



HAL
open science

Caractérisation des sédiments fins des retenues hydroélectriques en vue d'une orientation vers des filières de valorisation matière

Baptiste Anger

► **To cite this version:**

Baptiste Anger. Caractérisation des sédiments fins des retenues hydroélectriques en vue d'une orientation vers des filières de valorisation matière. Géotechnique. Université de Caen Basse-Normandie, 2014. Français. NNT : 2014CAEN2034 . tel-01938082

HAL Id: tel-01938082

<https://normandie-univ.hal.science/tel-01938082v1>

Submitted on 28 Nov 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.

Université de Caen Basse-Normandie

Ecole doctorale SIMEM

Thèse de doctorat

présentée et soutenue le 17 décembre 2014

par

Baptiste ANGER

pour obtenir le

Doctorat de l'Université de Caen Basse-Normandie

Spécialité : Génie civil

**Caractérisation des sédiments fins des retenues hydroélectriques
en vue d'une orientation vers des filières de valorisation matière**

Directeur de thèse : Daniel LEVACHER

Membres du jury

- Rapporteurs : **Irini DJERAN-MAIGRE**, Professeur, INSA Lyon
Bernard HUSSON, Maître de Conférences HDR, INSA Toulouse
- Examineurs : **François BUYLE-BODIN**, Professeur, Université de Lille 1
Miren ETXEBERRIA, Associate Professor, UPC Barcelone, Espagne
Didier MAROT, Professeur, Université de Nantes
Claire PEYRATOUT, Professeur, ENSCI Limoges
François THERY, Ingénieur, EDF R&D, Moret-sur-Loing (Tuteur industriel)
- Invités : **Dimitri DENELE**, Chargé de Recherche, IFSTTAR Nantes
Fatiha KAZI AOUAL, Maître de Conférences, ENP Oran, Algérie
Isabelle MOULIN, Ingénieur Expert, LERM Paris
- Directeur de thèse : **Daniel LEVACHER**, Professeur, Université de Caen Basse-Normandie

SOMMAIRE

Abréviations et notations	5
Entreprises, organismes et administrations	5
Liste des abréviations	5
Liste des notations	5
Chapitre 1 Introduction et contexte général	7
1. Contexte.....	8
2. Qualification des matériaux étudiés	9
3. La nécessité d'une gestion des sédiments de barrage	9
3.1. <i>Processus de sédimentation des retenues</i>	10
3.2. <i>Impacts des accumulations sédimentaires</i>	11
3.3. <i>Opérations de gestion des sédiments</i>	12
3.4. <i>Contraintes liées à la gestion des sédiments fins</i>	13
4. Contexte réglementaire de la gestion des sédiments	14
4.1. <i>Remise en suspension</i>	14
4.2. <i>Gestion à terre</i>	14
4.3. <i>Dangerosité des sédiments</i>	15
5. Objectifs et démarches	16
5.1. <i>Filières potentielles pressenties</i>	16
5.2. <i>Paramètres clés</i>	17
5.3. <i>Hypothèse de travail</i>	18
6. Organisation du document	18
Chapitre 2 Etat de l'art des cinq filières potentielles pressenties	21
Introduction	22
1. La filière « ciment ».....	23
1.1. <i>Description</i>	23
1.2. <i>Spécifications</i>	29
1.3. <i>Application aux sédiments</i>	36
1.4. <i>Conclusion</i>	44
2. La filière « bétons, mortiers, coulis »	46
2.1. <i>Description</i>	46
2.2. <i>Spécifications</i>	52
2.3. <i>Application aux sédiments</i>	56
2.4. <i>Conclusion</i>	60
3. La filière « matériau routier et assimilé »	61
3.1. <i>Description</i>	61
3.2. <i>Spécifications</i>	66
3.3. <i>Application aux sédiments</i>	73
3.4. <i>Conclusion</i>	78
4. La filière « matériau céramique »	79
4.1. <i>Description</i>	79
4.2. <i>Spécifications</i>	88
4.3. <i>Application aux sédiments</i>	95
4.4. <i>Conclusion</i>	106
5. La filière « agronomique ».....	108
5.1. <i>Description</i>	108
5.2. <i>Spécifications</i>	115
5.3. <i>Application aux sédiments</i>	120
5.4. <i>Conclusion</i>	128
Conclusion du chapitre	129
Chapitre 3 Origine et caractérisations des sédiments	131
Introduction	132
1. Origine et prélèvement des sédiments étudiés	133
1.1. <i>Localisation des sédiments prélevés et codification</i>	133
1.2. <i>Le sédiment DUR</i>	133

1.3. Le sédiment GAR.....	134
1.4. Le sédiment ISE.....	135
1.5. Le sédiment RHI.....	135
2. Caractérisations minérale et géotechnique des sédiments	137
2.1. Caractérisation physico-chimique.....	138
2.2. Caractérisation minéralogique	145
2.3. Caractérisation hydromécanique	153
2.4. Synthèse des principales caractéristiques des sédiments	163
3. Caractérisation agronomique	164
3.1. Paramètres analysés.....	164
3.2. Résultats de la caractérisation agronomique	164
4. Interprétation des résultats selon les filières	168
4.1. La filière « ciment ».....	168
4.2. La filière « bétons, mortiers, coulis ».....	170
4.3. La filière « matériau routier et ouvrage géotechnique ».....	172
4.4. La filière « matériau céramique ».....	174
4.5. La filière « agronomie ».....	177
Conclusion du chapitre	182
Chapitre 4 Mise en œuvre dans les filières.....	187
Introduction	188
1. La filière « ciment ».....	190
1.1. Elaboration des crus	190
1.2. Caractérisation des produits de cuisson	192
1.3. Conclusion sur l'aptitude des sédiments à être valorisés dans la filière.....	195
2. La filière « bétons et mortiers »	196
2.1. Formulation et confection des mortiers.....	196
2.2. Caractérisation des mortiers à l'état frais	197
2.3. Caractérisation des mortiers à l'état durci	198
2.4. Conclusion sur l'aptitude des sédiments à être valorisés dans la filière.....	201
3. La filière « matériau routier et assimilé »	203
3.1. Composition des mélanges et confection des éprouvettes	203
3.2. Approche expérimentale et essais de validation mécanique et de durabilité	204
3.3. Analyse des propriétés des sédiments traités à partir de la résistance en compression sur éprouvettes	205
3.4. Co-valorisation et liant alternatif : une cendre volante issue de l'industrie papetière	207
3.5. Conclusion sur l'aptitude des sédiments à être valorisés dans la filière.....	207
4. La filière « matériau céramique »	209
4.1. Mise en forme à partir d'une suspension	209
4.1. Mise en forme à partir d'une pâte plastique	212
4.2. Conclusion sur l'aptitude des sédiments à être valorisés dans la filière.....	216
5. Potentiel de valorisation des sédiments fins calcinés.....	217
5.1. Matière première pour l'élaboration de pouzzolanes artificielles	217
5.2. Matière première pour l'élaboration de géopolymères.....	218
Conclusion du chapitre	221
Chapitre 5 Vers un outil décisionnel de pré-orientation.....	223
Introduction	224
1. Adéquation technique	225
1.1. Cadre méthodologique d'évaluation du potentiel des sédiments fins à être valorisés	225
1.2. Application aux sédiments fins de barrage étudiés	236
1.3. Limites et perspectives.....	243
1.4. Proposition d'une caractérisation permettant d'accéder au jeu de données minimum	244
2. Adéquation spatiale	245
2.1. Méthodologie.....	245
2.1. Résultats des analyses SIG	246
Conclusion du chapitre	248
Chapitre 6 Conclusion générale et perspectives	251
1. Conclusion générale.....	252
1.1. Caractéristiques des sédiments	252

1.2. Filières de valorisation	252
1.3. Adéquation sédiments - filières	253
2. Perspectives	254
2.1. Développement des filières de valorisation.....	254
2.2. Développement de l'outil décisionnel.....	255
2.3. S'inscrire dans l'économie circulaire	255
Bibliographie	257
Références normatives.....	258
Références bibliographiques.....	263
Table des figures.....	278
Table des tableaux.....	282
Annexes	287
Annexe 1 : Critères d'admission des déchets dans les installations de stockage.....	288
Annexe 2 : Classification des sols fins selon le GTR	289
Annexe 3 : Diffractogrammes des sédiments étudiés	290
A3.1. Diffractogramme du sédiment GAR.....	290
A3.2. Diffractogramme du sédiment ISE.....	291
A3.3. Diffractogramme du sédiment RHI.....	292
Annexe 4 : Tassement des sédiments fins.....	293
A4.1. Définitions.....	293
A4.2. Equations d'état.....	293
A4.3. Sédimentation ou décantation des sédiments fins : rappels sur la méthode graphique utilisée.....	293
A4.4. Références bibliographique relatives à l'annexe 4	295
Annexe 5 : Observation des clinkers en microscopie optique en lumière réfléchie.....	296
A5.1. Première série (-K2).....	296
A5.2. Deuxième série (-K3).....	297
A5.3. Troisième série (-K'2).....	299
Annexe 6 : Observation des mortiers au microscope électronique à balayage	301
A6.1. Première série de mortiers (Taux de substitution du ciment par des sédiments de 10 %).....	301
A6.2. Deuxième série de mortiers (Taux de substitution du ciment par des sédiments de 25 %).....	303

ABREVIATIONS ET NOTATIONS

ENTREPRISES, ORGANISMES ET ADMINISTRATIONS

AFNOR : Association Française de NORmalisation
ANSES : Agence Nationale de SEcurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
ASTM : American Society for Testing and Materials
BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CETE : Centre d'Études Techniques de l'Équipement
CETMEF : Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales
CNR : Compagnie Nationale du Rhône
CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique
COEUR : Comité Opérationnel des Elus et Usagers de la Rance
CTMNC : Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction
DREAL : Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
ENTPE : Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat
ENSCI : Ecole Nationale Supérieure de Céramique Industrielle
FFTB : Fédération Française des Tuiles et des Briques
IFREMER : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
IFSTTAR : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux
INERIS : Institut National de l'EnviRonnement industriel et des rISques
INSA : Institut National des Sciences Appliquées
LERM : Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Matériaux
MEDDE : Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie
SETRA : Service d'Études sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements
VNF : Voies Navigables de France

LISTE DES ABREVIATIONS

ATG-ATD : Analyse Thermo-Gravimétrique - Analyse Thermique Différentielle
BHP : Béton Haute Performance
CEC : Capacité d'Echange Cationique
CTO : Composés Traces Organiques
COT : Carbone Organique Total
DRX : Diffraction des Rayons X
ETM : Eléments Traces Métalliques et métalloïdes
HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
HCT : HydroCarbures Totaux
ICPE : Installation Classée Pour l'Environnement
LEMA : Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques
LHR : Liant Hydraulique Routier
MIATE : Matière d'Intérêt Agronomique issue du Traitement des Eaux
NTK : Azote Total Kjeldahl
OMR : Ordures Ménagères Résiduelles
PCB : PolyChloroBiphényle
PCT : PolyChloroTerphényles
STEP : STation d'ÉPuration des eaux usées
UMR : Unité Mixte de Recherche

