des déchets)

Il y a donc lieu d'évaluer comment l'usage de matériaux recyclés ou réemployés peut contribuer à optimiser la dépense du maître d'ouvrage.

7.1.1. Evolution du coût des approvisionnements en granulats depuis 2000

Il est admis que la ressource, particulièrement en Île-de-France, est décroissante et de plus en plus chère. Le graphique suivant présente l'évolution des prix des matériaux naturels (Indice de prix de production de l'industrie française pour le marché français - Prix de base - A21 B - Produits des industries extractives - Base 2010 - FB0AB00000) comparée à l'évolution des prix à la consommation (base 2015, ensemble des ménages – France métropolitaine) (INSEE, 2016).

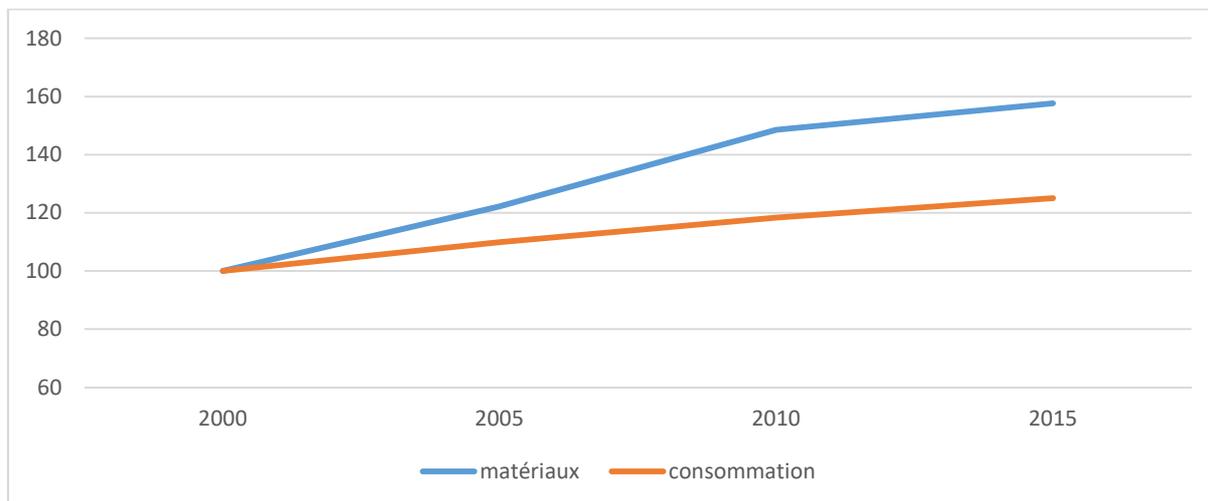


Figure 17 : évolution du coût des matériaux naturels face à l'indice des prix à la consommation (base 100 en 2000)

On constate que ces deux courbes s'écartent au fil du temps, ce qui signifie que le postulat de l'augmentation du coût des matériaux au fil du temps est confirmé.

En ce qui concerne l'activité de la construction, la part du coût des matériaux relative au coût global de la construction (Indice des prix de production de la construction neuve à usage d'habitation - Base 2010) évolue de la façon suivante :

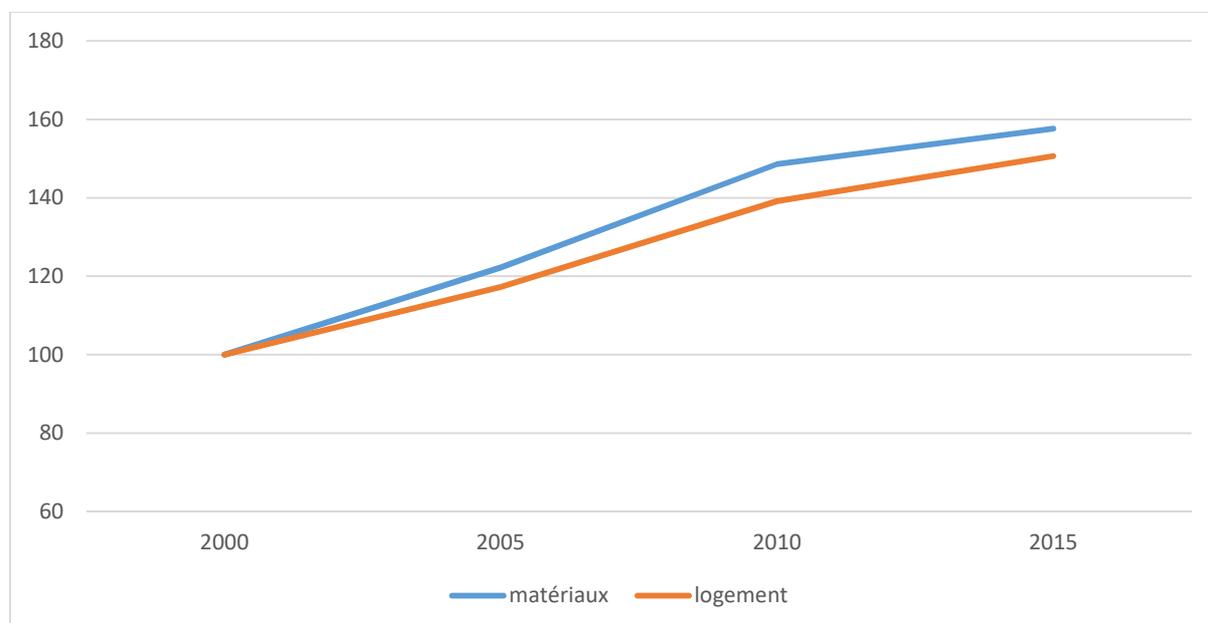


Figure 18 : évolution du coût des matériaux naturels face au coût de la construction neuve à usage d'habitation (base 100 en 2000)

Sans que l'évolution ne soit spectaculaire, on constate que le prix des matériaux augmente plus vite que le prix de construction des logements.

Autrement dit, la part des matériaux naturels dans le coût du logement augmente depuis 2000.

Enfin, le coût de l'extraction de matériaux face au coût de la production industrielle en général (indice de prix de production de l'industrie française pour le marché français - Prix de base - A10 BE - Ensemble de l'industrie - Base 2010 - FB0ABE0000), que l'on peut considérer comme représentatif du coût de recyclage des matériaux, en considérant le coût d'achat du matériau entrant comme nul ou négatif - l'apporteur paye pour déposer son chargement - pour l'industriel, évolue de la façon suivante.

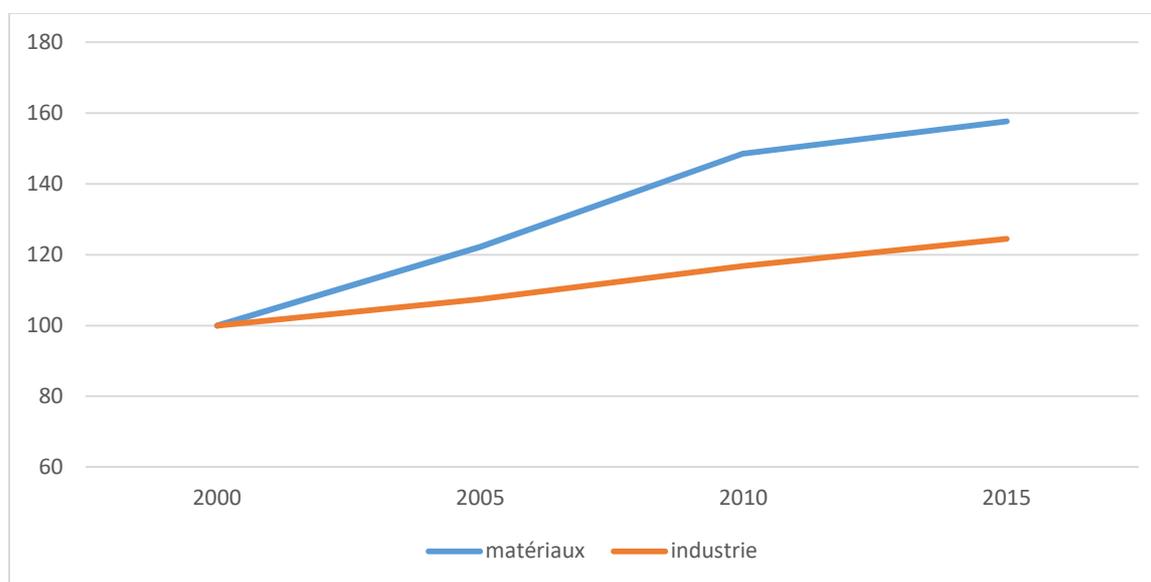


Figure 19 : évolution du coût des matériaux naturels face au coût de la production industrielle (base 100 en 2000)

Ici encore, on constate un écart important entre l'évolution des prix des matériaux naturels, et celle de l'industrie en général.

On en conclut que l'intérêt économique du recyclage a augmenté de façon importante ces 15 dernières années

7.1.2. Coût logistique

Comme indiqué dans les chapitres traitant de la localisation des installations de production, celles pratiquant le recyclage tendent à s'installer au plus proche des lieux de consommation et de production de déchets, tandis que les carrières s'en éloignent de plus en plus. Les installations de stockage de déchets sont également sujettes à un mouvement centrifuge, dû notamment à la rareté du foncier près des

agglomérations, ainsi qu'à un phénomène de rejet des populations avoisinantes (NIMBY).

Les granulats ayant une valeur vénale très faible, l'impact du coût de transport est relativement important sur le prix final. Le Comité National Routier publie de nombreuses statistiques sur le transport de marchandises et les frais qu'il engendre (Comité national Routier, 2017). En ce qui concerne les matériaux de construction, lorsque ceux-ci passent par la route, le transport est fait avec les véhicules les plus productifs, à savoir des ensembles semi-remorques de 40 t, capables de transporter 28 t de charge utile. Ce type de véhicule coûte 118 618,00 € annuels, et développe 80 840 km/an pour 210,9 jours de service. En y ajoutant une marge de 20%, le chiffre d'affaire généré par le transporteur est de 142 341,60 € HT annuels, soit un coût au km de 1.76 € HT/camion pour le client.

Dans le cas d'apport de matériaux de carrière ou en décharge, la moitié du kilométrage se fera à vide, donc, le coût de transport pour le client sera de 3,52 € HT/km pour 28 t, soit 0,125 € HT/km/t. Par exemple, un granulats extrait d'une carrière située à 100 km d'un chantier et vendu à 5,00 € HT/t au départ revient à 17,50 € HT/t sur le chantier, tandis que son concurrent recyclé à 20km du chantier et vendu à 10€ HT/t au départ revient à 12,50 € HT/t livré.

Les carrières et les installations de recyclage ayant également une fonction d'accueil de matériaux extraits des chantiers, le même constat sur le coût logistique peut être fait en ce qui concerne les flux sortant du chantier.

En d'autres termes, la réduction des coûts de fret engendrés par la relative facilité d'installation des plateformes de recyclage par rapport aux carrières peut être mise à profit par l'entrepreneur pour réduire le coût ressenti par le client (coût livré sur le chantier). Cet avantage logistique permet également au producteur de produits recyclés de compenser le coût d'un outil de traitement du matériau performant tel qu'un tri manuel des indésirables, un traitement à la chaux, un stockage couvert, etc.

7.2. **Intérêt technique**

Si l'intérêt économique du recyclage est assez facile à évaluer par le maître d'ouvrage, et son intérêt écologique assez évident, l'intérêt technique du choix des matériaux recyclés n'est que très rarement mis en avant. Au contraire, l'usage est de considérer les matériaux recyclés comme bas de gamme, quel que soit le type considéré (métaux, papier, verre...).

Néanmoins, le vieillissement des matériaux lors de leur première vie et le processus de recyclage peuvent leur conférer des propriétés techniques intéressantes.

7.2.1. Bitumes recyclés :

Les bitumes recyclés ont, au cours de leur première vie, subi un échauffement fort au cours de leur mise en œuvre, ils ont été exposés au gel, aux UV, à des variations parfois brusques de température... Il est donc possible d'imaginer que, toutes choses étant égales par ailleurs, leur comportement ait évolué et, pourquoi pas, leur confère de nouvelles qualités.

En pratique, on constate une plus grande rigidité des enrobés avec un fort taux d'agrégat, et, parfois, une meilleure tenue à l'orniérage – pour peu que les agrégats utilisés soient d'une qualité adaptée (De Visscher, 2012). Mon expérience professionnelle me permet aussi d'affirmer que leurs qualités de rigidité font que les enrobés à fort taux de recyclés sont utilisés préférentiellement dans des applications où une certaine résistance au poinçonnement est recherchée.

On constate également que les produits enrobés les plus performants et/ou sollicités proposés par les industriels du secteur intègrent souvent de fort taux d'agrégats d'enrobés (autoroutes, chaussées aéroportuaires...) (COLAS, 2013), (De Marco, 2013).

7.2.2. Granulats de béton recyclé

Le béton est constitué de granulats de différentes tailles liés entre eux par une matrice résultant d'une prise hydraulique. Il est admis que la cinétique de prise du ciment est relativement lente et complexe, aussi, il est courant qu'une certaine fraction du liant ne soit pas complètement hydratée. Le décohéssionnement du béton, consécutif aux opérations de

démolitions et de concassage conduit à mettre à nu ce liant encore susceptible d'être activé. Différents projets de recherches étudient actuellement la possibilité d'utiliser des fines de béton de démolition en substitution partielle de ciment « neuf » dans la formulation de mortier (Nelfia, Turcry, Amiri, Mahieux, & Amine, 2013).

Dans le contexte de la voirie, on appelle « pralinage » le phénomène de prise hydraulique qui apparaît à moyen terme dans les couches de grave de béton concassé. On constate que des structures en grave de béton recyclé obtiennent, sur le long terme, de meilleures performances que leurs équivalents en matériaux naturels.

A la connaissance de l'auteur, ce phénomène n'a pas encore fait l'objet d'études scientifiques visant à le démontrer. Néanmoins il est cité dans différentes publications (Docks de Limeil Brevalles)(DETRY).

7.3. Intérêt écologique – certification

7.3.1. *Principes de la certification*

Si l'usage de matériaux recyclés, et plus généralement la mise en place de processus de recyclage/réemploi de matériaux, présente un intérêt environnemental assez évident, les maîtres d'ouvrages peuvent être demandeurs d'indicateurs objectifs.

La performance environnementale peut être perçue comme une forme de qualité, à savoir « *un produit ou un service de qualité est un produit dont les caractéristiques lui permettent de satisfaire les besoins exprimés ou implicites des consommateurs* » (définition proposée par l'AFNOR). Dans ce contexte, le besoin est de « *préserver les composantes et les fonctions de l'écosystème* ».

On cherche donc à rendre mesurable cette qualité, et à implémenter un système de management qui permette de l'améliorer en continu. Il existe différents procédés, la plupart d'entre eux étant conçus par analogie avec les systèmes de management de la qualité.

7.3.2. Mesure de la qualité environnementale

De nombreux outils de mesure de la qualité environnementale au regard d'une thématique précise ont été développés : émissions de GES, pollution de l'eau, impacts sur les milieux aquatiques, etc.

L'usage de tous les indicateurs adaptés pour un ouvrage particulier va donc générer une masse importante de données, que le maître d'ouvrage, non sachant, ou l'utilisateur/acheteur final, n'est pas sensé savoir interpréter utilement. Par exemple le logiciel SEVE (USIRF, 2017), un moyen d'analyse du cycle de vie, permet de chiffrer l'intérêt de telle ou telle option de construction d'une chaussée à l'aide de plusieurs indicateurs différents :

- consommation énergétique,
- émissions de GES,
- consommation de granulats naturels,
- consommation d'agrégats d'enrobés valorisés,
- consommation de matériaux recyclés,
- consommation de déblais réutilisés sur place,
- gestion de l'eau,
- prise en compte de la biodiversité.

L'usage de ce type d'outil est donc, en raison de sa complexité, du ressort exclusif des acteurs « sachant » de l'acte de construire (bureaux d'études, entreprises...), qui cherchent à mesurer l'effet d'une option technique.

Il y a donc lieu de hiérarchiser et d'agrégier les indicateurs environnementaux en un résultat unique, facilement compréhensible, et facilitant la comparaison avec d'autres projets ou entre les variantes, ce à quoi prétendent les outils de certification.

7.3.3. Conception des référentiels

Ces outils de certifications sont développés par des organismes qui déterminent les critères de jugement (rédaction du référentiel) et attestent de la certification. Ils peuvent servir à réaliser des arbitrages importants concernant le projet, comme par exemple choisir entre risquer un impact sur une zone protégée ou allonger la longueur d'une route et ainsi augmenter les impacts liés aux travaux de construction et à l'utilisation de l'ouvrage.

La construction de ces outils est, le plus souvent (BREEAM, HQE...), la suivante (de façon schématique) :

- une première phase de mise en place d'un système de management et/ou d'évaluation de la performance environnementale.
- Une seconde phase de division de la performance environnementale en thématiques, chacune d'entre-elle étant subdivisée en sous critères, dont le respect permet d'obtenir plus ou moins de points suivant le niveau de performance atteint au regard du critère.
- Puis une comptabilisation des points, rendue possible par la formalisation de la démarche par le maître d'ouvrage. Cette formalisation, similaire au système de management de la qualité, s'appelle, par exemple, « système de management de l'opération » dans la méthodologie HQE.

Un système de niveau minimal obligatoire pour chaque thématique oblige à traiter l'ensemble des thématiques abordées par le référentiel, évitant ainsi d'attribuer un certificat à un projet ne respectant pas la réglementation en vigueur, ou ayant un impact inacceptable sur un aspect précis. L'ensemble des résultats est ensuite agrégé pour calculer la note finale et la mention du projet (passable, bon, très bon, excellent... par exemple dans la méthodologie BREEAM). Ce processus est répété à chacune des grandes étapes de la vie du projet : programmation, projet, livraison, exploitation.

7.3.4. Rôle du maître d'ouvrage

Les rédacteurs des référentiels de certifications insistent très fortement sur le rôle du maître d'ouvrage dans le processus. Cette insistance est une réponse au risque de confusion des rôles entre le maître d'ouvrage et les professionnels dont il s'entoure dans le cadre d'un projet de construction. Il existe en effet, pour le maître d'ouvrage, une tentation de s'en remettre à la décision des professionnels qu'il « paye pour cela », amplifiée par une difficulté pour ces derniers de restituer de façon claire les enjeux du projet auquel ils participent.

En ce qui concerne la certification environnementale, un maître d'ouvrage cherchant uniquement un « affichage commercial » aura tendance à peu investir ce sujet, au risque de constater tardivement une

contradiction entre son objectif en termes de certification et ses autres objectifs, au premier rang desquels la rentabilité économique. Par exemple, un objectif ambitieux en termes de consommation énergétique pour le chauffage d'un bâtiment entraînera des surcoûts d'isolation potentiellement préjudiciables pour l'économie du projet.

Par conséquent, il est nécessaire que le maître d'ouvrage, à l'aide des éléments fournis par les professionnels qu'il a missionné, choisisse lui-même et en connaissance de cause les objectifs et le niveau de performance environnementale de son projet.

8. Les référentiels de certification

Il existe de nombreux systèmes de certification environnementale. Le plus utilisé dans le monde est le BREEAM, tandis que le système HQE est très courant dans un contexte français.

8.1. Certification BREEAM

8.1.1. Présentation de BREEAM

La certification BREEAM a été conçue dans les années 1990 par l'organisme britannique *Building Research Establishment* dans le but d'évaluer la performance environnementale des bâtiments, et est régulièrement mise à jour. C'est, d'après ses promoteurs, la méthodologie d'évaluation la plus usitée dans le monde en 2016.

A la date de rédaction de ce mémoire, les référentiels techniques BREEAM n'ont pas été traduits en français. L'étude a donc été réalisée à partir des référentiels en langue anglaise. Les expressions contenues dans les référentiels étudiés ci-après ont été traduites en français par l'auteur.

8.1.2. BREEAM Communities

Le référentiel BREEAM Communities (BRE, 2016) intéresse des projets urbains de moyenne ou grande envergure : il indique explicitement les critères de taille du projet et renvoie les porteurs de « petits » projets vers le référentiel du bâtiment.

Il comporte 5 grandes thématiques (gouvernance, bien-être social et économique, ressources et énergies, utilisation du sol et écologie, transport et déplacements), divisées en 40 critères et 115 crédits de notations. La

certification du projet se fait en trois étapes, au fur et à mesure de l'avancement de la réalisation. Le tableau suivant présente les critères du référentiel et précise leur lien avec la problématique du recyclage des matériaux :

Tableau V : critères du référentiel "BREEAM Communities"

N°	critère (VO)	traduction	standard minimal	nombre de crédits	pondération du critère	prise en compte du recyclage/réemploi des matériaux dans l'évaluation	commentaires
Step (étape) 1 : Establishing the principle of development - établir les grandes lignes du projet							
GO 01	Consultation plan	planifier la consultation des tiers	oui	1	2,3%	non	
SE 01	Economic impact	Impact économique	oui	2	8,9%	non	
SE 02	Demographic needs and priorities	besoins et priorités démographiques	oui	1	2,7%	non	
SE 03	Flood risk assessment	prise en compte du risque d'inondation	oui	2	1,8%	non	
SE 04	Noise pollution	pollution sonore	oui	3	1,8%	non	
RE 01	Energy Strategy	Stratégie énergétique	oui	11	4,1%	ce critère valorise la réduction des émissions de GES par rapport à un projet moyen	Le recyclage/réemploi de matériaux peut permettre de réduire les émissions de GES du projet
RE 02	Existing building and infrastructure	Bâtiments et infrastructures existants	oui	2	2,7%	Ce critère valorise la réutilisation des bâtiments et infrastructures existantes, et des éventuels matériaux de démolition	
RE 03	Water strategy	Stratégie de gestion de la ressource en eau	oui	1	2,7%	non	
LE 01	Ecology strategy	Stratégie environnementale	oui	1	3,2%	Possibilité d'inclure le recyclage/réemploi de matériaux dans la stratégie environnementale du projet	
LE 02	Land use	usages du sol	oui	3	2,1%	non	L'impact des surfaces nécessaires à la production et à l'élimination des matériaux du projet n'est pas évalué
TM 01	Transport assessment	prise en compte des questions de mobilité	oui	2	3,2%	non	
Step (étape) 2 : determining the layout of the development - planifier le développement							
GO 02	Consultation and engagement	consultation des tiers	oui	2	3,5%	non	
GO 03	Design review	revue de projet ouverte	non	2	2,3%	non	
SE 05	Housing provision	politique de logement	non	2	2,7%	non	
SE 06	Delivery of services, facilities and amenities	desserte du projet	non	7	2,7%	non	
SE 07	Public realm	espaces publics	non	2	2,7%	non	
SE 08	Microclimate	Microclimat	non	3	1,8%	non	

N°	critère (VO)	traduction	standard minimal	nombre de crédits	pondération du critère	prise en compte du recyclage/réemploi des matériaux dans l'évaluation	commentaires
SE 09	Utilities	desserte par les réseaux	non	3	0,9%	non	
SE 10	Adapting to climate change	adaptation et résilience face au changement climatique	non	3	2,7%	non	
SE 11	Green infrastructure	espaces verts	non	4	1,8%	non	
SE 12	Local parking	stationnement	non	1	0,9%	non	
SE 13	Flood risk management	gestion des eaux pluviales	non	3	1,8%	non	
LE 03	Water pollution	pollution des eaux	non	3	1,1%	non	
LE 04	Enhancement of ecological value	amélioration de la qualité écologique	non	3	3,2%	non	
LE 05	Landscape	paysage	non	5	2,1%	non	
TM 02	Safe and appealing streets	des espaces publics sécurisants et agréables	non	4	3,2%	non	
TM 03	Cycling network	réseau cyclable	non	1	2,1%	non	
TM 04	Access to public transport	Accès aux transports en commun	non	4	2,1%	non	
step (étape) 3 : designing the details - concevoir en détails							
GO 04	Community management of facilities	développer des espaces de vie commune	non	3	1,2%	non	
SE 14	Local vernacular	identité locale	non	2	0,9%	non	
SE 15	Inclusive design	des ouvrages accessibles à tous	non	3	1,8%	non	
SE 16	Light pollution	pollution lumineuse	non	3	0,9%	non	
SE 17	Training and skills	formations et développement des compétences locales	non	3	5,9%	non	
RE 04	Sustainable buildings	des bâtiments durables	non	6	4,1%	les constructions de bâtiments liées au projet de développement doivent se conformer à des standards de durabilité (par rapport à un niveau médian)	Le recyclage/réemploi de matériaux entre en ligne de compte dans l'évaluation du caractère durable des bâtiments.
RE 05	Low impact materials	matériaux à faible impact	non	6	2,7%	3 crédits accordés suivant le caractère durable des matériaux utilisés dans les espaces publics.	
						3 autres crédits accordés suivant la proportion de matériaux réutilisés/recyclés utilisés dans les espaces publics.	
RE 06	Resource efficiency	maîtrise de la consommation de ressources naturelles	non	4	2,7%	Ce critère valorise la politique globale de recyclage. Le nombre maximal de crédits est atteint lorsque le projet est conçu de telle sorte que quasiment tous les matériaux non-dangereux sont valorisés plutôt que d'être envoyés en décharge	
RE 07	Transport carbon emissions	émissions de GES dues au transport	non	1	2,7%	non	
LE 06	Rainwater harvesting	réutilisation des eaux de pluie	non	3	1,1%	non	
TM 05	Cycling facilities	voies et stationnement pour cycles	non	2	1,1%	non	

N°	critère (VO)	traduction	standard minimal	nombre de crédits	pondération du critère	prise en compte du recyclage/réemploi des matériaux dans l'évaluation	commentaires
TM 06	public transport facilities	infrastructures pour les transports en commun	non	2	2,1%	non	
Inn 01	Innovation	Innovation	non	7	7,0%	Les innovations concernant le recyclage/réemploi de matériaux peuvent être valorisées dans ce cadre.	Ces points viennent en bonification

Lors de la première étape, « *établir les grandes lignes du projet* », le recyclage entre en ligne de compte dans 3 des 11 critères (émission de CO2, infrastructures et bâtiments existants et stratégie écologique). Il s'agit pour le maître d'ouvrage de s'engager à réduire ses émissions, notamment en faisant appel au recyclage, d'envisager la réutilisation des infrastructures existantes (hors champ de cette étude) ou des matériaux du site et de mettre en place une stratégie écologique. Une première quantification des objectifs doit être faite à ce stade. Ces trois critères totalisent 14 crédits et pèsent pour 10% de la notation du projet.

Lors de la seconde étape, « *planifier le développement* », le sujet du recyclage n'entre pas en ligne de compte parmi les 17 critères de notation.

Lors de la troisième étape, « *concevoir en détail* », deux critères sont spécifiquement dédiés au recyclage : matériaux à faible impact et optimisation de la ressource. Ils comptent ensemble pour 10 crédits et 5,4% du score total. Un autre critère, bâtiment durable, permet de valoriser le recyclage dans le cadre des constructions de bâtiments consécutifs à l'opération de développement urbain (6 crédits – 4,1% de la note finale), et une note de « bonification » de 1% est attribuée à chaque innovation déployée dans le projet, dans la limite de 7%.

Au total, l'engagement du maître d'ouvrage dans le recyclage contribue pour près de 20% de la notation du projet, voire 27% si celui-ci fait appel à de nombreuses innovations dans ce domaine. Au regard du type de projet porté par ce référentiel, il est possible d'affirmer qu'une réflexion et une politique en faveur du recyclage et du réemploi des matériaux du site est favorable, voire nécessaire, à l'obtention d'une bonne mention.

8.1.3. BREEAM Infrastructure

Le référentiel BREEAM Infrastructure (BRE, 2015) s'applique sensiblement aux constructions rentrant dans la définition française des travaux publics, par opposition au bâtiment, tels que les routes, les pistes d'aviation, les infrastructures énergétiques, etc. Le tableau suivant en présente les critères de notation :

Tableau VI : critères du référentiel BREEAM Infrastructure

N°	critère (VO)	traduction	standard minimal ⁸	nombre de crédits	pondération du thème	prise en compte du recyclage/réemploi des matériaux dans l'évaluation	commentaires
Integrated design (méthodologie de conception)					8,5%		
ID 01	Option appraisal and objectives	objectifs et variantes évaluées	non	3		non	
ID 02	Project team collaboration	fonctionnement de l'équipe projet	non	4		non	
ID 03	Handover and aftercare	mise en service et parfait achèvement	oui (VG)	5		non	
ID 04	Ecosystem services	services rendus par l'écosystème	non	2		non	
ID 05	Whole life costing	coût sur l'ensemble du cycle de vie	non	3		prise en compte des externalités	les prélèvements en carrières et les dépôts en installation de stockage sont des externalités
ID 06	Whole life environmental impacts	impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie	non	2		le recours au recyclage/réemploi des matériaux peut contribuer à réduire l'impact environnemental du projet. Les quantités mises en décharge doivent être évaluées	la recyclabilité/réutilisabilité des matériaux peut aussi entrer en ligne de compte
Resilience					10,0%		
Res 01	Business continuity	gestion de la continuité des affaires - procédure de traitement des événements indésirables	non	1		non	
Res 02	Risk assessment and mitigation	prise en compte et gestion des risques	non	6		non	
Res 03	Designing for future needs	prise en compte des besoins futurs - évolutivité	non	3		non	
Res 04	Surface water run-off	gestion des eaux pluviales	oui (G)	2		non	
Res 05	Durability	durabilité des ouvrages	non	2		non	

⁸ Dans la colonne « Standard minimal », la mention entre parenthèses après « oui » signifie:

- P : Le respect de tout ou partie des exigences du critère est nécessaire pour obtenir la mention « passable » (Pas)
- G : idem avec la mention « Bien » (Good)
- VG : idem avec la mention « Très Bien » (Very Good)
- E : idem avec la mention « Excellent »
- O : idem avec la mention « Exceptionnel » (Outstanding)

N°	critère (VO)	traduction	standard minimal ⁸	nombre de crédits	pondération du thème	prise en compte du recyclage/réemploi des matériaux dans l'évaluation	commentaires
Stakeholders (parties prenantes)					8,5%		
ST 01	Consultation plan	modalités de consultation des parties concernées	non	2		non	
ST 02	Consultation and engagement	mise en œuvre du plan de consultation des parties concernées - engagement du maître d'ouvrage	oui (VG)	4		non	
ST03	Responsible construction practices	mode de construction responsable	oui (E)	6		non	
ST 04	Owner operator requirements	prise en compte des besoins de l'exploitant	oui (VG)	2		non	
Local Wellbeing (acceptabilité sociale de l'ouvrage)					11,0%		
LW 01	Economic impact	impact économique	non	6		non	
LW 02	Social impact	impact social	oui (O)	7		non	
Transport					9,0%		
Tra 01	Transport impact assessment	prise en compte de l'impact sur les déplacements	oui (G)	3		La congestion des moyens de transport engendrée par le chantier est prise en compte	Le recyclage/réemploi des matériaux peut contribuer à réduire le besoin de transports engendré par la construction
Tra 02	Travel and logistics plan	stratégie concernant la logistique et les transports	non	6		dito	dito
Tra 03	Transport connectivity	connectivité des moyens de transport	non	2		non	
Land use and ecology (usages du sol et écologie)					8,0%		
LUE 01	Land use and value	usages et valeur du sol	non	4		non	l'impact des carrières et des installations de stockage n'est pas explicitement mentionné parmi les critères d'évaluation
LUE 02	Soil and vegetation management	gestion des sols et de la végétation	non	3		Ce critère valorise les bonnes pratiques en matière de terrassement	dito
LUE 03	Remediation of land contamination	dépollution des sols contaminés	non	2		non	
LUE 04	Ecological impact assessment and action plan	prise en compte de l'impact écologique et plan d'action associé	oui (VG)	2		non	ce critère traite essentiellement des questions de biodiversité et de la qualité du site lui-même
LUE 05	Protection of biodiversity	protection de la biodiversité	oui (E)	3		non	
LUE 06	Enhancement of biodiversity	développement de la biodiversité	non	4		non	
LUE 07	Land use changes	changement des usages du sol (point de vue : stockage de CO2)	non	3		non	les surfaces de carrières et d'installations de stockage n'entrent pas dans l'assiette de calcul du critère
Landscape and heritage (paysage et patrimoine)					6,0%		
LSH 01	Landscape and visual impact	paysage et impact visuel	non	4		non	
LSH 02	Heritage assets	patrimoine	non	3		non	

N°	critère (VO)	traduction	standard minimal ⁸	nombre de crédits	pondération du thème	prise en compte du recyclage/réemploi des matériaux dans l'évaluation	commentaires
Pollution					8,0%		
Pol 01	Air quality	qualité de l'air	non	3		non	
Pol 02	Water pollution	pollution des eaux	oui (VG)	4		non	
Pol 03	Noise and vibration	bruits et vibrations	oui (VG)	5		non	
Pol 04	Light pollution	pollution lumineuse	non	3		non	
materials (matériaux de construction)					11,0%		
Mat 01	Environmental life cycle impacts	impact sur l'environnement tout au long du cycle de vie	non	5		Les matériaux recyclés/réutilisés peuvent avoir un impact environnemental plus réduit que leurs équivalents bruts de carrière. L'impact de la mise en décharge est également atténué par l'envoi des matériaux en filière de recyclage.	nécessite une analyse très poussée du cycle de vie des matériaux
Mat 02	Responsible sourcing of materials	approvisionnement responsable en matériaux	oui (P)	6		Les matériaux utilisés doivent provenir de sources légales (pas d'installations non-autorisées). Les matériaux recyclés/réutilisés peuvent être considérés comme durables	Les matériaux utilisés pour la durée du chantier (pistes, ouvrage provisoires) entrent également en ligne de compte.
Mat 03	Materials efficiency	optimisation de la consommation de matériaux de construction	non	6		Ce critère a pour but de réduire la consommation de matériaux bruts de carrière. Le recyclage/réutilisation de matériaux est également explicitement cité comme démarche allant dans le sens de la certification	Le critère tient également compte des mesures permettant une déconstruction efficace de l'ouvrage lors de sa fin de vie
Mat 04	Reuse and recycling	réutilisation et recyclage	non	5		ce critère valorise l'introduction de matériaux recyclés ou réutilisés	
Carbon and energy (GES et énergie)					13,0%		
CE 01	Carbon and energy strategy	stratégie concernant les GES et l'énergie	non	2		l'extraction, la fabrication et le transport des matériaux de construction et des déchets sont cités comme critères d'évaluation.	
CE 02	Construction site carbon and energy	les émissions de GES et l'énergie du chantier	non	5		dito	
CE 03	Operational carbon and energy	émissions de GES et consommation énergétique durant l'exploitation de l'ouvrage	non	4		non	
Waste (déchets)					4,0%		

N°	critère (VO)	traduction	standard minimal ⁸	nombre de crédits	pondération du thème	prise en compte du recyclage/réemploi des matériaux dans l'évaluation	commentaires
Wst 01	Construction waste management	gestion des déchets de construction	oui (P)	4		Ce critère valorise la réduction et la réutilisation/recyclage des déchets générés par le chantier	
Water (eau)					3,0%		
Wat 01	Water efficiency planning and implementation	stratégie d'optimisation de la consommation d'eau, et application de celle-ci	oui (G)	6		non	
Wat 02	Water monitoring	suiti de la consommation d'eau	non	3		non	
Innovation					10,0%		
XX		1 crédit par innovation, jusqu'à 10 crédits		10			bonification

Ce référentiel fait de nouveau une place importante à la thématique du recyclage : plus d'un tiers de la notation est directement et positivement impactée par la mise en œuvre de techniques de recyclage ou de réutilisation de matériaux (somme des crédits pondérés égale à 33,98%). Il est également possible d'ajouter jusqu'à 10% de bonifications avec des innovations dans cette thématique.

On note également que la mise en œuvre d'une politique d'approvisionnement responsable en matériaux et de gestion des déchets est obligatoire pour l'obtention de la certification. Aucune des autres thématiques abordées par le référentiel ne fait l'objet de ce type d'égard.

8.1.4. BREEAM New construction

Ce document traite des bâtiments de quasiment toutes natures (BRE Global, 2016). Avec ce référentiel et le référentiel « Infrastructures », la certification BREEAM peut couvrir l'immense majorité des ouvrages immeubles qu'il est possible d'imaginer, pour autant qu'ils aient une certaine ampleur – on peut estimer que la certification BREEAM n'est pas adaptée pour la réalisation d'un arrêt de bus, d'une cabane de jardin ou d'un parking de 10 places.

Seuls trois critères sur 55 traitent explicitement du recyclage de matériaux en général⁹. Les matériaux concernés sont indifféremment ceux étudiés dans le cadre de ce mémoire que ceux mis en œuvre dans le bâtiment proprement dit (pas d'indications détaillées dans le référentiel). Il apparaît donc que la certification des bâtiments par BREEAM est bien moins dépendante de la politique de recyclage et de réutilisation de matériaux du maître d'ouvrage que la certification des infrastructures.

8.2. **Certification HQE**

8.2.1. *Présentation*

Les certifications HQE sont initiées par l'association « HQE – France GBC », regroupant un grand nombre d'acteurs français de l'industrie de la construction (associations professionnelles, fabricants de matériaux, collectivités locales, promoteurs, architectes, bureaux d'études...) (association HQE, 2017). De nombreux types de bâtiments ou d'infrastructures peuvent être certifiés à l'aide de référentiels portés par des organismes tels que QUALITEL ou CERTIVEA. La certification porte sur des constructions neuves, des rénovations, ou sur les modalités d'exploitation.

8.2.2. *Référentiel HQE infrastructures*

Eu égard au thème de ce mémoire, le référentiel « HQE Infrastructures » est étudié pour déterminer quelle est l'incidence de la mise en œuvre d'un processus de recyclage sur la certification d'une opération d'infrastructure. Il est disponible, après inscription, sur le site internet de CERTIVEA – www.certivea.fr.

Il est comparable à BREEAM Infrastructure, à la différence près que ce dernier est ouvert à un plus grand éventail d'ouvrages, tandis que HQE Infrastructure est concentré sur le sujet routier.

Les critères d'évaluation d'un projet avec le référentiel HQE Infrastructure sont les suivants :

⁹ Mat 01 – Life cycle impact (impact tout au long du cycle de vie), Wst 01 – Construction waste management (gestion des déchets de chantier) et Wst 02 – Recycled aggregates (matériaux recyclés).