LISTE DES NOTATIONS

R_c : Résistance à la compression

R_t : Résistance à la traction
 R_{it} : Résistance à la traction indirecte
 E : Module d'élasticité
 w : Teneur en eau
 w_{OPN} : Teneur en eau à l'optimum Proctor normal
 w_L : Limite de liquidité
 w_P : Limite de plasticité
 I_C : Indice de consistance
 I_P : Indice de plasticité
 ρ_{OPN} : Masse volumique à l'optimum Proctor normal
 IPI : Indice portant immédiat
 MB : Matière brute
 MS : Matière sèche
 MO : Matière organique
 PF : Perte au feu
 VBS : Valeur au bleu de méthylène

Chapitre 1

INTRODUCTION ET CONTEXTE GENERAL

Les opérations de dragage de sédiments sont nécessaires pour garantir une bonne exploitation des ports, des voies navigables et des retenues d'eau pour la navigabilité ou pour la production d'énergie. Ce chapitre introduit le cadre général dans lequel se situe la thèse. Tout d'abord, la nécessité d'une gestion sédimentaire dans les barrages est expliquée. Puis, le contexte réglementaire qui encadre les opérations de curage ainsi que les opérations de gestion à terre est posé. La démarche élaborée en vue de pré-orienter des sédiments fins de barrage vers des filières de valorisation matière est présentée. Enfin, la dernière section détaille l'organisation du document.

SOMMAIRE DU CHAPITRE

1. Contexte	8
2. Qualification des matériaux étudiés	9
3. La nécessité d'une gestion des sédiments de barrage	9
3.1. Processus de sédimentation des retenues	10
3.2. Impacts des accumulations sédimentaires.....	11
3.3. Opérations de gestion des sédiments	12
3.4. Contraintes liées à la gestion des sédiments fins	13
4. Contexte réglementaire de la gestion des sédiments	14
4.1. Remise en suspension	14
4.2. Gestion à terre.....	14
4.3. Dangerosité des sédiments.....	15
5. Objectifs et démarches	16
5.1. Filières potentielles pressenties.....	16
5.2. Paramètres clés	17
5.3. Hypothèse de travail	18
6. Organisation du document	18

1. CONTEXTE

En France, 622 barrages et 435 centrales permettent à EDF de produire approximativement 10 % de son électricité à partir de l'énergie hydraulique. En 2013, la production nette en France métropolitaine est de 42,6 TWh à partir du parc de production hydraulique d'EDF. Cette source d'énergie contribue par son faible bilan GES¹, 6,1g CO₂ eq/kWh pour les retenues [EDF, 2011], à lutter contre le changement climatique.

Les retenues hydroélectriques sont soumises à des dépôts de sédiments ayant des impacts variables selon le bassin versant, la taille et la conception de la retenue. Pour des critères hydrauliques et d'efficacité de l'ouvrage ou d'usage du plan d'eau, il est nécessaire de gérer ces dépôts sédimentaires dans le respect de l'environnement et de la réglementation en donnant priorité à la continuité sédimentaire. Dans certains cas, des impératifs environnementaux et sanitaires peuvent contraindre les opérateurs à s'écarter des solutions de gestion usuelles consistant à réintégrer les sédiments dans le cours d'eau et envisager une gestion à terre.

Depuis une décennie, la gestion des sédiments est devenue préoccupante pour les principaux donneurs d'ordre. En effet, les pratiques usuelles de clapage en mer dans le cas des grands ports maritimes ou de mise en dépôts à terre pour les gestionnaires de voies d'eau sont de plus en plus remises en cause ou discutées. Les exploitants d'ouvrages hydroélectriques sont également amenés à faire évoluer leurs pratiques. Toute remise de sédiments dans le milieu aquatique dépend de la nature et du taux de pollution et reste subordonnée à autorisation de la part de l'administration. En cas d'impossibilité, il se pose le problème de leur devenir à terre. A ce titre, la réglementation évolue et place clairement la gestion des sédiments à terre dans la nomenclature ICPE (Installation Classée Pour l'Environnement), en leur conférant le statut de déchet. Confrontés à ces contraintes environnementales et réglementaires, les gestionnaires de ports, de canaux de navigation et d'ouvrages d'eau ont plus ou moins identifié des filières de valorisation voire contribué à la recherche et au développement de nouvelles voies.

Un intérêt particulier doit être porté aux sédiments fins, difficiles à valoriser. En effet, leurs propriétés physico-chimiques, mécaniques, et parfois leurs teneurs en polluants rendent difficiles leur valorisation. De plus, les opérations de dragage engendrent des quantités importantes de matériaux avec une forte teneur en eau. Les lieux d'implantation des ouvrages hydroélectriques, dont les sédiments sont extraits, peuvent être éloignés des sites de valorisation ce qui a pour effet d'induire une contrainte forte liée au transport.

A ce jour, il n'existe pas de filière « robuste » de valorisation à terre des sédiments fins. Dans ce contexte compliqué de gestion à terre, la connaissance des caractéristiques des sédiments est un élément essentiel pour mieux les valoriser. Une des difficultés de leur valorisation est liée à l'absence de spécifications concernant les matériaux issus des dragages à l'entrée des filières. Il est toujours possible d'établir une comparaison avec les matériaux aux caractéristiques similaires traditionnellement utilisés mais l'usage s'en trouve nettement plus limité. Il n'existe pas de méthodologie généraliste de caractérisation des sédiments en vue d'une gestion à terre ni de recommandations spécifiques aux sédiments fins de barrage. Réaliser des études « mono-spécifiques », filière par filière, mène à des caractérisations démesurées, redondantes, coûteuses pour aboutir finalement à très peu d'applications pratiques.

Une approche durable en matière de gestion des matériaux de dragage exige notamment un changement de point de vue. Même si les sédiments de dragage ont un statut de déchet, ces matériaux méritent d'être considérés comme une ressource alternative potentielle qui peut être précieuse. De plus, leur réutilisation correspond parfaitement à la philosophie d'une économie circulaire. Pour favoriser leur utilisation à grande échelle, la question de leur perception est un important défi. C'est notamment en améliorant la connaissance des atouts et contraintes de ces matériaux et des voies de valorisation que des filières robustes pourront être bâties. Les présents travaux de thèse, en s'inscrivant dans ce cadre, contribuent donc à promouvoir la gestion durable des sédiments de dragage et à l'amélioration du contexte actuel en matière de gestion à terre.

¹ GES : Gaz à effet de serre

2. QUALIFICATION DES MATERIAUX ETUDIES

La gestion à terre des sédiments peut se confronter à des défis d'ordre techniques, réglementaires, environnementaux et économiques. A cela s'ajoute aussi l'acceptation sociale.

Le vocabulaire rencontré pour traiter des matériaux issus de dragage est large et parfois imprécis impliquant des confusions voire certains amalgames avec des matériaux ou des déchets de nature complètement différente. Comme le rappellent Brils *et al.* [2014], le vocabulaire employé influe sur la perception des matériaux issus d'opérations de dragage. Afin de favoriser l'emploi de sédiments fins dans des filières terrestres, le vocabulaire à employer doit être précis et adapté afin de présenter une image plus attractive des matériaux issus d'opérations de dragage.

Pour qualifier les sédiments fins, le terme « vase » est parfois employé. Cependant, l'existence de nombreuses définitions de ce terme le rend imprécis. De plus, une connotation péjorative est souvent injustement associée à ce mot.

Une fois dragués, la teneur en eau élevée des sédiments fins conduit parfois à les désigner avec le terme de « boue de dragage ». Utilisé sans autre précision, le mot « boue » a un sens extrêmement large et peut désigner des matériaux sous forme liquide ou pâteuse, voire des déchets très divers ayant des origines et des natures totalement différentes. Pour éviter toute confusion de matériaux sous forme liquide avec les sédiments fins provenant de dragage, le terme de boue n'est pas utilisé.

Les matériaux concernés dans cette thèse sont composés de particules minérales dont 50 % est inférieure à 80 μm avec une teneur en matière organique variable. Ils sont donc principalement composés de fractions granulométriques relatives aux classes des limons et des argiles¹. Ces matériaux proviennent essentiellement de l'érosion des bassins versants résultant du ruissellement des eaux de pluie, transportés jusqu'aux retenues. La diminution des vitesses d'écoulement de l'eau à l'approche d'un barrage entraîne leur dépôt. Leur nature minéralogique et chimique est étroitement liée à la nature des apports terrigènes *i.e.* la géologie du bassin versant mais résulte aussi des éventuelles réactions chimiques intervenant au cours du transport et du stockage dans les retenues. Dans cette thèse, le terme qui a été retenu pour qualifier les matériaux étudiés est « sédiments fins ».

3. LA NECESSITE D'UNE GESTION DES SEDIMENTS DE BARRAGE

Laissées à leur cours naturel, les rivières transportent progressivement jusqu'à la mer des quantités importantes de sédiments arrachés aux versants par le ruissellement des eaux de pluie. En aménageant les rivières, l'Homme modifie le transit naturel de ces sédiments. En particulier, ceux-ci sont souvent piégés dans les eaux calmes des retenues.

La plupart des retenues se comblent ainsi progressivement. A terme, cela compromet leur bon fonctionnement et leur rentabilité. On est donc amené à vouloir évacuer ces sédiments, [Keller et Bouchard, 1983].

Lauters *et al.* [2012] ont déjà souligné le besoin d'acquérir un volume important de connaissances pour définir une gestion sédimentaire durable qui répond à des attentes en termes de production, d'équilibre économique et de contraintes environnementales et réglementaires.

Dans cette partie, les principaux mécanismes impliqués dans la sédimentation des retenues sont rappelés ainsi que les impacts qu'engendrent les accumulations sédimentaires pour les ouvrages hydrauliques. Les solutions de gestion des sédiments sont ensuite décrites afin de bien mesurer les intérêts et la nécessité de la valorisation des sédiments.

¹ Le mot argile recouvre deux significations. Au sens granulométrique, il s'agit de particules fines, généralement inférieures à 2 μm (cette taille étant variable selon les classifications existantes). Au sens minéralogique, ce mot se réfère aux phyllosilicates (silicates en feuillet) issus de l'altération de minéraux primaires et qui constituent l'essentiel des constituants de la fraction fine mais peuvent être présents dans des granulométries bien plus élevées.