Tableau VII : Critères de certification HQE Infrastructures

N°	titre de l'indicateur	indicateur tenant compte du recyclage/réutilisation de matériaux	commentaires
Objectif 1 : Synergie et cohérence avec les projets du territoire et ses infrastructures			
1. 11	Interaction avec le territoire	non	
1. 12	Evolution du territoire	non	
1. 13	Amélioration de l'accessibilité routière aux pôles de service	non	
1. 14	Maîtrise des risques pour l'infrastructure	non	
Objectif 2 : écoute des besoins et des attentes			
2. 11	Recensement et hiérarchisation des besoins et des attentes	non	
2. 12	Effets sur les entreprises (Industries, agriculture, etc...) et les commerces	non	
2. 13	Qualité et cohérence de l'information visuelle du territoire	non	
Objectif 3 : Impacts et acceptabilité du chantier			
3. 11	Connaissance des réseaux	non	
3. 12	Réduction des impacts et des nuisances du chantier	TP : Choix techniques opérés dès la conception afin de limiter les impacts des travaux	Le recyclage/réutilisation des matériaux du site limite le trafic de chantier et la consommation de ressources naturelles
3. 13	Information et communication en phase chantier	TP : Actions de sensibilisation sur les thématiques de développement durables mises en œuvre sur le projet	Les techniques de recyclage/réutilisation des matériaux mises en œuvre peuvent être valorisées dans le plan de communication du chantier
Objectif 4 : Paysage et patrimoine			
4. 11	Mesures en faveur du patrimoine et des éléments patrimoniaux	non	
4. 12	Gestion paysagère	non	
Objectif 5 : Milieux naturels et écosystèmes			
5. 11	Mesures en faveur des milieux naturels et des écosystèmes	non	
5. 12	Protection pendant la phase chantier	non	
5. 13	Mesures en faveur des espèces locales	non	
Objectif 6 : Gestion de l'eau			
6. 11	Conception des ouvrages hydraulique et d'assainissement	non	
6. 12	Gestion de l'eau en phase chantier	non	
Objectif 7 : Matériaux, coproduits et gestion des déchets			
7. 11	Gestion des terres polluées	P : En cas de terres polluées valorisables, évacuation des terres vers une filière de traitement et de valorisation, avec traçabilité TP : Gestion in-situ des terres polluées avec protocole de suivi (phyto-remédiation, confinement, récupération des lixiviats, etc.)	
7. 12	Réutilisation des matériaux du site	B : Evaluation des possibilités de réemploi et valorisation des matériaux excavés, en fonction de leurs caractéristiques géotechniques ou de leur valeur agronomique ET taux de réemploi sur site des matériaux excavés valorisables compris entre 50 et 75% (en masse). P : Réemploi sur site d'au moins 75% (en masse) des matériaux excavés valorisables.	

N°	titre de l'indicateur	indicateur tenant compte du recyclage/réutilisation de matériaux	commentaires
		TP : Réemploi sur site de 100% des matériaux excavés valorisables.	Le référentiel ne fait pas mention des cas où la valorisation des matériaux en installation industrielle extérieure pourrait s'avérer plus pertinente que sur le site (cas des enrobés)
7. 13	Gestion des matériaux entrants	B : Jusqu'à 20% (en masse) des matériaux employés sont (à performance équivalente) des matériaux issus d'autres chantiers ou de filières de recyclage P : 20 à 40% (en masse) des matériaux employés sont (à performance équivalente) des matériaux issus d'autres chantiers ou de filières de recyclage TP : plus de 40% (en masse) des matériaux employés sont (à performance équivalente) des matériaux issus d'autres chantiers ou de filières de recyclage	
7. 14	Gestion des matériaux sortants	B : Analyse prévisionnelle de la production de matériaux sortants résultant du projet. S'agissant des déchets, prise en compte des démarches régionale et départementale de gestion des déchets (plan déchets BTP). ET Respect des seuils réglementaires pour les enrobés en matière de HAP et amiante ET Existence d'un plan de gestion des déchets (type, quantité, filière/devenir...) et suivi qualitatif et quantitatif des déchets produits P : Etude des filières de valorisation des matériaux sortants en phase travaux et recours à ces filières identifiées si cela s'avère pertinent. TP : Proposer des mesures incitatives (financières, techniques, etc.) en vue de valoriser les matériaux sortants et privilégier leur réemploi.	
Objectif 8 : Energie et gaz à effet de serre			
8. 11	Gaz à effet de serre lié au trafic	non	
8. 12	Impact du chantier sur les gaz à effet de serre	P : En conception, choix de techniques constructives permettant de limiter le bilan de gaz à effet de serre et réaliser un bilan prévisionnel ET Après chantier, vérification du bilan effectif et analyse comparative avec le bilan prévisionnel	Le recyclage/réutilisation des matériaux peut limiter les émissions de GES du chantier
Objectif 9 : Cohésion sociale			
9. 11	Contribution du projet à l'équité sociale	non	
9. 12	Insertion et formation par l'emploi	non	
Objectif 10 : Sécurité			
10. 11	Sécurité des usagers	non	
10. 12	Amélioration et requalification de la voie déviée	non	
10. 13	Prise en compte des effets climatiques pour les usagers	non	

N°	titre de l'indicateur	indicateur tenant compte du recyclage/réutilisation de matériaux	commentaires
10. I4	Sécurité des professionnels en phase chantier	non	
10. I5	Sécurité des professionnels après la mise en service	non	
Objectif 11 : Complémentarité des modes de transport			
11. I1	Favoriser l'intermodalité	non	
11. I2	Multi-modalité du projet	non	
11. I3	Prise en compte de la diversité et des spécificités des différents usages	non	
Objectif 12 : Santé			
12. I1	Influence de l'opération sur l'attractivité des espaces publics en plein air ou de loisirs	non	
12. I2	Exposition de la population à la pollution atmosphérique	non	
Objectif 13 : Confort acoustique			
13. I1	Prise en compte des variations périodiques de débit	non	
13. I2	Exposition acoustique des bâtiments	non	
13. I3	Amélioration de l'état initial	non	
13. I4	Résorber les points noirs du bruit (pour les aménagements sur place)	non	
13. I5	Exposition sonore dans les espaces publics et protection des zones calmes	non	
Objectif 14 : Eclairage			
14. I1	Optimisation du projet d'éclairage	non	
14. I2	Limiter les nuisances lumineuses	non	
Objectif 15 : Economie et coût à long terme			
15. I1	Analyse coûts-avantages	B : Choix d'un scénario sur la base d'une analyse multicritères incluant l'aspect économique, avec prise en compte des éventuelles mesures compensatoires Pour les projets soumis à étude d'impact, celle-ci comprend une analyse des coûts collectifs des pollutions et nuisances et des avantages induits pour le territoire. TP : Pour la solution retenue, réalisation d'une étude en coût global, incluant la monétarisation des externalités, avec calcul du Taux de Rentabilité Interne (TRI) conformément au guide relatif à la prise en compte du coût global dans les marchés publics de maîtrise d'œuvre et de travaux	inclusion du bénéfice apporté par le recyclage/réemploi de matériaux pour le projet et pour le territoire : réduction des prélèvements en carrière et des apports en installations de stockage, réduction du trafic routier de chantier... nécessite de monétariser les bénéfices présentés ci-dessus
15. I2	Coût réel de la solution retenue	non	prise en compte du coût d'exploitation de l'ouvrage
15. I3	Promotion de l'innovation	P : Identifier des techniques innovantes adaptées au contexte local OU Ouverture à l'innovation dans les consultations	innovation dans le domaine du recyclage/réemploi de matériaux
		TP : Expérimentation (mise en place et protocole d'évaluation)	
Objectif 16 : Maîtrise foncière			

N°	titre de l'indicateur	indicateur tenant compte du recyclage/réutilisation de matériaux	commentaires
16. 11	Optimiser les emprises nécessaires au projet	non	Les critères d'évaluation ne tiennent pas compte des emprises nécessaires à la production des matériaux mis en œuvre.
16. 12	Acquisitions foncières	non	
16. 13	Gestion ultérieure des emprises	non	

Ce référentiel compte au total 48 indicateurs regroupés en 16 objectifs, pour chacun desquels il est indispensable d'obtenir le niveau « base » pour que le projet soit certifié au niveau minimal. Il faut aussi satisfaire le niveau « performant » ou « très performant » sur certains des objectifs, choisis par le maître d'ouvrage, pour obtenir la certification.

L'obtention de la certification implique donc de satisfaire, entre autres choses, les exigences suivantes :

- indicateur 7. I2 : réemploi de plus de 50% de la masse des matériaux valorisables in situ ou sur des opérations proches ou connexe. Il convient toutefois de noter que tous les matériaux sont concernés indifféremment, et que les chantiers de terrassement ont toujours fait un usage intensif des techniques de réemploi des terres sur le chantier. En d'autres termes, ce critère n'est pas des plus difficiles à satisfaire.
- Indicateur 7. I4 : respect de la réglementation concernant la gestion des déchets (filières de gestion, établissement d'un SOGED...) et prise en compte des démarches régionales existantes.

Par ailleurs, l'obtention du niveau « performant » ou « très performant » pour 8 des indicateurs est conditionné ou favorisé par la mise en œuvre de techniques de recyclage ou de réemploi des matériaux du site.

En conclusion, une politique volontariste du maître d'ouvrage au sujet du réemploi et du recyclage des matériaux peut contribuer directement à la satisfaction d'un quart des objectifs de ce référentiel. Sachant que les techniques de recyclages peuvent présenter un intérêt économique certain, il y a là une solution participant, à moindre coût, à l'obtention de cette certification.

D'un autre point de vue, l'obtention de cette certification est peu contraignante en ce qui concerne le recyclage. La première exigence est de mettre en place une traçabilité minimale des déchets et des approvisionnements du chantier, correspondant au cadre légal. La seconde est de réemployer sur le site 50% de la masse de matériaux valorisables, engagement assez peu contraignant dans un contexte de terrassements en grande masse.

8.2.3. Référentiel Aménagement

Il existe une certification nommée « HQE Aménagement ». Elle n'est articulée qu'autour de la mise en place d'un système de management de l'organisation. De ce fait elle est plutôt orientée vers le maître d'ouvrage, et se positionne comme une certification « ombrelle », qui favorise ensuite la mise en place de mesures techniques parmi lesquelles le recyclage et le réemploi de matériaux peut avoir sa place.

Ce référentiel peut être comparé, par son domaine d'application, au référentiel BREEAM Communities.

8.2.4. Référentiel logement

Le référentiel logement (Qualitel, 2016) ne prévoit pas de rubrique dédiée explicitement à l'emploi de matériaux recyclés. Par ailleurs, la masse de déchets de terrassement est citée comme étant à sortir de l'assiette de calcul des déchets de chantiers valorisés.

8.3. **Autres référentiels**

D'autres organismes proposent des prestations de certification environnementale. Il s'agit notamment de :

- Leadership in Energy and Environmental Design (LEED, de l'organisme US Green Building Council),
- Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) – Fédération allemande pour la construction durable,
- ...

Le World Green building Council recense 36 systèmes de certification dans le monde, liste *a priori* non exhaustive (World Green Building Council, 2017).

8.4. **Coût de la certification**

Dans le cas des travaux de VRD, et notamment grâce à l'utilisation de matériaux recyclés, il est possible d'imaginer que la mise en place d'une certification puisse ne pas entraîner de coûts de travaux supplémentaires. Cette supposition pourrait faire l'objet d'une étude plus détaillée, qui sort du cadre de ce mémoire. Néanmoins, la certification en elle-même engendre des coûts liés à la rémunération de l'organisme certificateur et aux audits de certifications.

Différentes études ont été menées sur des projets de bureau notamment, chiffrant, par exemple, le coût d'une certification entre 7 et 20 000 €HT, suivant le référentiel choisi, pour un immeuble de 20 000 m² (CBRE, 2014), soit moins d'1 €/m², ce qui apparaît comme négligeable au regard des coûts de construction de ce type d'immeuble (1500 à 2000 €/m² par exemple), voire du prix de vente, comprenant également le prix du foncier et les frais annexes.

Ce montant étant constitué de la cotisation à l'organisme certificateur (entre 25 et 75% du montant) incompressible ou presque, et de prestations intellectuelles qu'il est également difficile de réduire (au moins 1000 €/j HT pour un consultant senior), le coût de ce type de certification s'élèvera très souvent au-delà de 10 000 €HT pour un projet « non standard » tel qu'un projet de VRD¹⁰.

Ce coût devient donc proportionnellement très important pour le maître d'ouvrage, qui investit, pour un projet de VRD courant, environ 1 000 000 €/ha en moyenne en coût de construction, d'autant qu'une bonne partie du décaissement concernant la certification a lieu en début de projet, avant que celui-ci ne soit sécurisé financièrement et n'aie généré un chiffre d'affaire (cas d'un promoteur privé).

¹⁰ Les maisons individuelles sont « certifiables », mais les constructeurs disposent de contrats globaux pour l'ensemble de leur production, qui permettent de mutualiser leurs coûts de certification.

8.5. Conclusion sur la certification

8.5.1. Investissements liés à la certification

Pour certains référentiels, il serait intéressant de simuler le coût d'investissement nécessaire pour obtenir un crédit supplémentaire, en comparant les investissements dans le recyclage ou le réemploi de matériaux par rapport aux investissements dans d'autres thématiques. Il ne paraît pas extravagant de conjecturer que le rendement des premiers peut être intéressant.

8.5.2. Limite des référentiels existants

Si l'intérêt de la certification de projet est indéniable, et est potentiellement à la source de progrès en termes de respect de l'environnement par les acteurs de la construction, quelques réserves peuvent toutefois être formulées à l'endroit de ce type de démarches telles qu'elles sont conçue à l'heure actuelle.

De façon générale, la certification concerne des opérations lourdes (bâtiment, route, aménagements de ZAC) dans lesquelles le maître d'œuvre de voirie et réseau divers est rarement en position de leadership vis-à-vis du maître d'ouvrage, ce rôle étant le plus souvent dévolu à un architecte ou à un cabinet d'ingénierie pluridisciplinaire. Cet état de fait est corroboré par l'absence de représentant des praticiens du VRD dans les instances de rédaction des référentiels étudiés (CERTIVEA, 2013) (Association HQE - France GBC, 2016) (Association HQE - France GBC, 2017).

Il en résulte qu'il n'existe pas de référentiel où est valorisé spécifiquement le recyclage tel qu'entendu dans ce mémoire, soit parce que le projet déborde du cadre de l'activité d'un bureau d'études VRD - les référentiels « infrastructure » traitent de grands projets (routiers) et sont surdimensionnés -, soit parce que le sujet des VRD est abordé incidemment (référentiels logement ou tertiaire).

L'expérience de l'auteur de projets certifiés HQE logement montre que l'attention de l'organisme de certification est concentrée, concernant les VRD, essentiellement sur les questions d'éclairage (accessibilité et sécurité des personnes, consommation énergétique...), et non sur les sujets de recyclage.

8.5.3. *Propositions de l'auteur*

Il serait intéressant qu'un ou plusieurs référentiels de ce type traitent plus directement des sujets de VRD, dont le recyclage, en produisant par exemple un référentiel « infrastructure » plus adapté à des projets de relativement faible envergure (piste cyclable, requalification de voies urbaines, lotissements...), en intégrant des rubriques VRD aux référentiels bâtiments ou en créant un référentiel spécifique aux réseaux souterrains de petite ou moyenne échelle¹¹.

Des mesures de simplification des démarches de certifications pourraient constituer un relai de croissance pour les organismes certificateurs, et contribuer à rendre les nombreux projets de construction de faible envergure plus performants sur le plan environnemental.

9. Impact sur la société - Externalités

Au-delà des problématiques se posant directement au maître d'ouvrage, la question de l'approvisionnement en granulats et de la gestion des matériaux sortant du chantier a un impact sur la société en général. Cet impact est appelé externalité, autrement dit « *des bénéfiques ou des coûts qui, bien qu'ils s'ajoutent aux bénéfiques et aux coûts propres à une activité donnée, ne sont pas reflétés dans les prix du marché et touchent des agents économiques tiers, sans que ces derniers soient légalement tenus de payer ou en droit de recevoir un dédommagement* » (WEBER, 1997). Les activités de production de granulats sont, de toute évidence, productrices d'externalités, *a priori* souvent négatives.

C'est en comparant ces impacts que peuvent être décidées les politiques publiques traitant du recyclage et du réemploi des matériaux.

9.1. Consommation d'espace nécessaire à la production

Les surfaces occupées par les carrières et les ISDI sont indiquées plus haut, au chapitre sur l'outil industriel. Il semble intéressant de comparer la

¹¹ Cela impliquerait une forme d'ascèse pour les rédacteurs des manuels de certification, qui devront veiller à demander une quantité et une qualité d'éléments de preuve compatible avec l'importance du projet et les moyens qui y sont alloués.

productivité par unité de surface de ces installations à celle des installations de traitement des matériaux en vue de leur réemploi.

Le schéma départemental des carrières de Seine-et-Marne indique que la production d'une installation de recyclage standard est de 200 000 t/an sur une surface de 4 ha, le ratio de productivité est donc de 50 000 t/an/ha (Préfecture de Seine et Marne, 2014).

Ce chiffre est à mettre en regard avec la productivité des carrières franciliennes, de 10 000 t/an/ha, à laquelle il convient d'ajouter la surface d'ISDI dans laquelle seront accueillis la moitié des matériaux qui n'ont pas été recyclés, l'autre moitié allant en réaménagement de carrière. En prenant une hauteur moyenne de stockage de 3m, et une densité de matériaux en place de 1.5 t/m³, il vient que chaque hectare d'ISDI est capable d'accueillir 45 000 t.

Pour une capacité de 1 Mt de matériaux produits en un an, l'occupation de l'espace nécessaire sera de 20 ha s'ils sont recyclés, et de $100 + 0.5 \cdot (1000/45) \approx 111$ ha dans le cas de matériaux naturels, soit un rapport inférieur à 1 pour 5.

Il faut également retenir que la durée de vie d'une installation de recyclage est virtuellement illimitée. Au contraire, la capacité des carrières et des ISDI est finie, ce qui nécessite une restitution du sol pour d'autres activités, avec parfois une valeur d'usage moindre (disparition éventuelle du couvert forestier, perte de qualité géotechnique...). Cela nécessite en outre de créer de nouvelles infrastructures de desserte de ces installations lors de leur ouverture, et de les abandonner en fin d'exploitation.

9.2. **Intégration des installations de production de granulats dans leur environnement**

Les installations de recyclage et les carrières sont soumises à la réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement. Les arrêtés ministériels de prescriptions générales donnent une indication des effets sur l'environnement anticipés par le législateur. Le tableau ci-dessous fait la liste des points d'attention spécifiquement mentionnés dans ces arrêtés, et contrôlés par l'inspection des installations classées. Il va de soi ces installations sont également

soumises aux règles d'urbanisme et à toutes les lois d'ordre public (code du travail notamment).

Tableau VIII : grille des points d'attention du législateur concernant les effets sur l'environnement des installations de production de granulats

Rubrique :	2510 – exploitations de carrières (Ministère de l'environnement, du développement durable et de l'énergie, 1994)	2515 – Broyage/criblage de minéraux (Ministère de l'environnement, du développement durable et de l'énergie, 2012)	2517 – transit de produits minéraux (Ministère de l'environnement, du développement durable et de l'énergie, 2013)	2760-3 – Installations de stockage de déchets inertes (Ministère de l'environnement, du développement durable et de l'énergie, 2014)
Points d'attention du législateur :				
Esthétique du site / Intégration paysagère	X	X	X	X
Pollution de l'eau	X	X	X	X
Incendie	X	X	X	X
Pollution des sols	X	X	X	X
Rejets dans l'atmosphère	X	X	X	X
Envois de Poussières	X	X	X	X
Production de déchets	X	X	X	X
Bruits	X	X	X	X
Vibrations	X	X	X	X
Dégradation des voiries alentour	X		X	X
Congestion / sécurité routière	X	X	X	X
état du site après exploitation	X			X
Protection du patrimoine archéologique	X			
Risques d'inondations	X			

Rubrique :	2510 – exploitations de carrières (Ministère de l'environnement, du développement durable et de l'énergie, 1994)	2515 – Broyage/criblage de minéraux (Ministère de l'environnement, du développement durable et de l'énergie, 2012)	2517 – transit de produits minéraux (Ministère de l'environnement, du développement durable et de l'énergie, 2013)	2760-3 – Installations de stockage de déchets inertes (Ministère de l'environnement, du développement durable et de l'énergie, 2014)
Points d'attention du législateur :				
Protection des ressources en eau souterraine	X			
Capacité financière de l'exploitant à remettre en état le site après exploitation	X			
Surveillance des matières apportées				X
Stabilité des stockages				X

On constate que les carrières, et dans une moindre mesure les ISDI, font l'objet d'une plus grande attention que les installations de recyclage (2 colonnes du centre), ce qui marque, du point de vue du législateur, une empreinte environnementale *a priori* plus grande que celle des installations de recyclage.

9.3. **Logistique et utilisation du réseau routier**

Lorsqu'ils sont transportés par la route, les granulats le sont par des véhicules poids lourds.

Il est admis que l'usure du réseau routier est causée essentiellement par le trafic ces véhicules, de même qu'ils portent une responsabilité importante dans les nuisances causées par la circulation routière (accidents, bruit, pollution...).

9.3.1. Statistiques

Les statistiques du ministère des transports font apparaître les données suivantes concernant le trafic de l'année 2014 (Commissariat général au développement durable, 2016) :

Tableau IX : Statistique des transports de marchandises en France en 2014

Mode de transport	Minerais métalliques et autres produits d'extraction ; tourbe ; minerais d'uranium et de thorium ¹²	Toutes marchandises	Proportion des matériaux sur total
Route (kT)	455 183	1 871 376	24.3%
Route (MT.km)	14 895	151 094	9.8%
Route (distance moyenne, km)	32.7	80.7	/
Voie navigable (KT)	13 087	28 249	46.3%
Voie navigable (MT.km)	1 557	4 807	32.4%
Voie navigable (distance moyenne, km)	119.0	170.1	/

Pour mémoire, la production de granulats s'est élevée à 327,6 Mt en 2014 (voir le chapitre sur la production de granulats). Ce type de marchandise représente donc environ 70% du total des marchandises classées dans cette rubrique. Le solde des matériaux recouvre essentiellement, dans le contexte français, les vrac solides à destination de l'industrie (minéraux industriels, matières premières pour engrais et produits chimiques...). Ces derniers produits ont une plus grande valeur que les granulats, et donc sont susceptibles d'être transportés plus loin. Il y a lieu de conjecturer que les distances moyennes réalisées dans le cadre du transport de granulats sont inférieures à celles indiquées ci-dessus.

La part des granulats transportés par voie ferrée n'est pas indiquée dans les statistiques du ministère des transports.

En Ile-de-France, les statistiques sont les suivantes :

¹² Catégorisation du Conseil Economique et Social des Nations Unies – NST 2007

Tableau X : Statistiques des transports de marchandises en Île-de-France en 2014

Mode de transport	Minerais métalliques et autres produits d'extraction ; tourbe ; minerais d'uranium et de thorium	Toutes marchandises	Proportion des matériaux sur total
Route (flux entrant, kT)	4 840	41 975	11.5%
Route (flux sortant, kT)	2 592	36 423	7.1%
Route (flux interne, kT)	33 623	114 449	29.4%
Route (total des flux, kT)	41 055	192 847	21.3%
Voie navigable (flux entrant, kT)	4 152	5 982	69.4%
Voie navigable (flux sortant, kT)	1 234	3 845	32.1%
Voie navigable (flux interne, kT)	3 351	4 509	74.3%
Voie navigable (total des flux, kT)	8 737	14 336	60.9%

En ordre de grandeur, on constate que la part du transport routier concernant les matériaux est légèrement plus faible en Île-de-France qu'en France en général, et qu'elle est plus forte dans le transport par voie fluviale.

On constate aussi que la somme des flux entrants et internes, tous modes confondus, est de près de 46 Mt, quand la consommation de granulats en Île-de-France est de l'ordre de 33 Mt, le ratio est donc de 72%, soit le même ordre de grandeur qu'au niveau national.

La part de la voie navigable concernant le transport de matériaux minéraux est de 2.7% en France et de 17.5% en Île-de-France, grâce notamment à la densité du réseau fluvial et à la facilité de desserte de Paris intra-muros par ce mode de transport (26 ports urbains entre Vitry-sur-Seine et Suresnes).

9.3.2. Impacts du transport routier.

En première approche, on peut affirmer, au vu des résultats ci-dessus, que le transport de granulats représente 7% du trafic routier poids lourd. On peut cependant noter que les véhicules réalisant seulement 56% de leur kilométrage chargés, il convient d'augmenter ce chiffre pour tenir compte

des trajets à vide non décomptés. En sens contraire, les véhicules chargés de granulats ne voyagent quasiment jamais avec des chargements incomplets, ce qui entraîne une charge moyenne plus élevée que la moyenne de la profession, et donc un nombre de camion en circulation inférieur par t.km.

On peut également postuler que les transports de granulats étant plus courts, ils sont également réalisés plus près des centres urbains, à la fois lieux de consommation et de congestion routière.

En ordre de grandeur, on peut donc estimer que le transport de granulats représente environ 10% du trafic poids-lourds en Île-de-France.

On constate aussi la part importante de la voie d'eau dans le trafic de granulats en Île-de-France. Ce type de transport étant nettement plus adapté pour les matériaux naturels que recyclés (provenance plus lointaine et lots plus importants), il est donc également possible d'affirmer que, les matériaux recyclés ont un impact sur la congestion routière égal ou supérieur aux matériaux naturels.

9.4. Bilan carbone

L'ADEME publie une base de données des émissions de gaz à effets de serre sur un site internet dédié (ADEME, 2017). Concernant la production et l'usage de granulats, les données sont les suivantes (hors transports) :

Tableau XI : Emission de GES lors de la production et de la fin de vie des granulats

	Emissions de GES
Granulats – issus de roche meuble – sortie carrière	2.32 kgCO _{2e} /t
Granulats – issus de roche massive – sortie carrière	2.56 kgCO _{2e} /t
Granulats – recyclés – sortie carrière	2.99 kgCO _{2e} /t
Déchets minéraux – fin de vie stockage (hors collecte)	15.0 kgCO _{2e} /t

On constate que la production de granulats recyclés est légèrement plus génératrice de GES que celle des granulats naturels. Ces chiffres confirment les remarques faites plus haut sur le caractère plus complexe des processus de recyclage par rapport à ceux d'extraction de matériaux naturels. On peut

aussi postuler que la plus grande productivité de ces derniers a un impact bénéfique sur leur production de GES.

Bien que ces chiffres proviennent d'une source *a priori* fiable, l'ADEME, la valeur d'émission de GES lors de la fin de vie des matériaux (15.0 kgCO_{2e}/tonne) semble exagérée, sachant que le stockage en ISDI ne nécessite pas d'aménagements sophistiqués du terrain, ni de préparation des matériaux, et que le stockage ne produit plus de GES une fois en place.

Sur la base de ces chiffres, du berceau à la tombe, le recyclage des matériaux entraîne une diminution de plus de 80% des émissions de GES par rapport à ce qu'elle auraient été si le matériaux entrant dans le processus de recyclage avait été enfoui et remplacé par un matériau naturel (hors impacts du transport).

En ce qui concerne les transports, si les différences d'impacts entre les matériaux recyclés et naturels ne sont pas marquées, il paraît pertinent de préciser les émissions de GES générés par les différents modes de transport employés :

Tableau XII : émissions de GES générées par le transport de granulats

	Emissions de GES
Ensemble articulé – benne TP – PTR 40T (routier)	0.117 kgCO _{2e} /t.km
Train de marchandises – motorisation gazole, marchandises denses	0.0242 kgCO _{2e} /t.km
Train de marchandises – motorisation électrique – marchandises denses	1.46 ^E -3 kgCO _{2e} /t.km
Bateau automoteur classe II – 650T	0.0699 kgCO _{2e} /t.km
Bateau automoteur classe III – 1000T	0.0533 kgCO _{2e} /t.km
Convoi 1 Barge classe Va – 1500T	0.0359 kgCO _{2e} /t.km
Convoi 2 Barges classe Va – 3000T	0.0409 kgCO _{2e} /t.km

Le tableau ci-dessus permet d'affirmer que le transport routier de granulats génère 2 fois plus de GES que le transport fluvial par t.km, et près de 5 fois plus que le transport ferroviaire. Par exemple, l'apport de matériaux dans Paris intra-muros par la route depuis une installation de recyclage située à 20 km générera 2.34 kgCO_{2e}/t de GES, tandis que la même quantité de

matériaux ayant parcouru 100 km par voie d'eau (classe Va – 1 Barge) depuis une carrière de la Bassée en aura généré 3.59, et celle provenant par train diesel d'une carrière de Champagne (200 km), 4.84.

Malgré des émissions unitaires inférieures à celles générées par le transport routier, les modes de transports alternatifs que sont la voie d'eau et le rail ne compensent pas l'impact sur les émissions de GES liés à l'éloignement entre les lieux de production de matériaux naturels et les lieux de consommation.

Sur le plan du bilan carbone, on constate donc que les matériaux recyclés ont un avantage très significatif sur les matériaux naturels, pour l'essentiel en raison des enfouissements (point à confirmer) et des transports évités.

10. Désordres et non qualités constatées – étude de cas

Dans le cas de l'exploitation de matériaux naturels, les gisements sont sélectionnés en fonction des caractéristiques recherchées pour la production. Par conséquent, si un gisement de matériaux n'est pas conforme strictement au cahier des charges de la production envisagée, celui-ci n'est pas exploité, et le producteur se tourne vers un autre gisement. L'investissement nécessaire à l'ouverture d'une carrière étant important, les carriers sélectionnent des gisements de volume important et homogènes, ce qui leur permet d'amortir des études poussées quant à leurs caractéristiques.

Dans le cas des matériaux recyclés, le transformateur est en concurrence avec les installations de stockage pour ce qui est de la réception des matériaux issus des chantiers. Une politique de réception trop restrictive conduira les producteurs de déchets à se tourner vers d'autres filières de gestion et entrainera pour le transformateur l'impossibilité de produire faute de matière première.

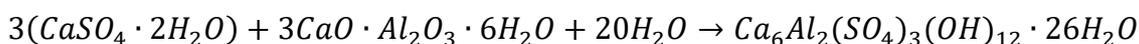
A l'inverse des carriers, les transformateurs et les utilisateurs de produits recyclés sont donc contraints de composer avec des matériaux provenant de sources hétérogènes et dont les caractéristiques ne sont pas aussi finement connues que celles des matériaux naturels.

10.1. Sources de désordres potentielles – mécanismes mis en jeu

10.1.1. Sulfates

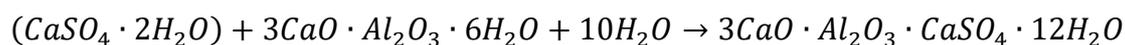
En génie civil, le terme sulfate s'utilise essentiellement pour désigner le sulfate de calcium, de formule CaSO_4 . On le trouve à l'état naturel sous sa forme dihydratée $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, connue sous le nom de gypse. Sa forme hemihydratée $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ est un des composants majeurs du plâtre.

Les sulfates sont solubles dans l'eau, et représentent donc un enjeu en termes de pollution des milieux aquatiques, auxquels les administrations compétentes sont sensibles. Par ailleurs, les sulfates réagissent en présence de ciment et d'eau pour former de l'ettringite, selon la formule :



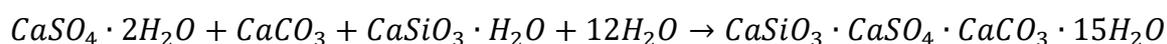
Équation 1 : Réaction de formation de l'ettringite

Ou du monosulfoaluminate de calcium selon la formule :



Équation 2 : Réaction de formation du monosulfoaluminate de calcium

La réaction des sulfates avec la chaux, l'argile et l'eau forme quant à elle la thaumasite :



Équation 3 : Réaction de formation de la thaumasite

Les sulfates sont introduits dans les matériaux de recyclage sous forme de plâtre lié au béton, à la suite d'un processus de démolition insuffisamment maîtrisé (curage insuffisant ou mélange de matériaux). On trouve aussi des sulfates dans les roches gypsifères, courantes en Île de France. Par exemple, la société du Grand Paris estime que plus de 20% des terres à extraire dans le cadre du projet « Grand Paris Express » (8 879 kT sur 42 700) auront une teneur en sulfate supérieure aux seuils d'acceptation en ISDI (Société du Grand Paris, 2016).

Dans le cas des matériaux recyclés, la mise en présence de gypse et de ciment (carbonate et aluminates) se fait de deux façons :

- traitement du sol avec un liant hydraulique,
- libération du ciment non-hydraté lors des opérations de préparation et de concassage des bétons de démolition avant

emploi. C'est le phénomène de « pralinage » décrit plus haut dans ce mémoire.

La norme NF P 94-100 propose une méthode d'évaluation de l'aptitude des sols au traitement reposant, entre autres essais, sur la mesure du gonflement d'une éprouvette cylindrique (AFNOR, 2015). Cette norme considère qu'un gonflement compris entre 5 et 10% en volume est un résultat douteux, et qu'il est inacceptable au-delà de 10%. On peut donc s'attendre, en cas de teneur en sulfates importante dans des sols, à des gonflements pouvant excéder 10% en volume. Pour une structure traitée épaisse de 50cm, cela correspond à un gonflement de 5 cm.

L'expérience montre que ce phénomène de gonflement est capable de créer des désordres importants sur quasiment tous les types de bâtiments ou d'ouvrages de génie civil, et qu'il peut générer des pressions de plusieurs dizaines de tonnes au mètre carré.

10.1.2. Effets du gel

Le gel entraîne deux types de désordres sur les chaussées.

D'une part, un gel très intense peut faire éclater des granulats poreux mis en présence d'eau, en raison du phénomène d'expansion de l'eau gelée : on parle de gélifraction. La mesure de la sensibilité au gel-dégel des granulats peut se faire selon la méthodologie proposée par la norme EN 1367-1, qui consiste à exposer le matériau à un certain nombre de cycles de gel et de dégel dans des conditions saturées en eau, et ensuite d'observer les dégradations du granulat (apparition de fissures, éclatement, formation de fines...) (AFNOR, 2007). Si ce phénomène est assez facile à envisager intuitivement, ce n'est pas la principale cause de désordres auquel les chaussées doivent faire face sous nos latitudes.

D'autre part, les dégradations liées au gel sont le plus souvent dues au phénomène de succion cryogénique. C'est ce phénomène qui oblige à la mise en place de barrières de dégel sur les routes après un épisode froid.

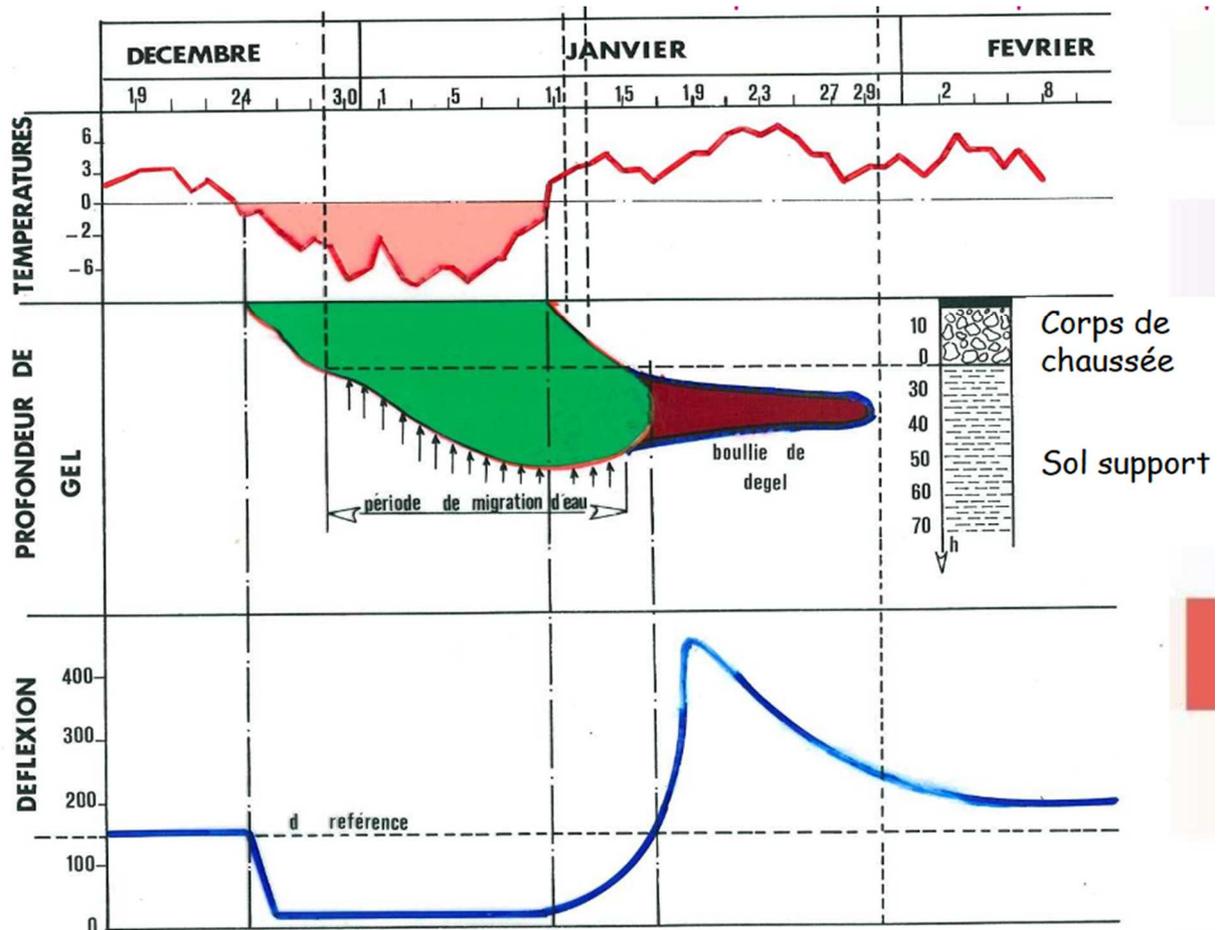


Figure 20 : mécanisme de gel d'une chaussée et chronologie de pose de barrière de dégel (Bordes, Guinard, & Laurent, 1996)

La succion cryogénique est « un phénomène de dépression et d'aspiration d'eau qui se développe à l'interface eau-glace. La dynamique du changement d'état eau liquide-glace crée un champ de pression qui entraîne l'eau vers la zone de congélation » (Mauduit). Ce phénomène engendre la création de lentilles de glace et un gonflement de la structure de chaussée pendant la période de gel. Au dégel, l'eau drainée vers ces lentilles de glace fond et forme une boue qui altère grandement les qualités de la route pendant les jours suivants (augmentation de la déflexion), le temps que la teneur en eau de la structure de chaussée redevienne homogène. Une contrainte importante, telle que le passage d'un poids-lourd, pendant ce délai entraîne inévitablement d'importants désordres sur la chaussée :



Figure 21 : Effets de la circulation sur une chaussée à la suite d'un phénomène de succion cryogénique (Source : Conseil Départemental des Deux-Sèvres)

Ce phénomène est particulièrement favorisé par la présence de fines, qui perturbent la circulation de l'eau et empêchent sa dilatation dans les vides du sol.

Les matériaux recyclés sont souvent, au cours de leur histoire, mis en contact avec des fines, par exemple, dans le cas de structure routière, à cause du mélange se produisant inévitablement entre le sol support et les couches de structure d'une chaussée non protégée par un géotextile. De plus, étant généralement destinés à des usages peu nobles, ils ne subissent que rarement des traitements tels que le lavage à l'eau, à même d'éliminer ces fines.