3.1. PROCESSUS DE SEDIMENTATION DES RETENUES

Les sédiments proviennent en majeure partie de l'érosion des bassins versants résultant du ruissellement des eaux de pluie, transportés par l'eau jusqu'aux retenues.

Les eaux des cours d'eau transportent les sédiments essentiellement sous deux formes (figure 1-1) : par charriage et en suspension. Le charriage est un transport de fond par roulement ou saltation qui intéresse les matériaux grossiers (sables, graviers et galets). Le transport en suspension intéresse les sédiments fins (sables fins, silts et argiles).

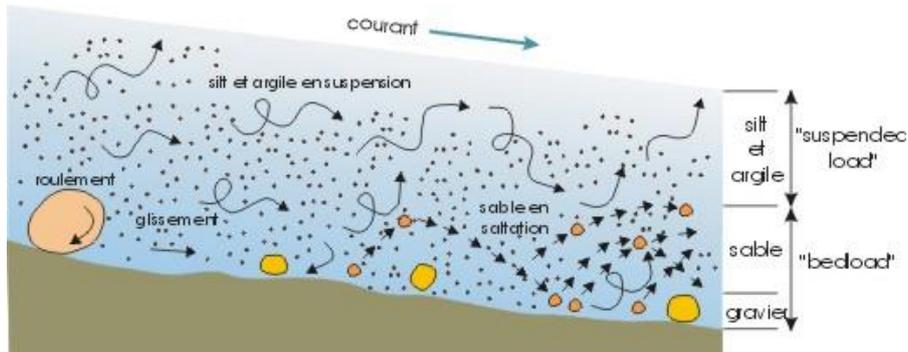


Figure 1-1. Modes de transport des particules dans un courant [Boulvain, 2012]

On considère que les matériaux en suspension constituent normalement 90 à 95 % de la totalité des matériaux transportés [EDF, 1997]. Ils ne sont pas apportés de façon continue toute l'année, mais essentiellement lors des crues. Ce sont surtout les produits de l'érosion des sols qui constituent la matière minérale provenant du bassin versant.

La granulométrie des particules sédimentaires a une influence majeure sur leur transport et sur leur vitesse de sédimentation. Ces relations sont synthétisées par le diagramme de Hjulström (figure 1-2). En examinant la partie supérieure de ce graphe, le domaine intéressant l'érosion des particules moyennes à grossières des sables fins aux galets semble logique : la vitesse du courant nécessaire pour mobiliser des grains augmente avec leur granulométrie. Pour les particules fines, par contre, la courbe montre une augmentation de la vitesse du courant avec la diminution de la granulométrie. Ce comportement paradoxal est la conséquence de la cohésion élevée des particules fines, surtout liée à un effet électrostatique. La partie inférieure du graphe (sédimentation) donne la relation entre la granulométrie des particules et la vitesse du courant lors de leur dépôt.

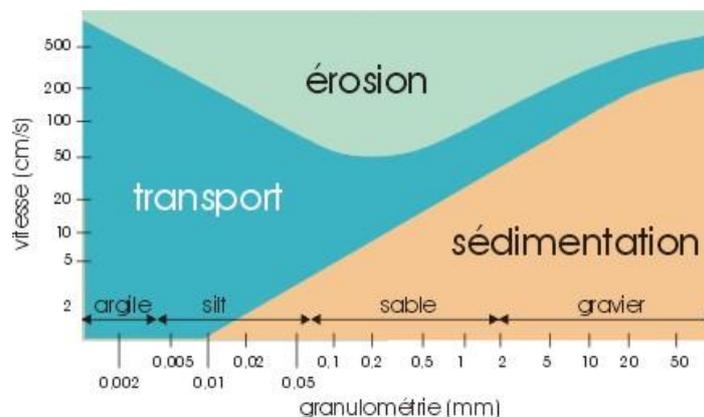


Figure 1-2. Diagramme de Hjulström [Boulvain, 2012]

Appliqué à une retenue hydroélectrique, le ralentissement des vitesses d'écoulement de l'eau à l'approche d'un barrage entraîne la sédimentation des matériaux solides que la rivière transporte en

suspension et par charriage sur le fond. A ce phénomène principal, qui conditionne la répartition et le déplacement dans la retenue des sédiments, viennent s'ajouter des mécanismes liés à la géomorphologie, à l'écoulement dans la retenue et à son exploitation.

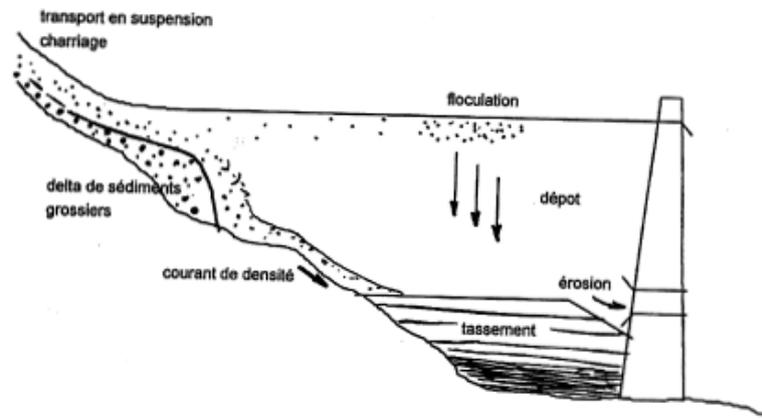


Figure 1-3. Mécanismes de déposition [EDF, 1997]

Ce sont les sédiments grossiers qui s'arrêtent les premiers et forment un delta en queue de retenue qui avance, avec le temps, vers le barrage au fur et à mesure des apports (figure 1-3). Les sédiments fins, se déposent plus loin et peuvent se déplacer en se concentrant dans des secteurs privilégiés (anciennes dépressions, méandres de l'ancien lit de la rivière ...) jusque devant le pied du barrage. Ils peuvent se comporter selon deux scénarii :

- une sédimentation progressive en fonction de la turbulence et des écoulements dans la retenue ;
- une formation d'un courant de densité à l'entrée de la retenue qui fait plonger les eaux chargées de la rivière plus denses vers le fond, qui s'écoulent jusqu'au pied du barrage où, en absence de soutirage de fond, ils s'accumuleront.

Pour un site donné, la nature et le volume des dépôts va dépendre d'un certain nombre de facteurs tels que la géologie des sols du bassin versant, le régime climatique de la vallée, le régime hydrologique du cours d'eau, la couverture végétale du bassin versant, son degré d'activités humaines (pratiques culturelles, assainissement urbain, industries...). Il y a donc de multiples typologies de sédiments qui sont présentes dans les retenues.

3.2. IMPACTS DES ACCUMULATIONS SEDIMENTAIRES

La présence d'un aménagement hydraulique transversal sur un cours d'eau constitue un obstacle au transport solide dans les milieux aquatiques. En effet, ce type d'aménagement peut constituer un point d'accumulation des sédiments en amont (dans la retenue), provoquant ainsi une discontinuité chronique dans le processus naturel de transport solide. Cette interruption du transit sédimentaire est également susceptible de générer des déficits en matériaux à l'aval. Malavoi *et al.*, [2011] rappellent les effets des altérations anthropiques du transport solide sur la morphologie des cours d'eau qui vont aussi affecter les écosystèmes aquatiques.

Les impacts liés aux sédiments dans les retenues peuvent être de plusieurs types selon la nature de l'ouvrage, les conditions d'exploitation, la quantité de sédiments et leur nature. Les accumulations peuvent affecter directement ou indirectement l'exploitation de l'aménagement, l'occupation du territoire, les différents usages présents sur ou à proximité de la retenue mais aussi avoir des effets biologiques ou physiques.

Le tableau 1-1 synthétise les perturbations potentielles imputables à l'accumulation des sédiments sans considérer les impacts attribuables à la qualité de l'eau quand celle-ci est dégradée.

Tableau 1-1. Impacts liés aux dépôts de sédiments dans les retenues hydroélectriques [Anger et al., 2012]

<i>Catégorie d'impacts</i>	<i>Nuisances et effets</i>
<i>Impact sur les activités d'exploitation hydroélectriques</i>	<i>Réduction de la capacité de stockage disponible de la retenue. Obstruction de prises d'eau, de manœuvre de vannes et des ouvrages de sécurité. Limitation du marnage.</i>
<i>Impact aux usages et usagers riverains</i>	<i>Rehaussement des cotes d'eau entraînant des inondations. Problèmes visuels et/ou olfactifs. Gêne pour les activités de loisirs : baignade, pêche, nautisme...</i>

La qualité des sédiments peut être altérée par la présence de micropolluants métalliques et organiques, de phosphore et/ou de matières organiques. Cette détérioration de la qualité a pour origine la pollution du bassin versant (présence d'anciennes mines, d'exploitation agricole, de zones urbaines...). Les retenues jouent alors un rôle de décanteur de sédiments pollués et concentrent la pollution. Les problèmes se posent principalement lors des travaux de curage, de vidange ou de manœuvre d'exploitation engendrant une remobilisation de ces sédiments.

De même, la présence de bancs de sédiments dans la retenue peut engendrer la création de milieux humides d'une grande richesse écologique. Cette richesse peut alors devenir contraignante dans les actions de traitement de la sédimentation, notamment du type curages [EDF/IME, 2010].

Enfin, les sédiments peuvent avoir des effets accélérateurs ou réducteurs du processus d'eutrophisation [EDF, 1997] :

- accélérateurs lorsque les sédiments relarguent le phosphore qu'ils ont accumulé contribuant ainsi à la prolifération d'algues indésirables ;
- réducteurs lorsque les sédiments en suspension constituent un obstacle au passage de la lumière atténuant ainsi le développement de la population algale.

Au regard des perturbations potentielles pouvant être générées, il est essentiel de porter une importance à la gestion des sédiments.

3.3. OPERATIONS DE GESTION DES SEDIMENTS

L'évacuation des sédiments des retenues hydroélectriques, rendue souvent nécessaire pour assurer le fonctionnement des aménagements, est classiquement opérée selon deux techniques : soit (i) en utilisant des moyens mécaniques, soit (ii) de façon naturelle en procédant à des chasses.

3.3.1. Les chasses et transparences

Ces opérations permettent uniquement de faire transiter les sédiments vers l'aval. Une quarantaine d'aménagements hydroélectriques est actuellement gérée de cette manière sur le parc EDF.

Le but est de faire des manœuvres d'exploitation permettant d'initier le transport des sédiments vers l'aval. On profite d'évènements hydrologiques notables (débit d'eau important lors de crues de printemps) afin d'ouvrir des organes de fond et provoquer le départ de sédiments. Suivant les régions, ces évènements sont programmables à l'avance (fonte des neiges), ou peu prévisibles (épisodes orageux dans le sud de la France).

On introduit parfois le terme de gestion par transparence. Concrètement, cette gestion consiste en une ouverture des organes de fond en période de hautes eaux (forts débits) et, parallèlement, en un abaissement de la retenue en-dessous de la cote minimale d'exploitation. Le transfert des matériaux est possible par établissement d'un régime torrentiel. Lorsque le barrage est complètement effacé, il devient "transparent" à la fois pour le débit solide et le débit liquide, d'où le terme de "transparence" adopté pour cette opération.

Certains ouvrages, de par leur conception, leur trop important volume d'eau ou leur environnement ne permettent pas de réaliser de transparences. Ces opérations, même si elles peuvent être bénéfiques à long terme sur la faune aquatique en aval, sont susceptibles d'avoir des impacts négatifs sur l'environnement, à court et moyen termes.

3.3.2. Les opérations de curage

Le curage consiste à extraire les sédiments de l'eau puis à les restituer au cours d'eau et /ou les stocker à terre. En moyenne, environ 200 000 m³ de sédiments sont curés chaque année sur le parc EDF [EDF/IME, 2010].

Il existe plusieurs méthodes employées par EDF :

- le curage par pompage/dilution : pompage des sédiments à l'aide d'une barge et d'une drague aspiratrice, avec un rejet à l'aval dans un autre milieu récepteur en diluant le rejet avec une arrivée d'eau. Cette technique est la plus fréquemment utilisée ;
- le curage par pompage/stockage : pompage des sédiments à l'aide d'une barge et d'une drague aspiratrice, rejet par conduite et décantation dans un bassin avant stockage définitif ;
- le curage mécanique : extraction des sédiments à l'aide d'une pelle hydraulique depuis une barge ou la berge et transport pour stockage provisoire pour essorage avant stockage définitif ;

Des curages à sec sont également possibles. Ils consistent à enlever à sec, avec des engins mécaniques terrestres classiques (bulldozers), des sédiments dans certaines zones lorsqu'on pratique par exemple un abaissement du plan d'eau qui dénoie certaines zones envasées, notamment en queue de retenue.

3.4. CONTRAINTES LIEES A LA GESTION DES SEDIMENTS FINS

Le contexte dans lequel s'exerce l'activité de production hydroélectrique reste profondément marqué par la mise en œuvre de la législation européenne, en particulier la Directive Cadre sur l'Eau [OJEC, 2000], ainsi que la législation française qui en découle avec la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques [JORF, 2006a]. Pour les matériaux grossiers, ces législations demandent un retour des matériaux à la rivière pour assurer la continuité sédimentaire lorsqu'un déficit est constaté.

Cette fraction grossière, sablo-graveleuse, est facilement valorisable. Il est vrai que les sables et graves ont longtemps été exploités dans le lit mineur des cours d'eau et dans les plans d'eau traversés. L'importante influence de ces extractions sur la morphologie des cours d'eau et les impacts associés ont conduit à l'arrêté du 22 septembre 1994 relatif à l'exploitation des carrières [JORF, 1994], interdisant ces types d'extraction de granulats à des fins commerciales.

La réintroduction des sédiments fins dans le milieu aquatique est plus délicate car ils sont, selon Keller et Bouchard [1983], susceptibles d'entraîner des nuisances si on les rejette à l'aval des barrages : atteintes à la faune et la flore, colmatage des prises d'eau et des nappes phréatiques.

De par la finesse qui caractérise ces sédiments et leurs propriétés physico-chimiques qui en découlent, la probabilité de trouver une contamination par des polluants est plus importante que pour des sédiments plus grossiers.

Avec les sédiments fins, le risque plus élevé d'être confronté à des cas ou des impératifs environnementaux et sanitaires contraint les opérateurs à s'écarter des solutions de gestion usuelles consistant à réintégrer les sédiments dans le cours d'eau ou à créer un lieu de stockage à terre.

C'est donc pour ces sédiments fins, plus difficilement réintroduitables dans les cours d'eau, qu'il est primordial de développer des voies de valorisation.

La création de dépôts à terre est encadrée par une réglementation de plus en plus contraignante et les coûts engendrés par l'élimination en centre de stockage des déchets sont dissuasifs. Pour ne pas subir les impacts engendrés par les sédiments laissés en place, faute de débouchés, il faut lever les verrous d'entrée des filières de valorisation. La création de filières de valorisation des sédiments devient alors indispensable. De plus, leur utilisation permettait la préservation de ressources naturelles.

Finalement, la sédimentation dans les retenues est un phénomène inéluctable. Tous les barrages la subissent plus ou moins, ainsi que les impacts associés suivant leurs implantations et leurs possibilités de gestion. La réintroduction des sédiments fins dans le milieu aquatique se révèle de plus en plus délicate conduisant ainsi à une gestion à terre. Le développement de filières de valorisation peut apporter une solution qui permettrait de considérer ces sédiments fins comme une ressource naturelle et renouvelable, donc pérenne, pour leur utilisation dans le temps.

4. CONTEXTE REGLEMENTAIRE DE LA GESTION DES SEDIMENTS

Les sédiments de dragage des cours d'eau et des retenues de barrages doivent être gérés à terre si une remise en eau n'est pas envisageable. La réglementation relative aux dragages, surtout en ce qui concerne la gestion à terre des sédiments extraits, a connu des modifications importantes au cours des dernières années. Selon le mode de gestion à terre des sédiments extraits, les projets de dragage peuvent désormais, dans certains cas, être concernés par une double instruction administrative, au titre de la loi sur l'eau pour le dragage, et au titre des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), en ce qui concerne certaines filières de gestion à terre.

4.1. REMISE EN SUSPENSION

En général, la remise en suspension dans les cours d'eau concerne les sédiments fluviaux dont les niveaux relatifs aux éléments et composés traces sont inférieurs aux niveaux S1 définis par l'arrêté du 09 août 2006 [JORF, 2006b], voir tableau 1-2. Si les niveaux relatifs aux éléments et composés traces sont supérieurs aux seuils S1 alors le Maître d'ouvrage doit justifier la non dangerosité des sédiments pour le milieu aquatique dans sa demande d'autorisation à l'administration.

Pour EDF, l'instruction des dossiers se fait aujourd'hui dans le cadre de la loi du 16 octobre 1919 relative à l'utilisation de l'énergie hydraulique [JORF, 1919]. Dans les dossiers d'exécution instruits pour le lancement des travaux de pompage dilution, l'impact sur le milieu aquatique est évalué à travers des études environnementales considérant notamment les seuils TEC/PEC¹ issus des travaux de MacDonald *et al.* [2000].

Selon l'arrêté du 30 mai 2008 [JORF, 2008], les matériaux issus du dragage des cours d'eau doivent être en priorité, réintroduits dans la voie d'eau afin de maintenir un bilan sédimentaire équilibré. *A contrario*, si la qualité des sédiments, l'environnement biologique de ce cours d'eau, le régime hydraulique et les facteurs technico-économiques ne sont pas favorables à une opération de réintroduction dans le milieu aquatique, les matériaux devront être extraits et dirigés vers des filières adaptées.

Tableau 1-2. Niveaux relatifs aux éléments et composés traces de l'arrêté du 09/08/2006)

<i>Paramètres</i>	<i>As</i>	<i>Cd</i>	<i>Cr</i>	<i>Cu</i>	<i>Hg</i>	<i>Ni</i>	<i>Pb</i>	<i>Zn</i>	<i>PCB totaux</i>	<i>HAP totaux</i>
<i>Niveau S1 (mg/kg)</i>	30	2	150	100	1	50	100	300	0,680	22,800

Nota : concentration exprimée en mg/kg de sédiments secs analysés sur la fraction inférieure à 2 mm

4.2. GESTION A TERRE

La directive cadre sur les déchets 2008/98/CE du 19 novembre 2008 [OJEU, 2008] précise que les « sédiments déplacés au sein des eaux de surface aux fins de gestion des eaux et des voies d'eau, de

¹ *TEC : Threshold Effect Concentration - PEC : Probable Effect Concentration. Le TEC correspond à la concentration dans le sédiment en dessous de laquelle aucun effet néfaste n'est observé sur les organismes en contact avec ce sédiment. Le PEC correspond à la concentration dans les sédiments au dessus de laquelle des effets nocifs sont fréquemment observés.*

prévention des inondations, d'atténuation de leurs effets ou de ceux des sécheresses ou de mise en valeur des terres sont exclus du champ d'application de la présente directive, s'il est prouvé que ces sédiments ne sont pas dangereux » (article 2 de la directive). En inversant ce principe d'exclusion, tout sédiment qui ne subit pas un simple déplacement au sein des eaux de surface mais qui est géré à terre est considéré comme un déchet au sens de cette directive.

L'article L.541-1-1 du code de l'environnement définit réglementairement un déchet comme « toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire ». Dès lors que les sédiments sont extraits de l'eau, ils devront être gérés en tenant compte de ce statut de déchet. Cela implique notamment une notion de responsabilité, l'article 541-2 du code de l'environnement précisant que « tout producteur ou détenteur de déchets est responsable de la gestion de ses déchets jusqu'à leur élimination ou valorisation finale, même lorsque le déchet est transféré à des fins de traitement à un tiers ».

Depuis la parution du Décret n° 2010-369 du 13 avril 2010 modifiant la nomenclature des installations classées [JORF, 2010b] et sa circulaire d'application du 24 décembre 2010 [MEDDE, 2011], la gestion des sédiments à terre est réglementée au titre de la législation relative aux ICPE. Des rubriques peuvent s'appliquer pour les opérations de transit, de tri, de traitement et de stockage (voir tableau 1-3).

Tableau 1-3. Classement ICPE pour les sédiments gérés à terre [DREAL Nord - Pas-de-Calais, 2012]

<i>Caractéristiques des sédiments</i>	<i>Activité</i>	<i>N° de rubrique ICPE</i>
<i>Sédiments inertes</i>	<i>Transit Pulvérulent</i>	2516
	<i>Transit Non pulvérulent</i>	2517
	<i>Broyage, concassage, criblage, tamisage, etc.</i>	2515
	<i>Stockage</i>	L541-30-1
<i>Sédiments non dangereux</i>	<i>Transit</i>	2716
	<i>Stockage</i>	2760-2
	<i>Traitement thermique</i>	2771
	<i>Traitement non thermique</i>	2791
<i>Sédiments dangereux</i>	<i>Transit</i>	2717/2718
	<i>Stockage</i>	2760-1
	<i>Traitement thermique</i>	2770
	<i>Traitement non thermique</i>	2790

4.3. DANGEROUSITE DES SEDIMENTS

Les sédiments gérés à terre entrent de fait dans la nomenclature déchets, il est donc obligatoire de qualifier leur dangerosité. L'article R. 541-8 (annexe II) du code de l'environnement qui reprend la nomenclature européenne des déchets et classe les sédiments issus de dragages en entrée dite miroir selon leur dangerosité :

- 17 05 05* boues de dragage contenant des substances dangereuses ;
- 17 05 06 boues de dragage autres que celles visées à la rubrique 17 05 05*.