Enfin, la démolition et le concassage en fin de vie sont générateurs de fines, quand l'extraction et le stockage sur chantier n'engendrent pas de pollution supplémentaire.

La question de la sensibilité au gel des matériaux recyclés est donc réelle. La norme NF P 98-234-2 propose un protocole de mesure de la sensibilité au gel consistant à mesurer la déformation d'une éprouvette cylindrique (type Proctor) soumise sur une de ses faces à une température

négative, tandis que l'autre ne le serait pas. La courbe de la déformation en fonction du temps d'exposition au gel indique la sensibilité du matériau. Le dispositif utilisé pour cet essai est le suivant :

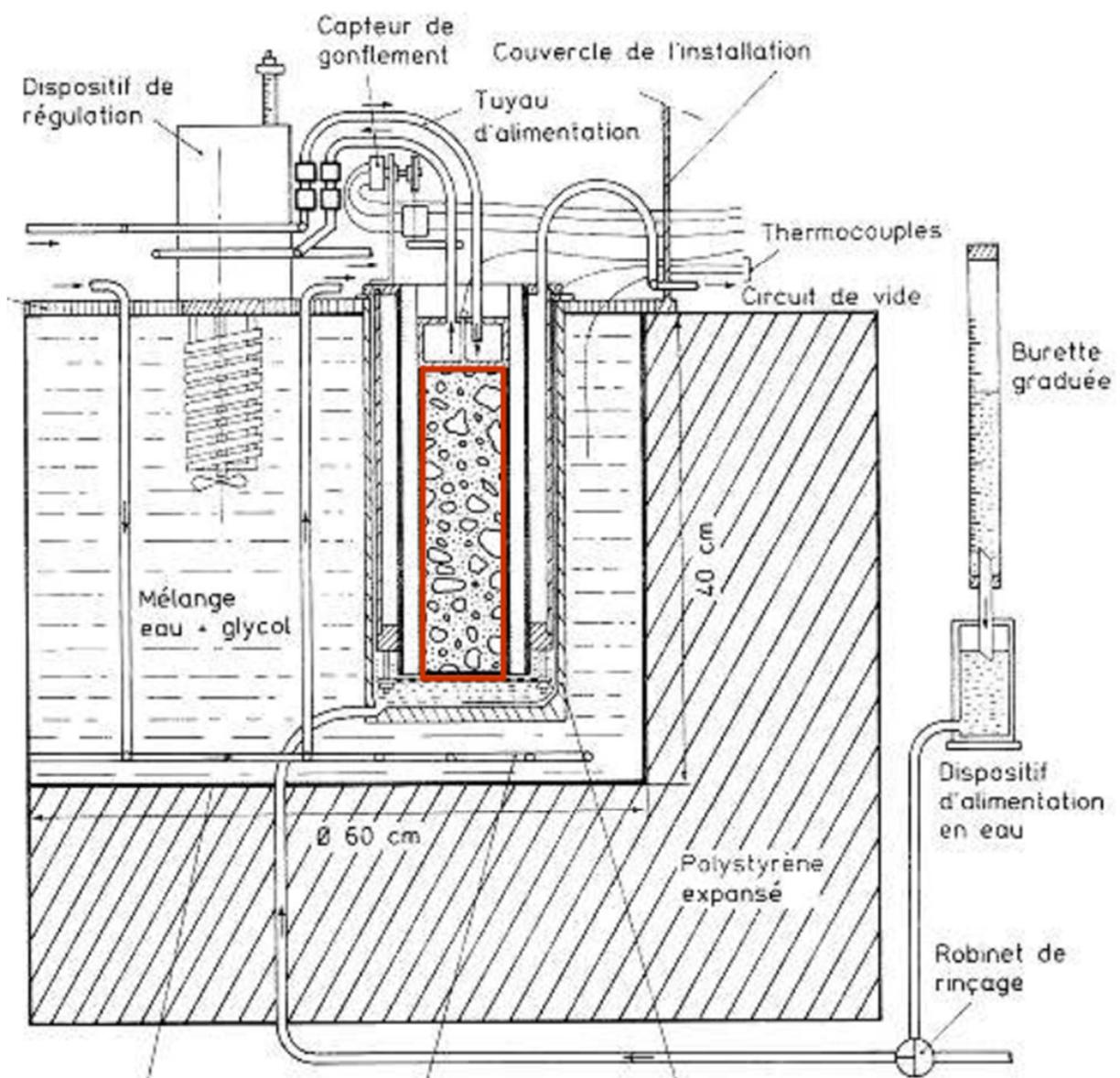


Figure 22 : installation pour essai de gonflement au gel

On note par ailleurs que la durée de cet essai est de l'ordre de 15 jours, avec une manipulation ou une mesure quotidienne. Il apparaît donc que cet essai est fastidieux, coûteux, et que peu de laboratoires ont investi dans le matériel nécessaire à sa réalisation. L'information quant à la sensibilité au gel d'un matériau donné est donc rarement disponible. Enfin cet essai peut être qualifié de pessimiste puisque, d'après le catalogue des structures de chaussées, *Les matériaux **grenus** sensibles au gel selon l'essai de*

gonflement ne présentent généralement pas de chute de portance significative (DE BOISSOUDY, et al., 1998).

La norme EN 13-242+A1, qui établit les critères du marquage CE, ne prévoit pas cet essai, et se limite à des essais recherchant plutôt la sensibilité à la gélifraction (EN 1367 et 1097 notamment).

En pratique, l'évaluation de la sensibilité d'une structure au gel-dégel se fera, à défaut d'essai, de façon prudente en considérant *a priori*, quasiment tous les matériaux fins comme gélifs ou peu gélifs. Le tableau suivant, extrait du catalogue des structures de chaussées du SETRA donne une illustration de cette méthode (DE BOISSOUDY, et al., 1998) – on note qu'une erreur subsiste dans ce tableau, il faut lire : passant à 80µm et non 80mm :

Classification géotechnique du sol ou matériau, non traité	Classe de sensibilité au gel pouvant être adoptée en l'absence d'essai de gonflement
matériaux dont le passant à 80mm est <3% (comprend une partie des matériaux D)	SGn
A3 ,A4 , B1	SGp
A1 , A2 , B2 , B3 , B5 , B6 , R1	SGt

Il n'est pas possible de se prononcer sur les matériaux ne figurant pas dans le tableau ci-dessus en l'état actuel des connaissances. Pour ces matériaux, un essai de gonflement est indispensable.

Figure 23 : Classes indicatives de sensibilité au gel¹³

Les auteurs de cet ouvrage indiquent que le traitement au liant hydraulique supprime la sensibilité au gel pour le matériau concerné. Si cette technique est d'emploi courant, il semble peu économique de la mettre en œuvre uniquement pour s'assurer de la tenue au gel d'une structure de chaussée en l'absence de données sur la sensibilité au gel des matériaux la constituant. Néanmoins, en cas de sensibilité au gel avérée, suite à la réalisation de l'essai décrit plus haut, la solution du traitement peut permettre de s'affranchir d'une coûteuse substitution de matériaux.

¹³ SGn signifie sensibilité nulle au gel, SGp signifie peu sensible au gel, SGt signifie très sensible au gel

10.2. Etude de cas : Noyelles-Godault – utilisation de schistes houillers en structure de chaussée

10.2.1. Description du cas et problématiques rencontrées

Il s'agit d'un cas où l'auteur intervient en tant que sapiteur dans le cadre d'une expertise à la suite d'une démarche non concluante de mise en œuvre de matériaux de réemploi de matériaux en structure de chaussée.

Dans le cadre de la construction d'une zone industrielle dans le Pas-de-Calais, la couche de fondation des voiries primaires a été réalisée à l'aide de schistes houillers prélevés sur un terril tout proche, et recouverte d'une structure bitumineuse épaisse d'environ 15 cm. Quelque temps après la livraison, de nombreux désordres sont apparus sur les chaussées, dont le linéaire est d'environ 2500 mètres, soit une surface d'environ 20 000m² :





Figure 24 : Photographies des désordres observés sur le site de Noyelles-Godault

Une étude géotechnique sur ces chaussées a conclu que ces désordres résultent du caractère gélif des schistes employés :

Tableau XIII : Caractéristiques des matériaux employés en structure de chaussée sur le site de Noyelles-Godault (source GINGER-CEBTP)

Sondage	Matériau	Dmax	Inférieur à 0.08 mm	Teneur en eau* W	Valeur au bleu VBS	Essai Los Angeles LA	Essai Micro-Deval MDE	Essai de gonflement au gel	Classification GTR 92
Unité		mm	%	%	g/100g	%	%	mm	
Normes			Sur fract. 0/50	NF P 94-050	NF P 94-068	NF EN 1097-2	NF EN 1097-1	NF P 98-234-2	NF P 11-300
1	Schistes noirs	63	10.8	7.3	0.26	36	46	0.134 (SG p)	C1B42
2	Schistes rouges	100	7.9	7.3	0.21	26	66	0.532 (Stg)	C2B32

Le guide des terrassements routiers donne quelques indications sur ces matériaux et leur mode d'emploi en couche de forme (CORTE, et al., 2000). Les tableaux issus de cet ouvrage sont représentés en annexe 1.

A la lecture de ces tableaux, on constate que ces matériaux ne sont pas employables, en l'état, en couche de forme. Il est prescrit, entre autres actions permettant cet emploi, de procéder à l'élimination de la fraction grossière empêchant le malaxage et de réaliser un traitement du matériau aux liants hydrauliques. Ces actions n'ont pas été réalisées lors de la mise en œuvre de ces matériaux, ce qui permet d'affirmer que ces travaux ont été réalisés sans respecter les règles de l'art. Faute de disposer des résultats d'un essai de type Proctor, il n'est pas possible de caractériser l'état hydrique du sol, et donc de savoir si un arrosage aurait été nécessaire.

La même étude indique que la structure bitumineuse est suffisamment dimensionnée au regard du trafic observé sur les chaussées.

10.2.2. Solutions mises en œuvre

Il apparaît, au regard des éléments indiqués dans le chapitre précédent, que la solution aux désordres constatés implique d'intervenir sur la couche de forme en schistes houillers.

La solution la plus évidente consiste à substituer ces matériaux par d'autres, non gélifs, sur une épaisseur suffisante pour s'affranchir du risque lié au gel des schistes houillers. Cette grave non traitée (GNT) peut éventuellement provenir d'une installation de recyclage.

En premier lieu, il convient de noter que les enrobés actuels devront être démolis et remplacés.

Cette opération de reconstruction de la chaussée et de sa couche de forme peut s'assimiler à un dimensionnement de chaussée neuve, tel que décrit dans le *Catalogue des structures type de chaussées neuves* (DE BOISSOUDY, et al., 1998).

Ces travaux étant encore à l'état de projet, les paramètres de calcul qui vont suivre ne sont pas encore validés par le maître d'ouvrage, mais sont toutefois susceptibles de lui être présentés.

Les chaussées concernées appartiennent à une zone industrielle et le maître d'ouvrage attend un trafic moyen de 200PL/j/sens au maximum.

En termes de dimensionnement, on décide de considérer que ces voies appartiennent au réseau routier non-structurant (VRNS), et donc que la durée de dimensionnement est de 20 ans. On considère également un accroissement nul du trafic.

Le nombre de poids-lourd cumulé est donné par la relation suivante :

$$TCi_{20} = 365 * 200 * 20 = 1\,460\,000\,PL$$

Équation 4 : Calcul du trafic cumulé sur la plateforme de Noyelles-Godault

La classe de trafic est donc TC4₂₀ (trafic inférieur à 2,5 M PL/j).

On émet l'hypothèse que la couche de matériaux rapportés permet d'obtenir une plateforme de type PF3.

Il est à présent nécessaire d'évaluer l'épaisseur de la couche de matériaux bitumineux à même de supporter le trafic décrit ci-dessus, et la couche de matériaux non-gélifs permettant de protéger la chaussée, afin de pouvoir déterminer quelle épaisseur de chaussée devra être terrassée :

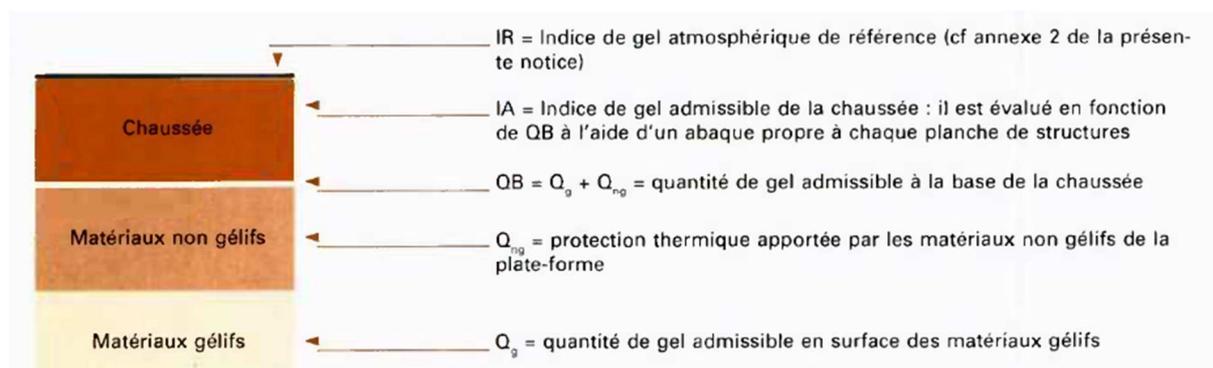


Figure 25 : Principe de vérification au gel-dégel selon le catalogue des structures type de chaussées neuves

A Lille, la station climatique la plus proche de Noyelles-Godault, l'indice de gel d'un hiver exceptionnel (HE) est de $IR_{HE} = 250^{\circ}C*j$, tandis que l'indice de gel d'un hiver rigoureux non exceptionnel (HRNE) est de $IR_{HRNE} = 90^{\circ}C*j$.

D'après le catalogue des structures de chaussée, il est possible de réaliser la chaussée à l'aide d'une couche de 12cm d'Enrobés à Module élevé (EME), surmontée d'une couche de roulement en Béton Bitumineux très Mince (BBTM) de 2,5 cm, soit une couche bitumineuse de 14.5cm au total.

On détermine ensuite la quantité de gel qu'il est possible de transmettre à la couche de schiste résiduelle. On se place dans l'hypothèse la plus défavorable, à savoir celle des schistes rouges, très gélifs, dont la pente $p = 0.532$.

Il vient

$$Q_g = 1/p = \frac{1}{0.532} = 1.88$$

Équation 5 : calcul et application numérique de la quantité de gel admissible en surface des schistes rouges

La protection thermique apportée par la couche de matériaux non-gélifs rapportée est calculée de la façon suivante :

$$Q_{ng} = A_n * \left(\frac{h_n^2}{(h_n + 10)} \right)$$

Équation 6 : calcul de la protection apportée par la couche non-gélive

Dans le cas d'une grave non traitée, tel qu'il est prévu, $A_n = 0.12$

On prend pour hypothèse l'apport de 30cm de matériaux non gélifs, soit une couche non-gélive d'une épaisseur totale $h_n = 45cm$.

Il vient :

$$Q_{ng} = A_n * \left(\frac{h_n^2}{(h_n + 10)} \right) = 0.12 * \left(\frac{45^2}{(45 + 10)} \right) = 4.42$$

Équation 7 : Application numérique du calcul de la protection apportée par la couche de matériaux non-gélifs (GNT) épaisse de 30cm

Il vient donc :

$$Q_b = Q_g + Q_{ng} = 1.88 + 4.42 = 6.30$$

Équation 8 : Application numérique du calcul de la quantité de gel admissible par la chaussée avec une couche de GNT épaisse de 30cm

D'après l'abaque du catalogue des structures, l'indice de gel d'un HRNE est de 5.5, tandis que l'indice de gel d'un HE est de 10.5. Par conséquent, la mise en œuvre d'une couche de matériaux non gélifs de 30cm sous 15cm

d'enrobé permet de protéger la chaussée contre un HRNE mais pas contre un HE.

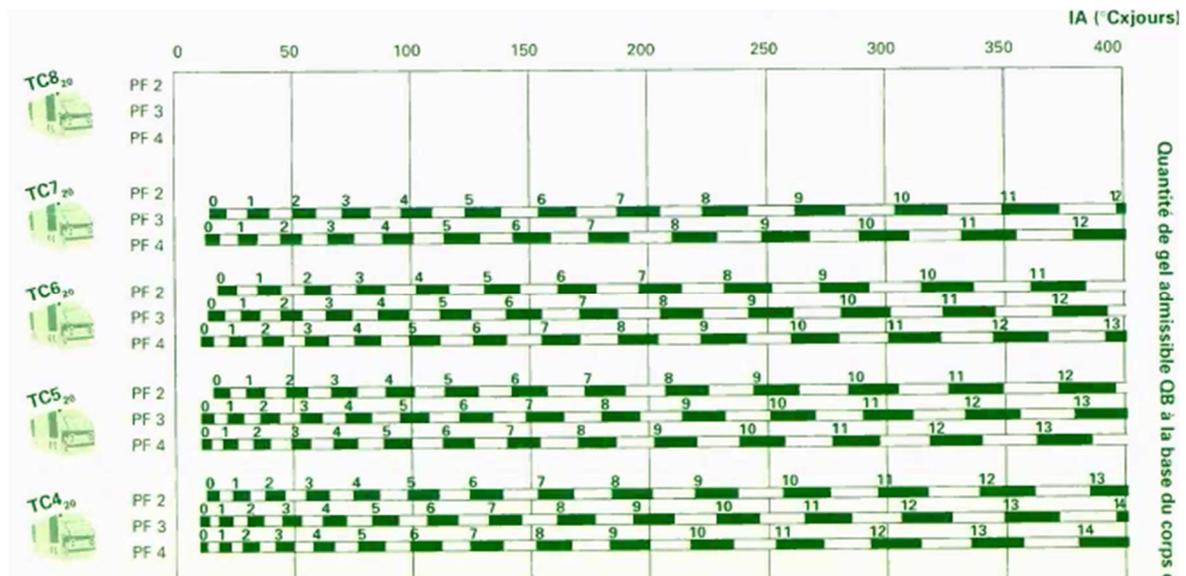


Figure 26 : extrait de l'abaque de détermination de la quantité de gel admissible IA de la chaussée en EME2

Après essais successifs, on constate qu'une couche de matériaux rapportée de 70cm, soit 85cm de matériaux non-gélifs, sont nécessaires pour permettre une protection contre un hiver exceptionnel, en effet :

$$Q_b = 1.88 + 0.12 * \left(\frac{85^2}{(85 + 10)} \right) = 11.01 > 10.5$$

Équation 9 : application numérique du calcul de la quantité de gel admissible par la chaussée avec une couche de GNT épaisse de 70 cm.

Il faut donc plus que doubler l'apport de matériaux non-gélifs (hors couche d'enrobés) pour obtenir une protection contre les hivers exceptionnels.

Une autre solution, alternative à la substitution des schistes par une GNT, consiste à traiter en place ces schistes à l'aide de liants hydrauliques, de façon à les protéger du gel, tel qu'indiqué au chapitre 10.2 et en annexe 1.

La protection contre un hiver rigoureux non exceptionnel paraît techniquement faisable, puisqu'elle implique une action sur une couche profonde d'environ 30cm, inférieure aux 50cm possibles avec les matériels de traitement de sols courants.

La protection contre un hiver exceptionnel implique par contre d'agir sur une épaisseur d'environ 70cm, donc de substituer ou traiter à part les 20cm supérieurs de la couche de forme.

De façon générale, la protection contre les hivers exceptionnels, et donc l'assurance de ne pas devoir mettre en place de barrières de dégel, qui interrompraient l'activité du site, ou de risquer la ruine des chaussées en cas d'évènement de ce type, entraîne un surcoût important.