La dangerosité des déchets repose sur 15 critères de dangerosité, notés H1 à H15, dont un seul suffit à classer le matériau comme dangereux. Une note juridique du MEDDE en date du 18 septembre 2002 [MEDDE, 2002], précise que plusieurs critères ne sont pas adaptés aux déblais de dragage, par exemple H1 « explosif », et que le critère H14 « écotoxique » est déterminant pour l'évaluation du caractère dangereux des déblais de dragage. Des travaux ont été menés pour qualifier le caractère dangereux ou non des sédiments, notamment sur le critère H14 relatif à l'écotoxicité avec la proposition d'un protocole [Mouvet, 2013].

Pour appréhender le caractère inerte ou non des sédiments de dragage, l'approche est fondée sur celle demandée pour l'acceptation dans les Installations de Stockages des Déchets Inertes (ISDI). Il faut se référer aux valeurs limites de l'annexe II de l'arrêté du 28 octobre 2010 relatif aux ISDI [JORF,

2010a]. Les seuils d'admission dans ces installations de stockage sont basés sur des analyses sur le lixiviat des sédiments mais également sur les sédiments bruts. Le test de lixiviation à appliquer est le test normalisé NF EN 12457-2 avec un ratio liquide solide (L/S) de 10 l/kg. Les différents seuils d'admission sont donnés en annexe 1. Les sédiments qualifiés de « non dangereux » correspondent aux sédiments qui sont pas inertes et qui ne pas n'ont plus non dangereux.

En synthèse, si les sédiments extraits lors d'opérations de dragage sont destinés à une filière terrestre, ils entrent de fait dans la nomenclature déchets. Ils peuvent être à caractère dangereux ou non dangereux (article R. 541-8, annexe II, du code de l'environnement). Pour être qualifiés d'inerte, les sédiments doivent respecter les seuils de l'annexe II de l'arrêté du 28 octobre 2010 relatif au ISDI. Des travaux ont été menés pour qualifier le caractère dangereux ou non des sédiments et un protocole officiel sera prochainement mis en place sur le critère H14 relatif à l'écotoxicité. La réglementation, avec le décret n° 2010-369 du 13 avril 2010 modifiant la nomenclature des ICPE et sa circulaire d'application du 24 décembre 2010, place clairement la gestion des sédiments à terre dans la nomenclature ICPE. Le cadre actuel considère donc les sédiments gérés à terre comme un déchet.

5. OBJECTIFS ET DEMARCHES

Face à ces constats, pour faciliter la décision des exploitants confrontés à la gestion des sédiments, une démarche a été initiée avec pour objectif d'aboutir à un outil décisionnel permettant de pré-orienter les sédiments vers des voies de valorisation. Pour constituer les bases d'un tel outil, la démarche entreprise repose sur la proposition d'une caractérisation des sédiments avec un nombre réduit de paramètres en accord avec les spécifications techniques des filières potentielles envisageables et les caractéristiques des matières premières couramment utilisées.

En matière de valorisation des sédiments fins, il existe quelques possibilités envisageables mais aucune de ces voies n'est, à ce jour, suffisamment avancée pour intégrer des sédiments fins de barrage de façon robuste. Pour les sédiments fins des retenues ou voies d'eau, il est nécessaire d'avoir une vision intégratrice de l'ensemble des potentialités de valorisation sur le territoire français. Le critère de proximité étant une condition incontournable pour une valorisation, la mise en place des filières doit être locale.

Pour répondre à cet objectif, la démarche se décline en plusieurs étapes. D'abord, examiner les filières de valorisation potentielles et mettre en évidence les spécifications d'entrée requises pour les matériaux habituels que l'on prétend substituer par des sédiments. Cette phase permet de connaître les caractéristiques pour lesquelles les sédiments seraient éligibles aux voies de valorisation.

5.1. FILIERES POTENTIELLES PRESENTIES

Parmi les multiples utilisations envisageables et réalisations avec des sédiments, cinq filières majeures ont été pressenties. Il s'agit :

- d'une incorporation lors de la fabrication d'un ciment ;
- d'une intégration dans un mortier ;
- de la préparation d'un matériau routier ;
- de la conception d'un matériau céramique ;
- d'une utilisation agronomique.

S'agissant de réalisations et filières étudiées en vue de valoriser les sédiments, d'autres valorisations sont aussi envisageables. On peut citer le comblement de carrière, le renforcement de berges, la création de butte paysagère, la mise en place de couverture d'installations de stockage de déchets, le rechargement de plage, la conception de terre-plein, etc. Le panel de possibilités envisageables étant relativement large, le choix de se concentrer sur cinq voies de valorisation a été fait pour les travaux de thèse.

Les cinq filières de valorisation des sédiments fins ont été choisies en considérant notamment les éléments suivants :

- une faisabilité technique qui permet d'intégrer des matériaux fins. C'est le critère de base. Par exemple, le rechargement de plage ne peut être envisagé qu'avec un sédiment sableux.
- une capacité à absorber des volumes importants. Les volumes de sédiments générés par les dragages peuvent être conséquents. Il faut que les filières de valorisation soient en mesure d'absorber ces quantités et/ou qu'elles disposent de sites de stockage temporaires en vue d'une utilisation continue dans le temps.
- un accueil possible d'une ou plusieurs filières à proximité de la zone d'extraction des sédiments. Il est nécessaire d'avoir une vision intégratrice de l'ensemble des potentialités de valorisation sur le territoire français. Comme les ouvrages hydroélectriques et d'eau sont répartis sur le territoire, les gisements le sont aussi et ils sont parfois éloignés des activités humaines et industrielles. Il convient si possible de pouvoir valoriser ces sédiments au plus près de leur lieu de prélèvement. Il s'agit de limiter le transport pour en réduire ses coûts et ses impacts.
- une perspective d'être applicables ou extrapolables à d'autres voies de valorisation en utilisant des essais de caractérisation similaires. Les essais, analyses et leurs seuils peuvent faire référence en vue d'autres utilisations. Par exemple, en prenant le cas d'une butte paysagère. Les essais couramment réalisés en technique routière associés aux analyses agronomiques permettront de connaître respectivement la faisabilité technique de l'ouvrage (stabilité géotechnique) et le potentiel de végétalisation.

5.2. PARAMETRES CLES

Pour ces cinq filières étudiées, un travail de recherche des paramètres essentiels dans la caractérisation a été réalisé en s'appuyant sur la bibliographie existante (normes, guides techniques et articles scientifiques), sur des résultats et analyses d'essais en laboratoire sur des sédiments échantillonnés et sur la considération d'avis d'experts.

A partir des résultats sur ces différents aspects, des critères indicateurs sont identifiés ou définis pour chaque filière. La difficulté dans cette approche est de retenir la ou les données déterminantes ou discriminatoires. Les critères indicateurs les plus pertinents, ou « critères déclenchants » sont ensuite interprétés et hiérarchisés. Pour ce faire, les paramètres d'étude de la filière menant du sédiment X au produit final Y sont identifiés, puis par analyse à rebours ou inverse (figure 1-4), un classement des critères par ordre d'importance mènera à l'identification de paramètres-clés pour cette voie de valorisation.

Cela impose bien évidemment de connaître les filières et leurs prescriptions techniques ou les caractéristiques des matières premières couramment utilisées. Ce travail de hiérarchisation des paramètres est réalisé pour les cinq filières pressenties dans lesquelles les sédiments de barrage peuvent être valorisés. C'est aussi le requis pour la création d'un outil de décision sur le devenir des sédiments de barrage dragués gérés à terre.

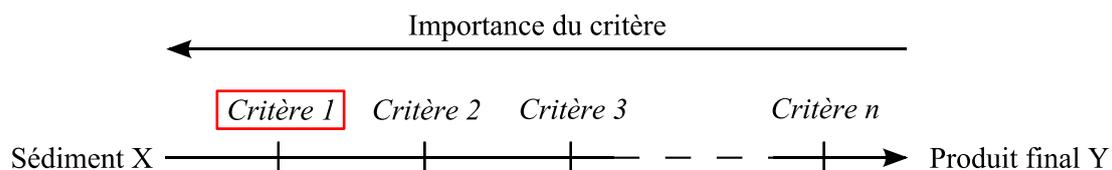


Figure 1-4. Principe de la logique par analyse inverse mise en place

Ainsi, les analyses et essais nécessaires pour accéder aux critères indicateurs essentiels pour les cinq filières pressenties permettent d'aboutir à une caractérisation minimale et d'apporter une réponse

quant à la valorisation possible des sédiments dans telle ou telle filière (phase de pré-orientation). Cela facilitera la décision des exploitants confrontés à la gestion des sédiments fins.

5.3. HYPOTHESE DE TRAVAIL

Dans cette démarche globale, une hypothèse de travail a été adoptée : l'intérêt est prioritairement donné à l'étude de la caractérisation de la fraction valorisable avant une phase d'identification des polluants freinant les possibilités de valorisation. Rappelons que la caractérisation de la fraction polluante et son évolution est déjà traitée par de nombreux travaux de recherche. Bray [2008] estime que plus de 90 % des sédiments provenant des dragages d'entretien sont considérés comme acceptables, d'un point de vue environnemental, pour un large éventail d'utilisations ou de placements alternatifs. C'est également le cas pour les sédiments du parc hydroélectrique d'EDF car la majorité des sédiments ne présente pas de pollution.

L'idée forte est de considérer les sédiments tels quels, à savoir une ressource naturelle et renouvelable permettant une économie des matériaux nobles. Les tâches entreprises, d'identification des critères d'entrée dans les filières de valorisation, permettent d'aboutir à des éléments techniques qui vont dans ce sens.