Il convient de prévoir des études de formulation avant d'entreprendre un traitement aux liants hydrauliques. Il faut également noter que le temps de prise des liants nécessite de fermer certaines voies à la circulation pendant un temps assez long, de l'ordre de plusieurs semaines, et en certains endroits incompatible avec l'exploitation du site, alors que la substitution de la couche de forme existante ne nécessite pas de temps de séchage ou de prise.

10.2.3. Retour d'expérience

Ce cas particulier permet de mesurer l'importance du dimensionnement au gel des chaussées : dans la moitié nord de la France, et à partir d'un certain niveau de trafic, on peut affirmer que la résistance au gel est le critère dimensionnant des chaussées. La présence de fines, assez fréquente dans les matériaux recyclés, est un handicap en vue de l'emploi de ces matériaux sur les chaussées les plus sollicitées.

En corollaire, il est important de noter que le choix d'accepter ou non la pose de barrières de dégel, et plus généralement les contraintes d'exploitation des chaussées, ont une incidence très importante sur le coût des ouvrages. Il importe donc que le maître d'œuvre sache expliquer, calculs et schémas à l'appui, l'incidence des choix du maître d'ouvrage.

On constate enfin que le choix de réemploi des matériaux du site peut, s'il n'est pas accompagné des essais adaptés et du respect des règles de l'art, entraîner des désordres conséquents et coûteux.

11. Outils et méthodologies pour le maître d'œuvre

Ce chapitre a pour ambition de proposer au maître d'œuvre, à l'aide des éléments présentés dans ce mémoire, une politique à adopter concernant les matériaux recyclés.

11.1. Proposition des entreprises de travaux

L'objet est de proposer au maître d'œuvre de voirie et réseaux divers une méthodologie pour répondre à la sollicitation d'une entreprise de travaux qui proposerait un matériau issu du recyclage sortant du cadre strict du cahier des charges du chantier. En d'autres termes, il s'agit de répondre à une proposition de variante de la part d'une entreprise.

Il convient tout d'abord de rappeler qu'il est interdit de refuser, à priori, un matériau en raison du fait qu'il est issu du recyclage et que l'entrepreneur est responsable et libre des matériaux qu'il compte mettre en œuvre.

Par conséquent, si le matériau répond aux spécifications techniques du cahier des charges, sur la base de la fiche produit, il n'y a pas lieu de le refuser ni d'entraver de quelque façon son emploi par l'entreprise. Il s'agirait sinon d'une immixtion de la part du maître d'œuvre.

Sur le marquage CE, l'entreprise qui produit elle-même son matériau n'est pas tenue à cette obligation dans la mesure où elle l'utilise pour son compte propre (installation de recyclage interne). Dans le cas contraire (produits d'un fournisseur tiers, fut-il une filiale de l'entreprise de travaux), le produit devra être revêtu de ce marquage. Dans tous les cas, un système d'assurance qualité appliqué à cette production semble indispensable pour s'assurer de la représentativité d'une fiche produit.

11.2. Réemploi de matériaux du site

On se place ici dans le cas où, lors de la conception du projet, est identifié un gisement potentiel de matériaux susceptible d'être réemployé, moyennant un éventuel traitement, pour la construction de nouveaux ouvrages sur le même site.

Il s'agit, par exemple, du cas d'une dalle en béton de grande taille, ou d'une couche de fondation de chaussée de bonne épaisseur et potentiellement exempte de pollution.

11.2.1. Gestion du risque

En raison des enjeux associés à la construction, il est important de connaître les caractéristiques des matériaux employés. Cette caractérisation repose sur des essais réalisés par des spécialistes, dont le

coût est non négligeable, comme vu dans les chapitres précédents. Il est bien entendu hors de question d'utiliser des matériaux du site sans un minimum d'essais préalables, sauf en l'absence d'enjeux (« remplissage »).

On se place dans l'hypothèse où le bénéfice escompté (à chiffrer par le maître d'œuvre) est nettement plus important que le coût des essais nécessaires à la caractérisation du matériau. Dans le cas contraire, la proposition n'est pas pertinente puisqu'elle revient à demander à son donneur d'ordre d'engager des frais « à fonds perdus » (les résultats des essais peuvent être négatifs ou l'opération peut avorter entretemps) pour un gain hypothétique insuffisant.

Les trois scénarii possibles sont les suivants :

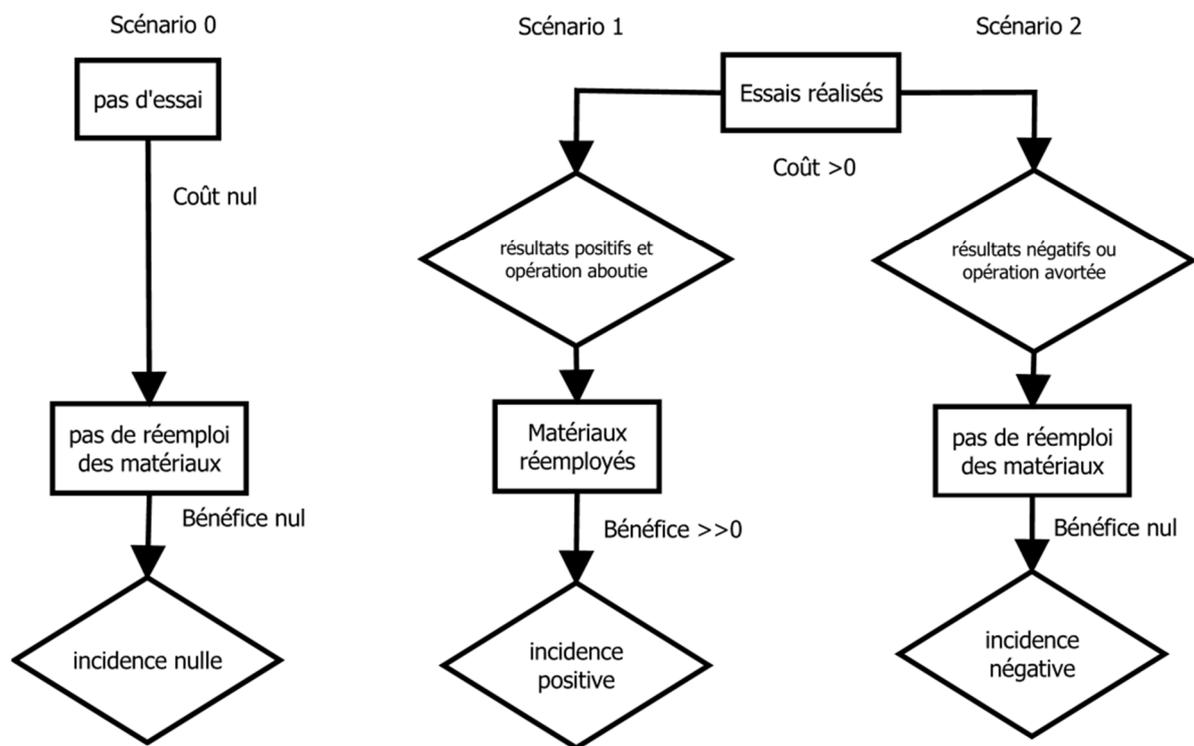


Figure 27 : scénarii de réemploi de matériaux

La décision quant à la réalisation des essais appartient au maître d'ouvrage. Le rôle du maître d'œuvre est de l'éclairer dans ce choix, autrement dit de quantifier (en ce qui le concerne) et de réduire la part de risque. Plusieurs moyens, compatibles entre eux sont à sa disposition :

- évaluation du bénéfice escompté : il s'agit de chiffrer les coûts des scénarii avec et sans réemploi de matériaux. Les autres paramètres, notamment l'incidence du réemploi sur les délais et

l'organisation du chantier doivent également être étudiés à ce stade.

- Optimisation du coût des essais. Dans le cadre de projets de construction, le maître d'ouvrage diligente quasiment systématiquement différentes études dont les résultats ne sont pas sans intérêt : Pack ISDI (sulfates), dimensionnement des fondations de bâtiments (nature du sol), diagnostic des ouvrages existants à démolir (facilité de tri entre le béton et les substances indésirables), amiante... Le coût de ces essais, généralement réalisés très tôt dans le projet, peut donc être considéré comme sans incidence dans le cadre de la problématique étudiée ici.

Ces éléments permettent, par exemple, d'évaluer de façon assez sûre le réemploi en structures de chaussée après concassage des ouvrages en béton non démolis au début du chantier, ainsi que la possibilité de traiter les limons en place (non traité dans ce mémoire).

Dans les autres cas (structures de chaussées existantes, stocks de bétons de démolition...), il convient de mener des études spécifiques.

Il convient de noter que ce risque (et une partie du bénéfice le cas échéant) peut être assumé par l'entreprise, sous forme de variante. Cela implique toutefois que le projet aille jusqu'au stade de la consultation des entreprises, et donc que sa viabilité soit assurée sans l'optimisation générée par le réemploi de matériaux.

La démarche du maître d'œuvre peut être décrite par l'arbre de décision ci-dessous.

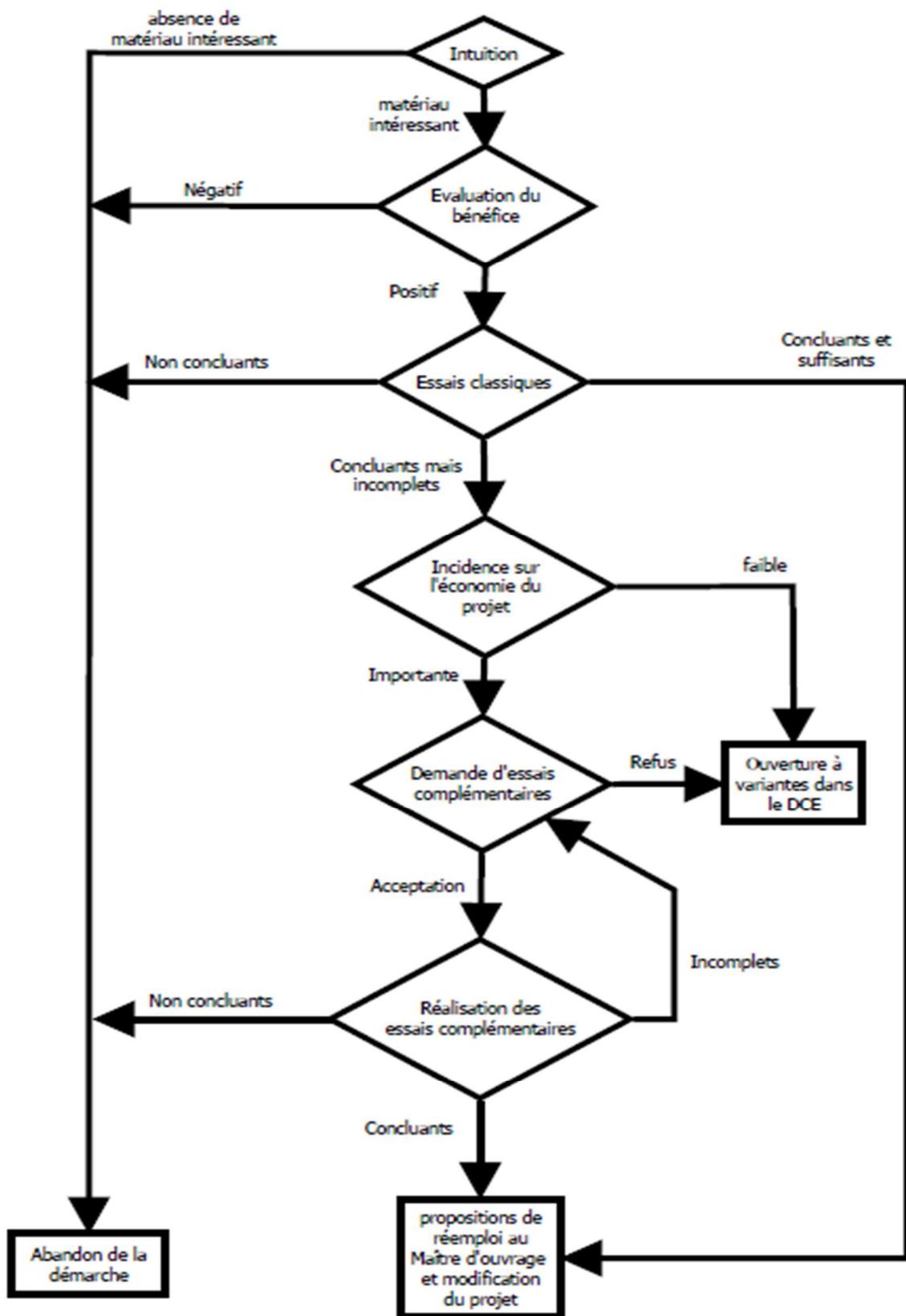


Figure 28 : Réemploi sur place de matériaux - arbre de décision

On constate qu'en suivant cette démarche, le maître d'ouvrage engage des frais spécifiques au réemploi de matériaux lors de la dernière étape de l'arbre de décision (réalisation des essais complémentaires). Le coût des

démarches précédentes est inclus dans celui des études générales de l'opération.

Le niveau de risque lié à la démarche de réemploi des matériaux est donc lié à la capacité du maître d'œuvre à évaluer les incidences de sa proposition sur l'économie générale du projet et à optimiser la balance bénéfice/risque des propositions qu'il soumet à son maître d'ouvrage.

L'ouverture à variante doit être pensée comme une suggestion faite aux entreprises soumissionnant à l'appel d'offre. Il s'agit de les inciter à réaliser les études nécessaires à la validation de l'option proposée, condition indispensable à son acceptation, afin d'obtenir pour le maître d'ouvrage une partie du bénéfice attendu, sans le risque associé.

11.2.2. Choix des essais complémentaires

Comme indiqué ci-dessus, ces essais complémentaires représentent un risque de perte financière, car en cas de résultats non concluants, leur coût ne pourra pas être contrebalancé par une économie sur le projet.

Le rôle du maître d'œuvre est donc de proposer les essais nécessaires et suffisants pour valider l'option proposée.

Cette validation repose souvent sur plusieurs essais différents. Il peut alors être pertinent, si les délais le permettent, d'organiser ces essais de façon à limiter leur coût en cas de résultats négatifs.

Pour ce faire, il est possible d'imaginer de rédiger un contrat avec un laboratoire comptant des tranches conditionnelles, en faisant réaliser dans un premier temps ceux dont le rapport du niveau de discrimination sur le coût est le plus grand, puis, le cas échéant, en affermissant une ou plusieurs tranches conditionnelles d'essais complémentaires jusqu'à obtenir le niveau de connaissance du matériau requis pour valider la solution.

11.3. Demande du maître d'ouvrage

Le maître d'ouvrage peut également émettre une demande relative à l'emploi de matériaux recyclés dans son projet. Ces demandes peuvent être de deux catégories. Il peut soit avoir identifié de lui-même un gisement de matériaux susceptibles d'être réemployé, soit, pour des raisons de

stratégie, souhaiter qu'une partie de son ouvrage intègre des matériaux recyclés.

Dans le premier cas, le maître d'œuvre, en tant que garant de la qualité de l'ouvrage final, doit appliquer la démarche décrite au paragraphe précédent concernant le réemploi de matériaux du site. Il paraît toutefois probable et légitime que le maître d'ouvrage soit, en ce cas, plus facile à convaincre d'accepter la prise de risques que représentent les essais préalables à la validation de ce type de solution.

Dans le deuxième cas, lorsque par exemple le maître d'ouvrage souhaite obtenir une certification environnementale en accumulant les crédits liés au recyclage de matériaux, différentes solutions s'offrent au maître d'œuvre.

La première consiste à élargir le champ du réemploi des matériaux du site, en ajoutant au bénéfice économique tiré de ce procédé, la monétarisation du bénéfice environnemental tiré de cette solution (voir chapitre 8 sur la certification environnementale).

La seconde s'appuie sur les pièces constitutives du marché. Elle consiste à proposer préférentiellement et explicitement des ouvrages construits à l'aide de matériaux recyclés. Il s'agit par exemple de préciser spécifiquement que les matériaux de remblais de tranchée seront « de type URBASOL des établissements YPREMA ou équivalent », ou encore de faire référence à des catégories de matériaux recyclés (GR0, 1, 2, etc.), telles que définies dans les « guides régionaux » (DESTOMBES, et al., 2003). Si l'entreprise peut tout à fait ignorer cette clause en utilisant un matériau naturel de performances supérieures ou égales à celui indiqué, l'insertion d'une telle clause permet toutefois de donner une indication des attentes du maître d'ouvrage et de rassurer l'entreprise sur l'accueil qui sera fait à ce type de produit.

La référence aux guides régionaux ou à des documents établis par des organismes reconnus tels que le SETRA ou l'IDRRIM présente l'intérêt de rassurer le maître d'ouvrage sur le niveau de maturité des techniques proposée et sur la qualité de l'ouvrage qui sera construit.

Enfin, dans le cadre d'appels d'offres publics, l'utilisation de matériaux recyclés par une entreprise peut être valorisée par le biais de la notation de la valeur environnementale, permise par le code des marchés publics (art 38 et 52 de l'ordonnance 2015-899 du 23 juillet 2015). Le règlement de la consultation peut donc être rédigé dans ce sens, et le marché passé avec l'entreprise actera un engagement d'emploi de matériaux recyclés de la part de l'entreprise.

Quel que soit le motif de la demande de matériaux recyclés, il convient de se souvenir que l'entreprise est responsable et libre de ses choix de matériaux, et qu'une prescription trop précise ou trop insistante de la part du maître d'ouvrage peut être regardée comme une immixtion fautive.

Conclusion

Pour conclure ce mémoire, il est possible d'affirmer que les différentes techniques de recyclages ou de réemploi sur site de granulats dans des applications de voirie et réseaux divers sont matures sur le plan technique et peuvent présenter un intérêt économique ou environnemental certain.

Le rôle du maître d'œuvre à ce sujet sera d'abord de veiller au respect des règles de l'art, condition nécessaire à l'obtention de la qualité pour les ouvrages qu'il conçoit et fait exécuter. Différents outils techniques, normatifs et réglementaires sont à sa disposition, dont une très large palette d'essais sur les matériaux et les sols, disponible pour guider des travaux de conception ou vérifier les caractéristiques d'un ouvrage.

Les systèmes de certification environnementale (HQE, BREEAM, etc.) prennent en compte les impacts du recyclage et du réemploi de matériaux, et permettent aux équipes de projet de structurer leur réflexion sur ces sujets. Ces référentiels abordent un grand nombre de thématiques et leur emploi n'est pas encore aussi intégré dans la construction que les outils de chiffrage financier.

En tant que maître d'œuvre de VRD, il me serait utile de disposer de référentiels plus adaptés à l'échelle des projets dont j'ai la charge.