6. ORGANISATION DU DOCUMENT

L'organisation du document est présentée de façon schématique sur la figure 1-5. Après cette partie introductive précisant le cadre de l'étude, le mémoire est structuré de la façon suivante :

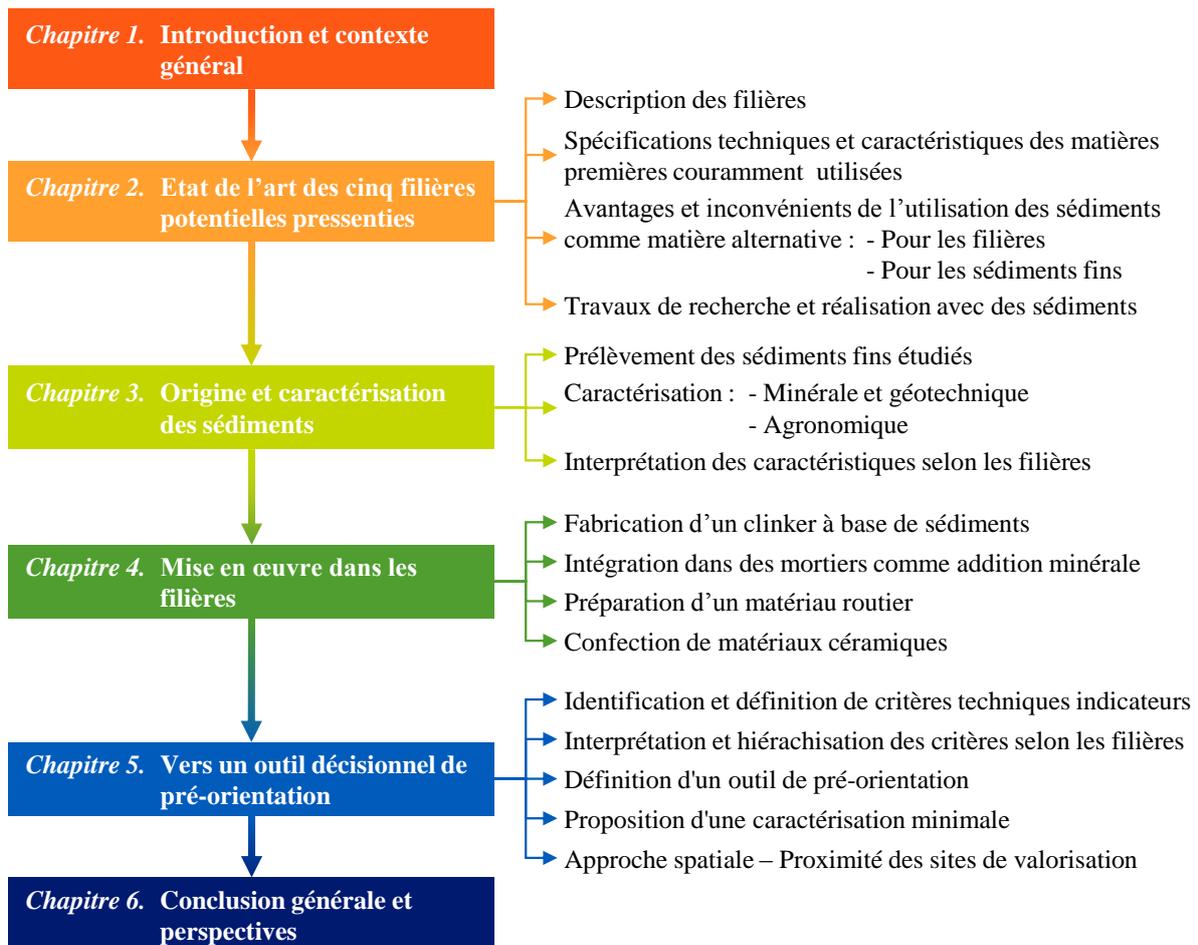


Figure 1-5. Structure schématique du document

Le chapitre 2 « *état de l'art des cinq filières potentielles pressenties* » s'attache à l'analyse des cinq filières majeures de valorisation pressenties parmi les utilisations possibles des sédiments fins. Pour chacune de ces voies, trois volets sont présentés. D'abord le principe et la mise en œuvre de la filière sont décrits. Les spécifications techniques et les caractéristiques standards des matières premières couramment utilisées sont ensuite énoncées. Enfin, les travaux de recherche et les réalisations existantes avec des sédiments sont rapportés.

Le chapitre 3 « *origine et caractérisation des sédiments* » concerne la première étape, essentielle et obligatoire dans la recherche de valorisation : la caractérisation. Après avoir détaillé les opérations d'échantillonnage des quatre sédiments fins étudiés, ce chapitre présente les caractéristiques des sédiments fins issues d'une caractérisation dite « minérale et géotechnique » suivie d'une caractérisation agronomique. Enfin, l'adéquation entre les caractéristiques des sédiments et les filières de valorisation est discutée.

Le chapitre 4 « *mise en œuvre dans les filières* » présente des essais de valorisation à l'échelle du laboratoire ayant pour objectif de mettre en avant les caractéristiques favorables et défavorables des sédiments par rapport à leur utilisation dans des filières de valorisation. Les essais ont conduit à la fabrication d'un clinker à partir d'un cru en partie composé de sédiments fins, l'intégration de sédiments fins dans des mortiers comme addition minérale, la préparation d'un matériau routier et la confection d'un matériau céramique à base de sédiments fins de barrage.

Le chapitre 5 « *vers un outil décisionnel de pré-orientation* » aborde la construction d'un outil dont l'objectif est de pré-sélectionner les filières de valorisation. Un premier volet présente l'élaboration de la démarche menant à la création d'un indice d'adéquation entre les caractéristiques des sédiments fins et les filières de valorisation. Cette approche est complétée par une approche spatiale, mettant en avant la nécessité de considérer la proximité des sites permettant une valorisation des sédiments fins.

La dernière partie présente les conclusions générales de la thèse ainsi que les perspectives des études à venir.

Chapitre 2

ETAT DE L'ART DES CINQ FILIERES POTENTIELLES PRESENTIES

SOMMAIRE DU CHAPITRE

Introduction.....	22
1. La filière « ciment ».....	23
1.1. Description.....	23
1.2. Spécifications.....	29
1.3. Application aux sédiments.....	36
1.4. Conclusion.....	44
2. La filière « bétons, mortiers, coulis ».....	46
2.1. Description.....	46
2.2. Spécifications.....	52
2.3. Application aux sédiments.....	56
2.4. Conclusion.....	60
3. La filière « matériau routier et assimilé ».....	61
3.1. Description.....	61
3.2. Spécifications.....	66
3.3. Application aux sédiments.....	73
3.4. Conclusion.....	78
4. La filière « matériau céramique ».....	79
4.1. Description.....	79
4.2. Spécifications.....	88
4.3. Application aux sédiments.....	95
4.4. Conclusion.....	106
5. La filière « agronomique ».....	108
5.1. Description.....	108
5.2. Spécifications.....	115
5.3. Application aux sédiments.....	120
5.4. Conclusion.....	128
Conclusion du chapitre.....	129

INTRODUCTION

A propos de valorisation matière des sédiments, il existe un panel de possibilités mais aucune de ces voies n'est à l'heure actuelle adaptée de façon robuste pour assimiler des sédiments fins. Pour les sédiments de barrage ou voies d'eau, il est nécessaire d'avoir une vision intégratrice de l'ensemble des potentialités de valorisation sur le territoire français.

Ce chapitre présente, décrit et analyse les cinq filières majeures de valorisation pressenties parmi de multiples utilisations possibles des sédiments. L'accent est mis sur les spécifications des matières premières que les sédiments fins des retenues hydroélectriques pourraient venir substituer.

L'objectif de ce chapitre étant de décrypter, à partir des contraintes techniques, normatives, réglementaires et des travaux de recherche, les cahiers des charges pour matières premières employés dans les différents domaines. Cela ne peut être réalisé sans avoir une connaissance approfondie des filières.

L'identification des spécifications, « critères d'entrée », propres à chaque filière est une phase essentielle pour qualifier l'adéquation entre les caractéristiques que les sédiments fins peuvent présenter et les voies de valorisation. En effet, la pré-orientation des sédiments de barrage, vers une filière de valorisation matière, ne peut se concevoir qu'en disposant d'éléments techniques d'interprétation propres à chaque domaine.

Pour ce faire, des éléments techniques d'interprétation, utilisés pour qualifier les matières premières, sont énoncés. Ils proviennent de guides techniques de références, de normes, ou de classifications, fruit d'un retour d'expérience conséquent. Des exemples types des matériaux utilisés et de leurs caractéristiques sont présentés pour certaines filières. La réglementation en vigueur pouvant s'appliquer, parfois inadaptée, est rappelée.

Des informations sur les contextes industriels sont exposées. Cela concerne notamment la répartition spatiale des usines de fabrication (cimenteries et usines de terre cuite). Nous verrons en effet dans le chapitre 5 que la proximité des sites de valorisation est un paramètre important. Le transport impactant très fortement le coût et donc la faisabilité d'une valorisation.

Ainsi, ce chapitre présente cinq voies détaillées en trois volets : le principe et la mise en œuvre de la filière, les recommandations / exigences techniques et les travaux de recherche et les réalisations existantes utilisant des sédiments.

Ce chapitre bibliographique est donc la partie clé de voûte de la thèse. En effet, il décrit les filières, il fournit les spécifications qui permettront de discuter de l'adéquation entre les sédiments de barrage étudiés et les usages potentiels et enfin, il donne des éléments, tant techniques et réglementaires que spatiaux, fondamentaux pour la conception d'un outil décisionnel de pré-orientation des sédiments fins vers les filières de valorisation.

1. LA FILIERE « CIMENT »

1.1. DESCRIPTION

1.1.1. Généralités

Le ciment est un produit hydraulique constitué d'une poudre minérale finement moulue destiné à être utilisé comme liant dans des mortiers ou des bétons. Gâché avec de l'eau, le ciment durcit, aussi bien dans l'air que sous l'eau. Il acquiert une certaine résistance mécanique qui se doit de rester stable et durable dans le temps.

Le ciment le plus utilisé dans le monde est le ciment dit « Portland ». C'est un produit connu et maîtrisé par tous les acteurs de la chaîne de construction du bâtiment, du producteur aux consommateurs. L'utilisation la plus commune du ciment est le béton qui est un mélange d'agrégats de différentes granulométries, sables, graviers, ciment et eau.

En 2011, en France, ce sont environ 21,4 millions de tonnes de ciment qui ont été consommées [SFIC, 2012a]. Pour couvrir ces besoins, 41 sites industriels (cimenteries et centres de broyage) étaient en service. En 2007, la répartition de la consommation entre les domaines d'emploi était de 62,5 % pour le bâtiment et 37,5 % pour les travaux publics [SFIC, 2007].

Les ciments courants sont fabriqués à partir d'un mélange de calcaire (CaCO_3) et d'argile (SiO_2 et Al_2O_3) dans des proportions voisines de 80 % - 20 %. Ces matières premières sont extraites de carrières proches du site de production, pour des considérations économiques liées au coût du transport. A ce mélange, peuvent être ajoutés des matériaux correctifs tels que de la bauxite, des oxydes de fer ou d'autres éléments, fournissant le complément d'alumine, de fer et de silice requis. L'ensemble est mélangé pour obtenir une composition régulière du ciment. Le tableau 2-1 donne la composition chimique en éléments majeurs recherchée pour un cru.

Tableau 2-1. Composition chimique du cru (en % massique sur calciné) d'après CIMBETON [2005a]

<i>CaO</i>	<i>SiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>
65 - 70	18 - 24	4 - 8	1 - 6

Ces matières sont ensuite séchées et broyées, pour obtenir la « farine ». Celle-ci passe ensuite lentement dans un four, légèrement incliné et rotatif (1,5 à 3 tr/min) dont la température atteint 1450°C. Durant la montée en température intervient la décarbonatation du carbonate de calcium qui donne de la chaux vive, ainsi que la scission de l'argile en silice et alumine. Puis, il y a formation de silicates et d'aluminates de chaux : c'est la clinkérisation. Le produit ainsi obtenu, le clinker, est broyé et mélangé avec du gypse et d'autres éléments d'addition (laitiers, cendres volantes,..) pour constituer le ciment. Le ciment est donc un mélange dont la matière active, le liant, est le clinker. La chimie des ciments étant une chimie des oxydes, les notations conventionnelles couramment utilisées par les cimentiers désignent les oxydes par des lettres. Le tableau 2-2 indique la notation abrégée dite « notation shorthand ».

Tableau 2-2. Notations adoptées par les cimentiers pour les oxydes majeurs

<i>C</i>	<i>S</i>	<i>A</i>	<i>F</i>
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃

1.1.2. Phases cimentaires principales

Un clinker Portland est constitué de 4 phases principales. Il s'agit de l'alite, la bélite, l'aluminate, et la brownmillerite. Le tableau 2-3 indique la composition minéralogique moyenne d'un clinker.

Ces phases sont fonction de la composition chimique des matières premières, du temps de cuisson et des températures utilisées. Sous l'effet de la chaleur, les constituants de l'argile (silicates d'alumine

et oxydes de fer), se combinent avec la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et aluminates de chaux.

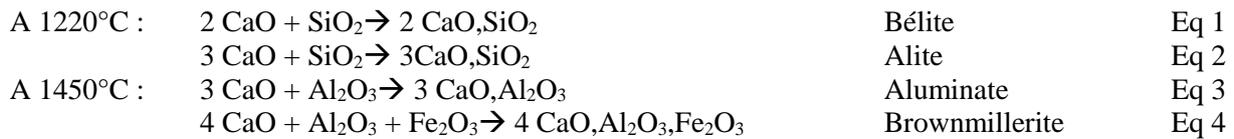


Tableau 2-3. Composition minéralogique du ciment Portland et propriétés des phases sur le ciment [Pliskin, 1993]

Nom du constituant (appellation)	Formule chimique	Notation	Teneurs minimales et maximales (%)	Teneur moyenne (%)
<i>Silicate tricalcique</i> (alite)	$3\text{CaO}, \text{SiO}_2$	C3S	40 – 70	60
<i>Silicate bicalcique β</i> (bélite)	$2\text{CaO}, \text{SiO}_2$	C2S	0 – 30	15
<i>Aluminate tricalcique</i> (aluminate)	$3\text{CaO},$ Al_2O_3	C3A	2 – 15	8
<i>Alumino-ferrite</i> <i>tétracalcique</i> (brownmillerite)	$4\text{CaO},$ $\text{Al}_2\text{O}_3,$ Fe_2O_3	C4AF	0 – 15	8

Bien que chaque phase remplisse une fonction différente dans la qualité du produit final, les plus importantes sont l'alite et la bélite, qui sont les plus abondantes dans le clinker et qui apportent la plus grande contribution à la résistance à la compression [Bogue et Lerch, 1934]. Plus précisément, la bélite, second minéral du clinker en terme d'abondance, est le plus important en terme de prise car il est responsable du durcissement secondaire (c'est-à-dire après la prise initiale) du ciment [Thiéry *et al.*, 2013].

1.1.3. Fabrication des ciments

On distingue le plus souvent plusieurs étapes principales constituant le procédé de fabrication du ciment :

- L'extraction de la matière dans la carrière et son homogénéisation ;
- La préparation des matières premières afin de constituer le cru ;
- La cuisson aboutissant à la création du clinker ;
- Le broyage du clinker et les ajouts pour fabriquer le ciment ;
- Le stockage ;
- L'expédition des ciments.

Il existe 4 voies de fabrication : humide, semi-humide, semi-sèche et voie sèche. Cette dernière technique est de loin la plus employée, aujourd'hui en France [CIMBETON, 2005b]. C'est cette voie qui est décrite par la suite.

Les matières premières qui apportent les oxydes nécessaires pour synthétiser le clinker sont issues de carrières. Le calcaire est la matière première principale : elle est ajoutée à raison de 75 à 80 % dans le mélange cru. Il contient majoritairement de la calcite CaCO_3 . Les autres oxydes sont en général apportés par l'argile. Des ajouts peuvent être nécessaires pour ajuster la composition du mélange cru. Du sable, du minerai de fer et de la bauxite sont couramment utilisés comme correcteur.

Les matières premières sont extraites dans des carrières à proximité de la cimenterie puis elles sont concassées afin de disposer de grains fins. Un mélange de 80 % de calcaire et de 20 % d'argile est réalisé dans un hall de pré-homogénéisation. Cette phase permet l'homogénéité du mélange cru ainsi

que sa régularité de composition chimique. Il s'agit de paramètres essentiels pour l'économie du procédé de fabrication.

La matière est reprise à partir des tas de pré-homogénéisation par des roues-pelles, puis elle est broyée et séchée. Les particules ont alors une granulométrie inférieure à 200 μm .

L'étape de cuisson du cru comporte deux phases : une phase de décarbonatation partielle de la poudre crue dans un pré-calciateur (libérant CaO), et une étape de cuisson dans un four rotatif.

Le préchauffeur est une succession d'échangeurs à cyclone, qui chauffent progressivement le cru arrivant par le haut. La poudre est ainsi portée à une température comprise entre 800°C et 1 000°C. Ce sont les gaz chauds provenant du four rotatif qui assurent ce préchauffage. Cette étape assure la décarbonatation partielle du cru avant l'entrée dans le four, voir sur la figure 2-1.

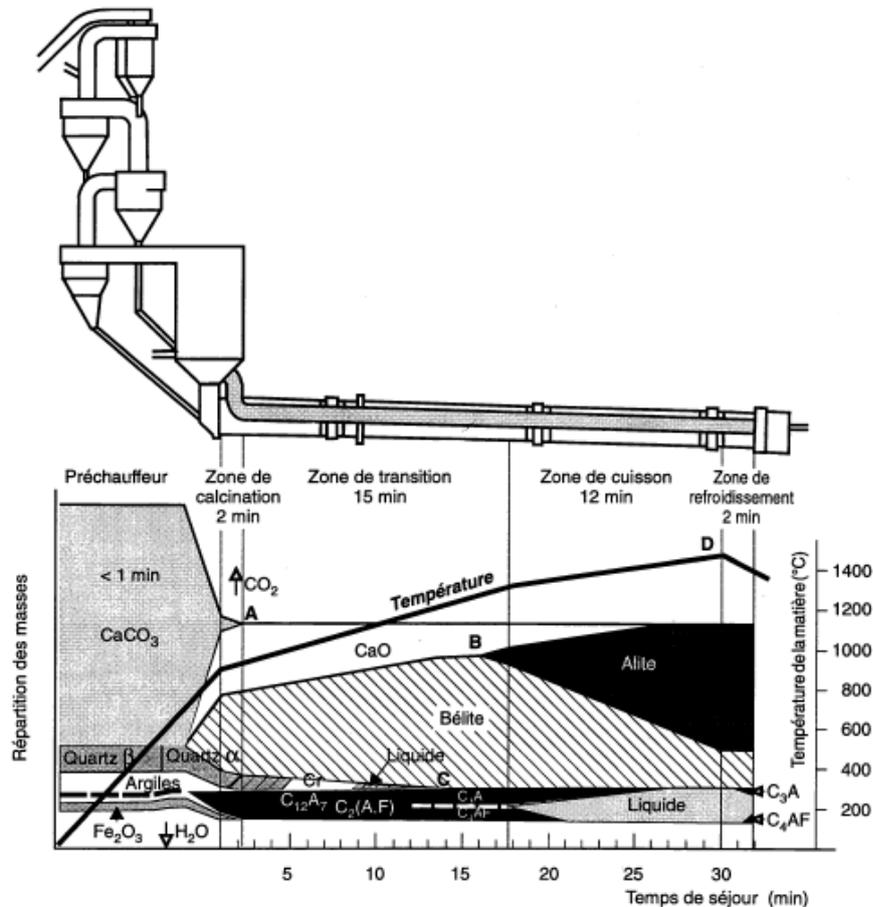


Figure 2-1. Formation des quatre phases principales du clinker dans la partie tournante du four [Baron et Ollivier, 1996]

Le four cylindrique, de longueur comprise entre 50 et 90 mètres, tourne à la vitesse de 1,5 à 3,5 tr/min. Grâce à la légère inclinaison du four, la matière transite pendant 30 à 60 minutes, vers la partie la plus chaude à 1450°C. Dès l'entrée dans le four à 1050°C, des réactions se produisent. La matière achève sa décarbonatation et subit plusieurs réactions à l'état solide jusqu'à 1250°C. Puis un ensemble de réactions solide-liquide, constituant la clinkérisation, mène à la formation des minéraux constitutifs du clinker.

Le refroidisseur fige, par trempe à l'air, le clinker dans l'état où il se trouve aux hautes températures de cuisson. La vitesse de refroidissement, particulièrement aux hautes températures, affecte le mode et la texture de cristallisation des composés du clinker, et par la même occasion, leur réactivité.

En effet, la trempe fige les espèces minérales instables à température ambiante, le silicate tricalcique C_3S et le silicate bicalcique C_2S sous sa forme allotropique β , la seule qui soit capable de réagir avec l'eau. C_3S a une fusion incongruente et se décompose en dessous de 1250°C. Si le

refroidissement était lent, le C_3S se décomposerait en C_2S et en C . De plus, le C_2S adopterait une forme allotropique γ qui est inerte.

1.1.4. Les constituants des ciments

La variété des constituants permet de proposer divers types de ciments, mais la fabrication s'organise principalement autour de la préparation de leur constituant commun, le clinker Portland. Le clinker réagit avec l'eau pour développer son potentiel hydraulique. Ces réactions doivent être tempérées par le régulateur de prise, généralement du sulfate de calcium (gypse ou anhydrite). Les additions peuvent être utilisées pour des raisons économiques, pour leur potentiel hydraulique latent, ou pour leur potentiel pouzzolanique.

La norme EN 197-1 contient les notations utilisées pour les différents constituants du ciment qui sont décrits par la suite.