Liste des acronymes

ADEME : Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

AFNOR : Association Française de NORmalisation

BRGM : Bureau des Recherches Géologiques et Minières

CEN : Comité Européen de Normalisation

CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

DREIF : Direction Régionale de l'équipement d'Île-de-France

DTU : Document Technique Unifié

GES : Gaz à Effet de Serre

GNT : Grave Non Traitée

GTR : Guide des Terrassements Routiers (CORTE, et al., 2000)

HE : Hiver Exceptionnel

HRNE : Hiver Rigoureux Non Exceptionnel

IDRRIM : Institut Des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité

ISDI : Installation de stockage des déchets inertes

ISDND : Installation de stockage de déchets non-dangereux

ISDD : Installation de stockage de déchets dangereux

ISO : International Organisation for Standardization (organisation internationale de normalisation)

KT : milliers de tonnes

Mt : Millions de tonnes

NIMBY : Not In My Backyard (pas dans mon jardin)

PREDEC : Plan Régional de prévention et de gestion des Déchets issus des Chantiers du bâtiment et des travaux publics (Conseil régional d'Ile de France, 2015)

PL/j : Poids-Lourds par jour

ORDIF : Observatoire Régional des Déchets d'Île de France

SETRA : Service d'Etudes sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements

SNBPE : Syndicat National des producteurs de Béton Prêt à l'Emploi

SOGED : Schéma d'Organisation de la Gestion des Déchets

UNICEM : Union Nationale des Industries de Carrières et des Matériaux de Construction

Liste des annexes

Annexe 1 : Tableaux indiquant les caractéristiques et les conditions d'emploi en couche de forme des schistes de Noyelles-Godault (CORTE, et al., 2000)

Bibliographie

- A2C Matériaux. (2007). *une histoire gravée dans le Sable*. Récupéré sur A2C: <http://www.a2c-materiaux.com/livre>
- ADEME. (2017, 03 12). *Site Bilan GES*. Récupéré sur ADEME: <http://www.bilans-ges.ademe.fr/fr/basecarbone/donnees-consulter/choix-categorie>
- AFNOR. (2000). Art 8.2. Dans *NF P03-001*. Paris, France.
- AFNOR. (2007). *EN 1367-1 - Essais de détermination de propriétés thermiques et de l'altérabilité des granulats - Partie 1 : Détermination de la résistance au gel-dégel*. Paris: AFNOR.
- AFNOR. (2015). *NF P 94-100 - Essais d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement*. Paris, France.
- AFNOR. (2017, 02 19). *Foire aux questions*. Récupéré sur AFNOR: <http://normalisation.afnor.org/foire-aux-questions/>
- Association HQE - France GBC. (2016, juillet 13). Conseil d'administration. *Liste des membres*. Paris, France.
- Association HQE - France GBC. (2017, 01 14). *Membres*. Récupéré sur Association HQE: <http://www.hqegbc.org/association/membres/>
- association HQE. (2017, 01 07). *Membres - Association HQE*. Récupéré sur Site web association HQE: [ww.hqegbc.org/association/membres/](http://www.hqegbc.org/association/membres/)
- BARRACHET, F., & MARIN, B. (2015). Valorisation des matériaux alternatifs en techniques routières : Les laitiers sidérurgiques. *Journées COTITA Île-de-France*. Marne-la-Vallée: IFSTTAR.
- Bordes, P., Guinard, G., & Laurent, G. (1996). *L'entretien courant des chaussées - Guide pratique*. Bagneux: SETRA.
- BRE. (2015). *BREEAM Infrastructure - Technical Manual : Version : SD219 - Issue 2.0*. Watford, Royaume-Uni: BRE.

- BRE. (2016). *BREEAM Communities - Technical Manual SD202 - 1.1:2012*. Watford, Royaume-Uni: BRE.
- BRE Global. (2016). 2.0 Scope of the BREEAM International new construction 2016. Dans B. Global, *BREEAM International New construction 2016 - Technical manual SD233 1.0* (p. 454). Watford - Royaume-Uni: BRE Global.
- CBRE. (2014). *Match HQE vs BREEAM vs LEED*. Paris.
- CERC IDF. (2013). *Production des déchets de chantiers en Île-de-France et études connexes*. Paris: Conseil Régional d'Île-de-France.
- CERTIVEA. (2013, 03 01). HQE Aménagement - démarche certifiée par Certivea. *Liste des membres du comité d'application au 1er mars 2013*. Paris, France.
- CIMPELLI, C., LELONG, V., GARNIER, P., NAULEAU, L., SNAKKERS, M., UGUEN, D., . . . BROCHARD, D. (2003). *Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Île-de-France - Valorisation des excédents de déblais de travaux publics*. PARIS: Direction régionale de l'équipement d'Île-de-France.
- COLAS. (2013, Novembre). Notice technique - COLBASE. Boulogne-Billancourt, France.
- COLIN, S., & URVOIS, M. (2014). *Bilan d'activité 2013 de la base de données et du site internet "Carrières et matériaux". Rapport final, BRGM/RP-63268-FR, 52p., 10fig., 4 tab., 3ann*. Orléans: BRGM.
- Comité national Routier. (2017, 03 04). *Référentiel prix de revient / Benne TP 40T / Indices et statistiques*. Récupéré sur Comité national routier / CNR: <http://www.cnr.fr/fr/Indices-Statistiques/Benne-TP-40-T/Referentiel-prix-de-revient>
- Commissariat général au développement durable. (2016). *Les flux de marchandises - année 2014*. Paris: MEDDE.
- Commission européenne. (2008). *Directive n°2008/98/CE*. Bruxelles - Belgique.
- Commission Européenne. (2011, 08 24). Communication de la Commission dans le cadre de la mise en oeuvre de la directive 89/106/CEE du Conseil du 21 décembre 1988 relative au rapprochement des

- dispositions législatives, réglementaires et administratives des États membres concernant les produit. *Journal Officiel de l'Union Européenne*, p. C246/1.
- Conseil régional d'Ile de France. (2015). *Plan régional de prévention et de gestion des déchets issus des chantiers et bâtiment et de travaux publics*. Paris, France.
- Conseil Régional d'Île-de-France. (2013). Garantir un approvisionnement régional et/ou interrégional en matériaux. Dans *Schéma directeur de la région Île-de-France - 02 - Défis, projet spatial régional et objectifs* (pp. 158-159). Paris.
- CORTE, J., EDME, S., FEVRE, A., GILOPPE, D., GIROUY, J., HAVARD, H., . . . VEYSSET, J. (2000). *Réalisation des remblais et des couches de forme - Guide technique (GTR)*. PARIS: LRPC - SETRA.
- DE BOISSOUDY, A., DAUZATS, M., GOYON, V., KOBISCH, R., LEROUX, C., ODEON, H., . . . GUIDOUX, Y. (1998). Notice d'utilisation, annexe 3. Dans *Catalogue des structures de chaussées* (p. 23). Paris: SETRA.
- De Marco, L. (2013). Enrobés recyclés et caractéristiques des granulats - Du laboratoire au chantier. *Clôture de l'opération AGREGA*. Nantes: IFSTTAR - CEREMA.
- De Visscher, J. (2012). Performance des chaussées - Effets du recyclé sur les performances d'un mélange bitumineux. *Journées techniques 2012 - LAVOC - EPFL*. Lausanne: Centre de recherches routières.
- DESTOMBES, M. A., GOUX, M., AUSSÉDAT, G., BASUYAU, V., BRISSAUD, L., DROUADAINE, I., . . . BROCHARD, D. (2003). *Guide régional pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Île-de-France - Les bétons et produits de démolition recyclés*. Paris: DREIF.
- DETRY, J. (s.d.). *Quel avenir pour les contrôles des granulats recyclés en Wallonie*. CSTC.
- Docks de Limeil Brevannes. (s.d.). *Grave de Recyclage*. Limeil-Brévannes.
- DRIEE. (2016). *L'environnement industriel en Île-de-France*. Paris.
- Environnement magazine. (2008, 12 01). *Environnement-magazine.fr*. Récupéré sur Des granulats en transport combiné:

- <http://www.environnement-magazine.fr/article/4465-des-granulats-en-transport-combine/>
- EQIOM. (2015, Novembre). De l'alluvionnaire au calcaire, le train est en marche! *Empreinte - Le magazine développement durable d'EQIOM*, pp. 34-35.
- Fédération des industriels du béton. (2014). *Economie et gestion*. Paris.
- GAUVAIN, P. (2006). *Adaptation de la "Grave Mousse" pour son emploi par l'agence EUROVIA de Reims - Projet de fin d'études*. Strasbourg: INSA.
- INSEE. (2016, 12 31). *Prix et indices de prix*. Récupéré sur INSEE: http://www.bdm.insee.fr/bdm2/choixTheme?code=20#arbo:montre_rbranches=theme20/theme88/theme25/theme474
- INSEE. (2017, 02 12). *Nombre de logements commencés - Cumul sur douze mois - Total - Île-de-France - Estimations en date réelle*. Récupéré sur INSEE: <https://www.bdm.insee.fr/bdm2/affichageSeries?idbank=001718294&codeGroupe=1636>
- Inspection des Installations Classées - MEDDE. (2017, 01 07). *Recherche des IC*. Récupéré sur Inspection des installations classées: <http://www.installationsclassees.developpement-durable.gouv.fr/rechercheICForm.php>
- Inspection des installations classées. (2017, 02 17). *Résultats de la recherche*. Récupéré sur Inspection des installations classées: <http://www.installationsclassees.developpement-durable.gouv.fr/rechercheICForm.php>
- Institut d'Aménagement et d'Urbanisme. (2013). *Schémas départementaux des carrières - les installations de recyclage*.
- ISO. (2015). *norme ISO 9000 : système de management de la qualité - principes essentiels et vocabulaire*. La Plaine Saint Denis: AFNOR.
- ISO. (2015). *Système de management de la qualité - Exigences (ISO9001:2015, version corrigée)*. Paris: AFNOR.
- Leers, Y. (2016, février 10). Nouveaux déboires pour le PREDEC Ile de France. *Journal de l'environnement*.

- Légifrance. (2010). Article L515-3. Dans *Code de l'environnement*. Paris.
- Légifrance. (2015). Art L111-9. Dans *Code de la construction et de l'habitation*. Paris, France.
- Légifrance. (s.d.). Article 1792. Dans *Code Civil*. Paris - France.
- Mauduit, C. (s.d.). Prise en compte du gel-dégel. *COTITA centre-Est* (p. 14). Lyon: LRPC de Clermont-Ferrand.
- Ministère de l'Ecologie, du développement durable et de l'Energie. (2017, 02 04). *Tableaux détaillés*. Récupéré sur Eider: <http://www.stats.environnement.developpement-durable.gouv.fr/Eider>
- Ministère de l'environnement, du développement durable et de l'énergie. (1994). *Arrêté du 30/09/16 modifiant l'arrêté du 22 septembre 1994 relatif aux exploitations de carrières et aux installations de premier traitement des matériaux de carrières*. PARIS: JO.
- Ministère de l'environnement, du développement durable et de l'énergie. (2012). *Arrêté du 26/11/12 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations de broyage, concassage, criblage, etc., relevant du régime de l'enregistrement au titre de la rubrique n° 2515 de la nomenclature des installations classées pour la prote.* PARIS: JO.
- Ministère de l'environnement, du développement durable et de l'énergie. (2013). *Arrêté du 10/12/13 relatif aux prescriptions générales applicables aux stations de transit de produits minéraux ou de déchets non dangereux inertes autres que ceux visés par d'autres rubriques relevant du régime de l'enregistrement au titre de la rubrique*. Paris: JO.
- Ministère de l'environnement, du développement durable et de l'énergie. (2014). *Arrêté du 12/12/14 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations du régime de l'enregistrement relevant de la rubrique n° 2760 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement*. Paris: JO.
- Nelfia, L. O., Turcry, P., Amiri, O., Mahieux, P.-Y., & Amine, Y. (2013). *Incorporation de fines de béton de démolition dans la fabrication de*

- mortier par substitution du ciment*. La Rochelle: Université de La Rochelle.
- ORDIF. (2016). *Tableau de bord des déchets franciliens*. PARIS.
- Parlement Européen. (2011). *Règlement (UE) N°305/2011 établissant les conditions harmonisées de commercialisation pour les produits de construction et abrogeant la directive 89/106/CEE du conseil*. Bruxelles.
- Préfecture de Seine et Marne. (2014). *Schéma départemental des carrières - Seine et Marne 2014-2020*. Melun: Préfecture de Seine et Marne.
- Qualitel. (2016). *Référentiel Qualité construction logement NF500-10 version 2.1*. Paris.
- Société du Grand Paris. (2016). *Appel à Projet d'innovation sur la gestion des déblais du Grand Paris Express - note technique*. Saint-Denis, France.
- Syndicat des recycleurs du bâtiment et des travaux publics. (2014). *Guide de conception et de fonctionnement des installations de traitement des déchets du BTP*. PARIS: SRBTP.
- Syndicat Français de l'Industrie Cimentière. (2015). *Infociments 2015 - l'Essentiel*. Paris-La Défense: SFIC.
- Syndicat national du béton prêt à l'emploi. (2015). *L'industrie française du béton prêt à l'emploi en 2014*. PARIS: UNICEM.
- Syntec Ingénierie. (2017, 03 05). *l'Ingénierie*. Récupéré sur Syntec-Ingénierie: <http://www.syntec-ingenierie.fr/lingenierie/>
- UNICEM. (2015). *brochure statistique 2014*. PARIS: UNICEM.
- UNICEM. (2015). *Les matériaux de construction en Île-de-France - année 2014*. Paris: UNICEM.
- UNICEM. (2015). *L'industrie française des granulats*. Paris.
- UNICEM. (2017). *L'industrie Française des granulats en 2015*. PARIS: UNICEM.
- USIRF. (2015). *Bilan environnemental 2014*. Paris: USIRF.
- USIRF. (2017, 01 07). Récupéré sur Eco-comparateur SEVE: www.seve-tp.fr
- WEBER, L. (1997). *L'Etat, acteur économique*, 3ème édition. Economica.

World Green Building Council. (2017, 02 03). *Rating tools*. Récupéré sur World Green Building Council: <http://www.worldgbc.org/rating-tools>

Liste des figures

Figure 1 : exemple de courbe granulométrique (source : fiche produit grave HQE 0/31.5, RFM).....	12
Figure 2 : Courbe donnant la relation entre la teneur en eau (W), la densité (en rouge) et l'IPI (en vert) - source : fiche produit STABIBASE - AMR.....	15
Figure 3 : granulats roulés et semi-roulés (quelques faces cassées)	17
Figure 4 : granulats concassés.....	17
Figure 5 : Classification "GTR" - Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature (CORTE, et al., 2000)	20
Figure 6 : catégorisation des graves de recyclage par le guide technique régional IDF (DESTOMBES, et al., 2003)	21
Figure 7 : diagramme simplifié du cycle des matériaux	22
Figure 8 : Schéma de principe de l'installation DLB de Gonesse (Syndicat des recycleurs du bâtiment et des travaux publics, 2014).....	24
Figure 9 : carte des carrières en Ile de France (source IAU, 2013) – Les points représentent des carrières, tandis que les aplats de couleurs représentent les gisements de matériaux.....	29
Figure 10 : Carte des installations de recyclage en Ile-de-France (source IAU, 2013)	30
Figure 11 : carte des cantons abritant des installations de recyclage de matériaux et/ou des carrières de granulats ou des ISDI.....	31
Figure 12 : carte de la Bassée entre Montereau-Fault-Yonne et Bray-sur-Seine. Les étangs sont des carrières en cours d'exploitation ou épuisées (source : Google Maps – la carte couvre une surface d'environ 20km par 12)	33
Figure 13 : Surfaces autorisées de carrières de granulats alluvionnaires selon les bassins de gisement (en ha) - source : Driee/Unicem.....	33
Figure 14 : évolution de la production de granulats en Île de France	36

Figure 15 : hiérarchie des modes de gestion des déchets selon le code de l'environnement (art L541-1).....	42
Figure 16 : exemple d'étiquette d'information Marquage CE (source : DLB) – la mention « APD » signifie « aucune performance déclarée »....	50
Figure 17 : évolution du coût des matériaux naturels face à l'indice des prix à la consommation (base 100 en 2000).....	58
Figure 18 : évolution du coût des matériaux naturels face au coût de la construction neuve à usage d'habitation (base 100 en 2000)	58
Figure 19 : évolution du coût des matériaux naturels face au coût de la production industrielle (base 100 en 2000).....	59
<i>Figure 20 : mécanisme de gel d'une chaussée et chronologie de pose de barrière de dégel (Bordes, Guinard, & Laurent, 1996)</i>	<i>92</i>
Figure 21 : Effets de la circulation sur une chaussée à la suite d'un phénomène de succion cryogénique (Source : Conseil Départemental des Deux-Sèvres).....	93
Figure 22 : installation pour essai de gonflement au gel	94
Figure 23 : Classes indicatives de sensibilité au gel	95
Figure 24 : Photographies des désordres observés sur le site de Noyelles-Godault	97
Figure 25 : Principe de vérification au gel-dégel selon le catalogue des structures type de chaussées neuves	99
Figure 26 : extrait de l'abaque de détermination de la quantité de gel admissible IA de la chaussée en EME2.....	101
Figure 27 : scénarii de réemploi de matériaux	104
Figure 28 : Réemploi sur place de matériaux - arbre de décision ..	106

Liste des tableaux

Tableau I : Liste des ISDI actives en Île-de-France.....	27
Tableau II : liste des ISDND et ISDD actives en Île-de-France	28
Tableau III : production de granulats comparée entre l'Île-de-France et la France entière.....	34
Tableau IV : estimation du coût du marquage CE d'une production de granulat recyclé.....	56
Tableau V : critères du référentiel "BREEAM Communities"	66

Tableau VI : critères du référentiel BREEAM Infrastructure	69
Tableau VII : Critères de certification HQE Infrastructures.....	74
Tableau VIII : grille des points d'attention du législateur concernant les effets sur l'environnement des installations de production de granulats .	83
Tableau IX : Statistique des transports de marchandises en France en 2014	85
Tableau X : Statistiques des transports de marchandises en Île-de-France en 2014	86
Tableau XI : Emission de GES lors de la production et de la fin de vie des granulats	87
Tableau XII : émissions de GES générées par le transport de granulats	88
Tableau XIII : Caractéristiques des matériaux employés en structure de chaussée sur le site de Noyelles-Godault (source GINGER-CEBTP)	98

Liste des équations

Équation 1 : Réaction de formation de l'ettringite	90
Équation 2 : Réaction de formation du monosulfoaluminate de calcium	90
Équation 3 : Réaction de formation de la thaumasite	90
Équation 4 : Calcul du trafic cumulé sur la plateforme de Noyelles-Godault	99
Équation 5 : calcul et application numérique de la quantité de gel admissible en surface des schistes rouges.....	100
Équation 6 : calcul de la protection apportée par la couche non-gélive	100
Équation 7 : Application numérique du calcul de la protection apportée par la couche de matériaux non-gélifs (GNT) épaisse de 30cm	100
Équation 8 : Application numérique du calcul de la quantité de gel admissible par la chaussée avec une couche de GNT épaisse de 30cm.	100
Équation 9 : application numérique du calcul de la quantité de gel admissible par la chaussée avec une couche de GNT épaisse de 70 cm.	101

ANNEXE N°1 :

**TABLEAUX INDIQUANT LES CARACTERISTIQUES ET LES
CONDITIONS D'EMPLOI EN COUCHE DE FORME DES
SCHISTES DE NOYELLES-GODAULT**

Source : Guide des terrassements routiers (CORTE, et al., 2000)

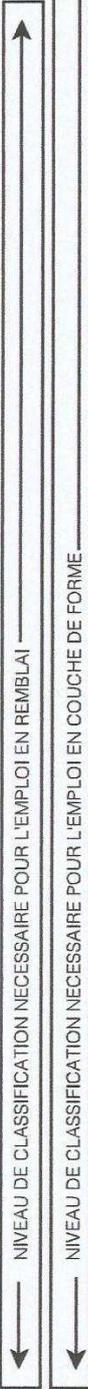
Classe C

SOLS COMPORTANT DES FINES ET DES GROS ELEMENTS

Classe		Classement selon la nature			Classement selon l'état hydrique et le comportement
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous-classe fonction de la nature	Caractères principaux	
<p>D_{max} > 50mm et tamisat à 80 µm > 12% ou si le tamisat à 80 µm ≤ 12% la VBS est > 0,1</p> <p>C</p> <p>Sols comportant des fines et des gros éléments</p>	Matériaux anguleux dont la proportion de la fraction 0/50 mm dépasse 60 à 80% et Matériaux roulés La fraction 0/50 mm est un sol de la classe A	C ₁ A ₁ Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, moraines, alluvions grossières...	Le comportement des sols de cette classe peut être assez justement apprécié par celui de leur fraction 0/50 mm. L'évaluation de la proportion de la fraction 0/50 mm est cependant nécessaire dans le cas des sols constitués d'éléments anguleux. Celle-ci peut se faire visuellement par un géotechnicien expérimenté dès que le D _{max} du sol dépasse 200 mm. L'identification des sols de cette classe doit être précisée à l'aide d'un double symbole de type C ₁ (A ₁) ou C ₁ (B ₁), A ₁ ou B ₁ étant respectivement la classe de la fraction 0/50 mm du matériau considéré. On peut encore très utilement compléter cette identification en indiquant la valeur du D _{max} présent dans le sol. Ainsi, par exemple, un sol classé : C ₁ 400 (A ₁) correspond à un sol roulé ou anguleux ayant plus de 60 à 80% d'éléments < 50 mm, dont les plus gros éléments ont une dimension de 400 mm et dont la fraction 0/50 mm est de type A ₁ .	<p>C₁A₁ C₁A₂ C₁A₃ C₁A₄</p> <p>C₁B₁₁ C₁B₁₂ C₁B₃₁ C₁B₃₂</p> <p>C₁B₂₁ C₁B₂₂ C₁B₄₁ C₁B₄₂ C₁B₅₁ C₁B₅₂ C₁B₆</p> <p>état th, h, m, s ou ts</p> <p>Matériaux généralement insensibles à l'état hydrique</p> <p>état th, h, m, s ou ts</p>	
	Matériaux anguleux dont la proportion de la fraction 0/50 mm dépasse 60 à 80% et Matériaux roulés La fraction 0/50 mm est un sol de la classe B	C ₂ B ₁ Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, moraines, alluvions grossières...	Le comportement des sols de cette classe dépend aussi de la fraction 50/D présente et ne peut plus être assimilé à celui de la seule fraction 0/50 mm. L'importance de cette influence est toujours difficile à évaluer (fonction de la continuité granulométrique et de l'angularité des éléments grenus) en raison des difficultés pratiques qu'il y a à réaliser des essais de laboratoire sur ces matériaux. Il est néanmoins utile, comme pour les C ₁ , de préciser l'identification des sols de cette classe à l'aide d'un double symbole de type C ₂ (A ₁) ou C ₂ (B ₁), A ₁ ou B ₁ étant respectivement la classe de la fraction 0/50 mm du matériau considéré. De même cette identification pourra être très utilement complétée par l'indication du D _{max} présent dans le sol (C ₂ classe C ₁). Des essais en semi ou vraie grandeur seront souvent nécessaires pour caler l'interprétation des mesures réalisées sur la fraction 0/50 mm.		
	Matériaux anguleux comportant une fraction 0/50 mm ≤ 60 à 80%. La fraction 0/50 mm est un sol de la classe A ₁	C ₂ A ₁ Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, biefs à silex...			
Matériaux anguleux comportant une fraction 0/50 mm ≤ 60 à 80%. La fraction 0/50 mm est un sol de la classe B ₁	C ₂ B ₁ Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, biefs à silex...				

Classe B

SOLS SABLEUX ET GRAVELEUX AVEC FINES

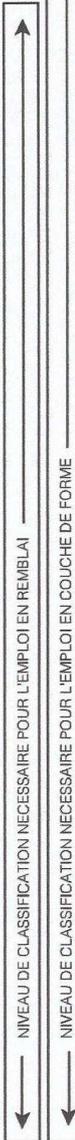


Classement selon la nature			Classement selon l'état hydrique		Classement selon le comportement	
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous-classe fonction de la nature	Caractères principaux	Paramètres et valeurs de seuils retenus	Sous-classe	Sous-classe
B Sols sableux et graveleux avec fines D _{max} ≤ 50 mm et tamisat à 80 µm ≤ 35%	- tamisat à 80 µm ≤ 12% - tamisat à 2 mm > 70% - 0.1 < VBS ≤ 0.2 ou ES > 35	B ₁ Sables silteux...	Matériaux sableux généralement insensibles à l'eau. Mais, dans certains cas (extraction dans la nappe...), cette insensibilité devra être confirmée (étude complémentaire, planche d'essais...). Leur emploi en couche de forme nécessite, par ailleurs, la mesure de leur résistance mécanique (friabilité des sables FS).	FS ≤ 60	B ₁₁	B ₁₁
	- tamisat à 80 µm ≤ 12% - tamisat à 2 mm > 70% - VBS ≤ 0.2 ou ES ≤ 35	B ₂ Sables argileux (peu argileux)...	La plasticité de leurs fines rend ces sols sensibles à l'eau. Leur temps de réaction aux variations de l'environnement hydrique et climatique est court, tout en pouvant varier assez largement (fonction de perméabilité). Lorsqu'ils sont extraits dans la nappe et mis en dépôt provisoire, ils conservent un état hydrique "humide" à "très humide"; il est assez peu probable, en climat océanique, que leur état hydrique puisse s'améliorer jusqu'à devenir "moyen". Leur emploi en couche de forme sans traitement avec des LH nécessite, par ailleurs, la mesure de leur résistance mécanique (friabilité des sables FS).	IPI ≤ 4 ou $w_n \geq 1,25 w_{OPN}$	B ₂₁ th B ₂₂ th	B ₂₁ th B ₂₂ th
				4 < IPI ≤ 8 ou 1,10 $w_{OPN} \leq w_n < 1,25 w_{OPN}$	B ₂ h	B ₂ h
				0,9 $w_{OPN} \leq w_n < 1,10 w_{OPN}$	B ₂ m	B ₂₁ m B ₂₂ m
				0,5 $w_{OPN} \leq w_n < 0,9 w_{OPN}$	B ₂ s	B ₂₁ s B ₂₂ s
				$w_n < 0,5 w_{OPN}$	B ₂ ts	B ₂₁ ts B ₂₂ ts
		B ₃ Graves silteuses...	Matériaux graveleux généralement insensibles à l'eau. Mais, dans certains cas (extraction dans la nappe...), cette insensibilité devra être confirmée (étude complémentaire, planche d'essais...). Leur emploi en couche de forme sans traitement avec des LH nécessite, par ailleurs, la mesure de leur résistance mécanique (Los Angeles, LA, et Micro Deval en présence d'eau, MDE).	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₃₁	B ₃₁
				LA > 45 ou MDE > 45	B ₃₂	B ₃₂

Les paramètres inscrits en caractères gras sont ceux dont le choix est à privilégier.

Classe B (suite)

SOLS SABLEUX ET GRAVELEUX AVEC FINES (suite)



Classement selon la nature			Classement selon l'état hydrique		Classement selon le comportement		
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Caractères principaux	Paramètres et valeurs de seuils retenus	Sous-classe	Sous-classe	
B Sol sableux et graveleux avec fines D _{max} ≤ 50 mm et tamisat à 80 µm ≤ 35%	- tamisat à 80 µm ≤ 12% - tamisat à 2 mm ≤ 70% - VBS > 0,2 ou ES ≤ 25	B ₄ Graves argileuses (ou argileuses),...	La plasticité de leurs fines rend ces sols sensibles à l'eau. Ils sont plus graveleux que les sols B ₁ et leur fraction sableuse est plus faible. Pour cette raison, ils sont en général perméables. Ils réagissent assez rapidement aux variations de l'environnement hydrique et climatique (humidification - séchage). Lorsqu'ils sont extraits dans la nappe, il est assez peu probable, en climat océanique, que leur état hydrique puisse s'améliorer jusqu'à devenir "moyen". Leur emploi en couche de forme sans traitement avec des LH nécessite, par ailleurs, la mesure de leur résistance mécanique (Los Angeles, LA, et/ou Micro Deval en présence d'eau, MDE).	$IP \leq 7$ ou $w_n \geq 1,25 w_{OPN}$ $7 < IP \leq 15$ ou $1,10 w_{OPN} \leq w_n < 1,25 w_{OPN}$ $0,9 w_{OPN} \leq w_n < 1,10 w_{OPN}$ $0,6 w_{OPN} \leq w_n < 0,9 w_{OPN}$ $w_n < 0,6 w_{OPN}$	B ₄ th B ₄ h B ₄ m B ₄ s B ₄ ls	B ₄ th B ₄ h B ₄ m B ₄ s B ₄ ls	B ₄ th B ₄ h B ₄ m B ₄ s B ₄ ls
		B ₃ Sables et graves très silleux...	La proportion de fines et la faible plasticité de ces dernières, rapprochent beaucoup le comportement de ces sols de celui des sols A ₁ . Pour la même raison qu'indiquée à propos des sols A ₁ , il y a lieu de préférer le critère VBS au critère Ip pour l'identification des sols B ₃ . Leur emploi en couche de forme sans traitement avec des LH nécessite de connaître leur résistance mécanique (Los Angeles, LA, et/ou Micro Deval en présence d'eau, MDE).	$IP \leq 5$ ou $w_n \geq 1,25 w_{OPN}$ $5 < IP \leq 12$ ou $1,10 w_{OPN} \leq w_n < 1,25 w_{OPN}$ $12 < IP \leq 30$ ou $0,9 w_{OPN} \leq w_n < 1,10 w_{OPN}$ $0,6 w_{OPN} \leq w_n < 0,9 w_{OPN}$ $w_n < 0,6 w_{OPN}$	B ₃ th B ₃ h B ₃ m B ₃ s B ₃ ls	B ₃ th B ₃ h B ₃ m B ₃ s B ₃ ls	B ₃ th B ₃ h B ₃ m B ₃ s B ₃ ls
		B ₅ Sables et graves, argileux à très argileux	L'influence des fines est prépondérante : le comportement du sol se rapproche de celui du sol fin ayant même plasticité que les fines du sol avec toutefois une plus grande sensibilité à l'eau due à la présence de la fraction sableuse en plus grande quantité.	$IP \leq 4$ ou $w_n \geq 1,3 w_{OPN}$ ou $IC \leq 0,8$ $4 < IP \leq 10$ ou $0,8 < IC \leq 1$ ou $1,1 w_{OPN} \leq w_n < 1,3 w_{OPN}$ $10 < IP \leq 25$ ou $1 < IC \leq 1,2$ ou $0,9 w_{OPN} \leq w_n < 1,1 w_{OPN}$ ou $1,2 < IC \leq 1,3$ $0,7 w_{OPN} \leq w_n < 0,9 w_{OPN}$ ou $1,2 < IC \leq 1,3$ $w_n < 0,7 w_{OPN}$ ou $IC > 1,3$	B ₅ th B ₅ h B ₅ m B ₅ s B ₅ ls	B ₅ th B ₅ h B ₅ m B ₅ s B ₅ ls	B ₅ th B ₅ h B ₅ m B ₅ s B ₅ ls

Les paramètres inscrits en caractères gras sont ceux dont le choix est à privilégier.

CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN COUCHE DE FORME

C₁B_{22'} C₁B_{42'} C₁B_{52'} C₂B_{22'} C₂B_{42'} C₂B_{52'}

Classe de sol	Observations générales	Situation météorologique	Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Epaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plateforme support de chaussée				
					PST n° 1	PST n° 2	PST n° 3		PST n° 4
					AR 1	AR 1	AR 1	AR 2	AR 2
C ₁ B ₂₂ h C ₁ B ₄₂ h C ₁ B ₅₂ h C ₂ B ₂₂ h C ₂ B ₄₂ h C ₂ B ₅₂ h	Les sols de ces classes sont constitués d'une fraction argileuse en faible quantité et d'une fraction graine grossière relativement friable susceptible de se fragmenter sous l'action du trafic de chantier en produisant un complément d'éléments fins sensibles à l'eau.	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant (s)	NON				
		= ou -	pas de pluie	G : Elimination de la fraction grossière empêchant le malaxage correct du sol avec le (ou les) liant(s) T : Traitement avec un liant hydraulique associé éventuellement à la chaux S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	2 0 2 1				
C ₁ B ₂₂ m C ₁ B ₄₂ m C ₁ B ₅₂ m C ₂ B ₂₂ m C ₂ B ₄₂ m C ₂ B ₅₂ m	Pour utiliser ces sols en couche de forme il est nécessaire de les traiter avec des liants hydrauliques. Le traitement n'est cependant possible que dans la mesure où un malaxage homogène à l'aide de malaxeurs à outils animés (pulvimixers...) est réalisable dans des conditions acceptables. Ceci suppose soit que l'on procède à l'élimination préalable des éléments grossiers interdisant le fonctionnement correct du malaxeur, soit que le malaxeur utilisé puisse absorber et fragmenter ces éléments grossiers.	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant (s)	NON				
		= ou -	pas de pluie	G : Elimination de la fraction grossière empêchant le malaxage correct du sol avec le liant W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique du mélange sol + liant T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	2 1 1 1	(1)	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF3
C ₁ B ₂₂ s C ₁ B ₄₂ s C ₁ B ₅₂ s C ₂ B ₂₂ s C ₂ B ₄₂ s C ₂ B ₅₂ s		+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON				
		= ou -	pas de pluie	G : Elimination de la fraction grossière empêchant le malaxage correct du sol avec le liant W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique du mélange sol + liant T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	2 2 1 1				

(1) Sur cette PST, la mise en oeuvre d'un matériau traité répondant à une qualité "couche de forme" n'est pas réalisable. Procéder d'abord à un traitement selon une technique "remblai" et se rapporter alors au cas de PST n°4 si l'effet du traitement est durable et aux cas PST n°2 ou 3 s'il ne l'est pas.

CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN COUCHE DE FORME

C₁A₃ et C₂A₃ (m et s) - C₁A₄, C₂A₄ - C₁B₁₁, C₁B₃₁, C₂B₁₁, C₂B₃₁, C₁B₁₂, C₁B₃₂, C₂B₁₂, C₂B₃₂

Classe de sol	Observations générales	Situation météorologique	Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Epaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plate-forme support de chaussée					
					PST n° 1	PST n° 2	PST n° 3		PST n° 4	
					AR 1	AR 1	AR 1	AR 2	AR 2	
C ₁ A _{3m} C ₂ A _{3m}	Les sols de cette classe sont sensibles à l'eau et très plastiques malgré la présence d'une fraction granulaire grossière assez importante. Leur emploi en couche de forme implique donc nécessairement un traitement soit avec de la chaux seule soit en associant chaux + liants hydrauliques. Le traitement n'est cependant possible que dans la mesure où un malaxage homogène à l'aide de malaxeurs à outils animés (pulvimixers...) est réalisable dans des conditions économiques acceptables. Ceci suppose soit que l'on procède à l'élimination préalable des éléments grossiers interdisant le fonctionnement correct du malaxeur, soit que le malaxeur utilisé puisse absorber et fragmenter ces éléments grossiers. Lorsque ces sols sont dans un état sec leur emploi en couche de forme, même traités, n'est pas à conseiller en raison de la difficulté qu'il y a à les humidifier de manière homogène.	+ pluie faible = ou - pas de pluie	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s) Solution 1 : G : Elimination de la fraction grossière empêchant un malaxage correct du sol avec le (ou les) liant(s) W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement mixte chaux + ciment S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté Solution 2 : G : Elimination de la fraction grossière empêchant un malaxage correct du sol avec le (ou les) liant(s) W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement à la chaux seule S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	NON 2 1 3 2 2 1 4 2	(1)	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF3	e = 0,35 PF3	
										(3) e = 0,5 PF2
C ₁ A _{3s} C ₂ A _{3s} C ₁ A ₄ C ₂ A ₄	Sols normalement inutilisables en couche de forme									
C ₁ B ₁₁ C ₁ B ₃₁ C ₂ B ₁₁ C ₂ B ₃₁	On considère ici les sols des classes C ₁ et C ₂ dont la fraction 0/50 est insensible à l'eau et suffisamment résistante pour que ces sols puissent être utilisés en couche de forme : - soit dans leur état naturel après élimination des éléments grossiers incompatibles avec les exigences de nivellement de la plate forme - soit traités avec un liant hydraulique après élimination des éléments grossiers empêchant le malaxage homogène du sol avec le liant ou son élaboration dans une centrale.	++ ou + = ou - pas de pluie	G : Elimination de la fraction grossière empêchant un réglage correct de la plate-forme Solution 1 : G : Elimination de la fraction grossière empêchant un réglage correct de la plate-forme Solution 2 : G : Elimination de la fraction grossière empêchant un malaxage correct du sol avec le liant W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique du mélange sol + liant T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	3 0 0 0 3 0 0 0 2 1 1 1	(1)	e = 0,75 ou (2) e = 0,6 PF2	e = 0,5 ou (2) e = 0,4 PF2	e = 0,4 ou (2) e = 0,3 PF2	e = 0,3 ou (2) e = 0,2 PF2	(5)
C ₁ B ₁₂ C ₁ B ₃₂ C ₂ B ₁₂ C ₂ B ₃₂	Bien qu'insensibles à l'eau ces sols sont constitués d'éléments relativement friables qui interdisent leur emploi en couche de forme sans traitement avec un liant hydraulique. Le traitement impose par ailleurs un malaxage homogène à l'aide de malaxeurs à outils animés ou l'élaboration dans une centrale. Ceci suppose l'élimination des éléments grossiers incompatibles avec la bonne exécution du malaxage.	+ pluie faible = ou - pas de pluie	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant G : Elimination de la fraction grossière empêchant un malaxage correct du sol avec le liant W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique du mélange sol + liant T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	NON 2 1 1 1	(1)	PF2	PF2	PF3	PF3	

(1) Sur cette PST, la mise en œuvre d'un matériau traité répondant à une qualité "couche de forme" n'est pas réalisable. Procéder d'abord à un traitement selon une technique "remblai" et se rapporter alors au cas de PST n°4 si l'effet du traitement est durable et aux cas PST n°2 ou 3 s'il ne l'est pas.

(2) Si intercalation d'un géotextile à l'interface PST-couche de forme.

(3) Mise en œuvre en 2 couches.

(4) cf. note 3 p. 63

(5) cf. note 3 p. 60

Résumé

Utilisation de matériaux recyclés en voirie et réseaux divers – qualité des ouvrages du point de vue du maître d'œuvre. Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Paris 2017.

RESUME

Le maître d'œuvre VRD est chargé de veiller à la qualité des travaux de voirie et réseaux divers et au respect des exigences du maître d'ouvrage. Pour des raisons tant économiques qu'environnementales, les matériaux recyclés sont de plus en plus utilisés pour ces ouvrages. Il existe deux modalités de recyclage : les installations industrielles représentent une réelle alternative tant pour la fourniture de matériaux que pour la prise en charge des déchets générés par les chantiers. Le réemploi des matériaux sur site nécessite par contre que soient diligentés des essais géotechniques, dont le coût peut être sensible, et que les règles de l'art soient respectées. L'inobservation de ces règles peut parfois entraîner des désordres très importants. Le rôle du maître d'œuvre est de déterminer le rapport bénéfique/risque associé à ces opérations et d'en rendre compte au maître d'ouvrage.

Mots clés : recyclage, construction de voiries et réseaux divers, réemploi de matériaux, maîtrise d'œuvre, granulats

SUMMARY

The project manager in road and utilities construction has to ensure the quality of these works and the respect of the project owner needs. For both economic and environmental reasons, the use of recycling aggregates is increasing in this type of infrastructures. Two ways exist for recycling: industrial plants offer a real alternative both for aggregate supply and construction waste management. However, the on-site re-use of material needs geotechnical test, which could be costly, and compliance with standard professional practices. Disrespect of these standards may cause very important damages. The project manager's role is to determine risk/benefice ratio and report to his project owner on it.

Key words: recycling, road and utilities construction, re-use of materials, construction management, aggregates