- *Clinker (K)* : Constituant de base du ciment, il résulte de la calcination à haute température (1 450 °C) d'un mélange homogène de calcaire et d'argile, appelé cru. Il entre dans la composition de tous les ciments courants.
- *Laitier de haut fourneau (S)* : Résidu de l'industrie sidérurgique, il est issu du refroidissement rapide de la scorie fondue provenant de la fusion du minerai de fer. Ce matériau présente des caractéristiques hydrauliques latentes. Il est utilisé pour la fabrication de ciments entrant dans la composition de bétons devant résister à des environnements agressifs.
- *Pouzzolane (naturelle P ; calcinée Q)* : D'origine généralement volcanique, cet élément composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer, parfois activé thermiquement, améliore la qualité hydraulique des ciments.
- *Cendres volantes (siliceuses V ; calciques W)* : Elles proviennent du dépoussiérage des gaz de chaudières alimentées au charbon pulvérisé. Mélangées au clinker, elles se comportent comme les pouzzolanes.
- *Schiste calciné (T)* : Ils sont produits dans des fours spéciaux à une température de 800°C. Finement broyés, les schistes calcinés ont de fortes propriétés hydrauliques et pouzzolaniques.
- *Calcaire (L ; LL si le COT < 0,2 %)* : Il peut être extrait dans la carrière même de la cimenterie. Il peut rentrer dans des proportions allant jusqu'à 35 % de la masse totale du ciment. Il permet d'éclaircir la couleur de certains ciments et apporte une certaine onctuosité aux mortiers et bétons.
- *Fumées de silice (D)* : Particules sphériques très fines, elles sont obtenues par broyage de quartz. Leur ajout permet de fabriquer des bétons très performants en termes de résistance.
- *Additifs* : Autres constituants servant à améliorer la fabrication du ciment ou ses propriétés. Leur quantité globale ne peut pas dépasser 1 % en masse de ciment. Cette limite est à 0,2 % pour les additifs organiques (extrait sec).
- *Sulfate de calcium* : Il se présente sous forme de gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ou d'anhydrite ($CaSO_4$) dans des roches sédimentaires. Ajouté à hauteur de 3 à 5 %, il est indispensable à la régulation de la prise.

1.1.5. Les types de ciments

Il existe plusieurs types de ciments Portland. Chaque type de ciment se différencie par une teneur en un ou plusieurs constituants qui lui est propre. Le type et la sous-classe informent sur les constituants entrant dans la composition du ciment et fixent les limites de leurs proportions. Les cinq types sont :

- Le CEM I ou ciment Portland, contient au moins 95 % de clinker et au plus 5 % de constituants secondaires. Les CEM I conviennent pour le béton armé ou le béton précontraint où une résistance élevée est recherchée.

- Le CEM II A ou B ou Ciment Portland composé, contient au moins 65 % de clinker et au plus 35 % d'autres constituants : laitier de haut-fourneau, fumée de silice (limitée à 10 %), pouzzolane naturelle, cendres volantes, calcaires... Les CEM II sont bien adaptés pour les travaux massifs.
- Le CEM III A ou B ou ciment de haut-fourneau, contient entre 36 et 80% de laitier de haut-fourneau et 20 à 64% de clinker.
- Le CEM III C ou ciment de haut-fourneau contient au moins 81 % de laitier et 5 à 19 % de clinker.
- Le CEM IV A ou B est un ciment de type pouzzolanique. Avant l'introduction de la NF EN 197-1, il était connu sous l'appellation CPZ. Ce type de ciment n'est pas fabriqué en France.
- Le CEM V A ou B ou ciment composé (anciennement ciment au laitier et aux cendres) contient de 20 à 64 % de clinker, de 18 à 50% de cendres volantes et/ou de 18 à 50% de laitier de haut-fourneau.

Les deux types de ciment les plus produits en 2011 sont le CEM II avec 51,7 % de la production et le CEM I avec 26,8 % de la production des cimenteries françaises [SFIC, 2012b].

Les CEM III et CEM V qui comportent du laitier de haut-fourneau sont bien adaptés aux travaux hydrauliques souterrains, aux fondations et aux travaux en milieu agressif. Leur utilisation permet de réduire considérablement les émissions de CO₂ grâce à la substitution du clinker par d'autres constituants. Entre 2000 et 2011, la part de production de ces types de ciment est ainsi passée de 6,6 à 12,9 % [SFIC, 2001, 2012b].

Le tableau 2-4 synthétise ces différents types de ciments courants ainsi que leurs compositions en constituants d'après la norme NF EN 197-1.

Tableau 2-4. Représentation simplifiée des 5 types de ciments courants et leurs compositions

<i>Types de ciments courants</i>	<i>Notation</i>	<i>Clinker (K)</i>	<i>Autres constituants (S, D, P, Q, V, W, T, L et LL)</i>	<i>Constituants secondaires</i>
<i>Ciment Portland</i>	<i>CEM I</i>	95 – 100	-	0 – 5
<i>Ciment Portland composé</i>	<i>CEM II A</i>	80 – 94	6 – 20	0 – 5
	<i>CEM II B</i>	65 – 79	21 – 35	0 – 5
<i>Ciment de haut fourneau</i>	<i>CEM III A</i>	35 – 64	36 – 65	0 – 5
	<i>CEM III B</i>	20 – 34	66 – 80	0 – 5
	<i>CEM III C</i>	5 – 19	81 – 95	0 – 5
<i>Ciment pouzzolanique</i>	<i>CEM IV A</i>	65 – 89	11 – 35	0 – 5
	<i>CEM IV B</i>	45 – 64	36 – 55	0 – 5
<i>Ciment composé</i>	<i>CEM V A</i>	40 – 64	36 – 60	0 – 5
	<i>CEM V B</i>	20 – 38	62 – 80	0 – 5

Dans le contexte global de réduction des coûts et des émissions de CO₂, des travaux de recherche initiés par les producteurs de ciment ont pour objectif d'abaisser la teneur en clinker dans leurs ciments. Jusqu'à présent, les cendres volantes et le laitier de haut fourneau étaient largement employés pour répondre à cet objectif.

En France, la quantité de ces matériaux est amenée à diminuer. En effet, les cendres volantes et les laitiers sont tributaires d'aléas technico-économiques et l'on observe actuellement une réduction du parc des chaudières utilisant du charbon comme combustible ainsi qu'une diminution de l'industrie sidérurgique.

De ce fait, il semble important que d'autres matériaux soient pris en compte. Des tests et essais doivent être menés dès à présent en vue d'accumuler des connaissances sur des composants alternatifs potentiels du ciment si l'on souhaite voir évoluer les normes actuelles.

Dans cette optique de diminution de la teneur en clinker dans le ciment en vue d'améliorations environnementale et économique, Schneider *et al.* [2011] définissent l'éventail des types de ciments aujourd'hui normalisés en Europe et l'extension qui est en cours de recherche, voir figure 2-2.

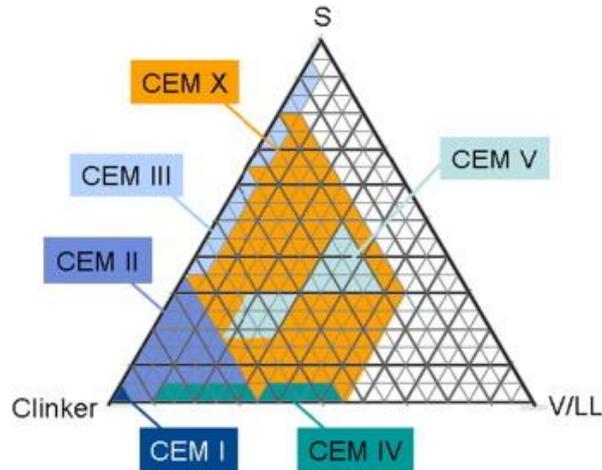


Figure 2-2. Types de ciments selon l'EN 197-1 et les extensions potentielles

1.1.6. Matières premières alternatives en cru de cimenterie

Le cru de cimenterie est principalement composé de calcaire afin d'apporter du calcium et d'argile ayant pour rôle d'apporter la silice et l'alumine, ces éléments étant indispensables pour le développement des phases minérales du clinker au cours de la cuisson.

Tableau 2-5. Matières premières pour la fabrication de clinker

<i>Eléments</i>	<i>Matériaux</i>	<i>Eléments</i>	<i>Matériaux</i>
<i>Ca</i>	Calcaire, marne et craie	<i>Si-Al-Ca</i>	Laitier de haut fourneau
	Autres comme : - Boue carbonatée issue du traitement des eaux - Chaux hydratée - Fluorure de calcium		Cendres volantes Schiste bitumineux Tuf volcanique Autres comme : - Cendres d'incinération - Résidus minéraux (i.e. sols souillés aux hydrocarbures)
<i>Si</i>	- Sables de carrières - Sables de fonderies usagés	<i>Al</i>	- Résidus de traitement de l'aluminium - Bauxite
<i>Si-Al</i>	Argile Bentonite		- Gypse naturel
<i>Fe</i>	Minerai de fer	<i>S</i>	- Anhydrite naturelle - Boues de désulfuration
	Résidus métallurgiques tels que: - Résidus de pyrites grillées - Poussières d'aciéries - Ecaillés de laminage		

Dans de nombreux cas, la composition chimique du cru réalisée seulement avec du calcaire et de l'argile doit être corrigée et pour cela, il est nécessaire d'avoir recours à des matières premières complémentaires. Dans ce cadre, des matières premières alternatives sont couramment utilisées et ajoutées au cru afin de corriger la composition chimique de celui-ci. Les matériaux classiques et alternatifs typiquement utilisés dans le cru sont donnés dans le tableau 2-5.

1.1.7. Valorisation matière des déchets

Pratiquée depuis les années 70, la valorisation de déchets en industrie cimentière participe à la transition énergétique et à l'économie circulaire : les déchets des uns deviennent les combustibles et matières premières des autres et ce, tout en économisant l'énergie fossile et en réduisant le besoin d'ouvrir de nouvelles carrières.

Dans la fabrication du ciment, plusieurs étapes du procédé permettent la valorisation matière de déchets ou coproduits industriels, favorisant ainsi l'économie de ressources naturelles (principalement de calcaire et d'argile) et, selon les cas, réduisent le volume d'émission de CO₂. De plus, l'usage de ces matières évite leur mise en centre de stockage de déchets. Certains déchets, qui bénéficient d'un retour d'expérience important, font à présent l'objet de normes et leur utilisation est devenue courante.

Dans le cas des sédiments, les possibilités techniques de les valoriser concernent soit une valorisation dans le cru, soit une valorisation comme constituant, en tant que pouzzolane, après avoir subi un traitement thermique. Dans le contexte normatif actuel, ce second cas envisageable ne permet pas d'obtenir un ciment normalisé. La figure 2-3 situe ces deux possibilités d'entrée des sédiments dans le procédé de fabrication du ciment.

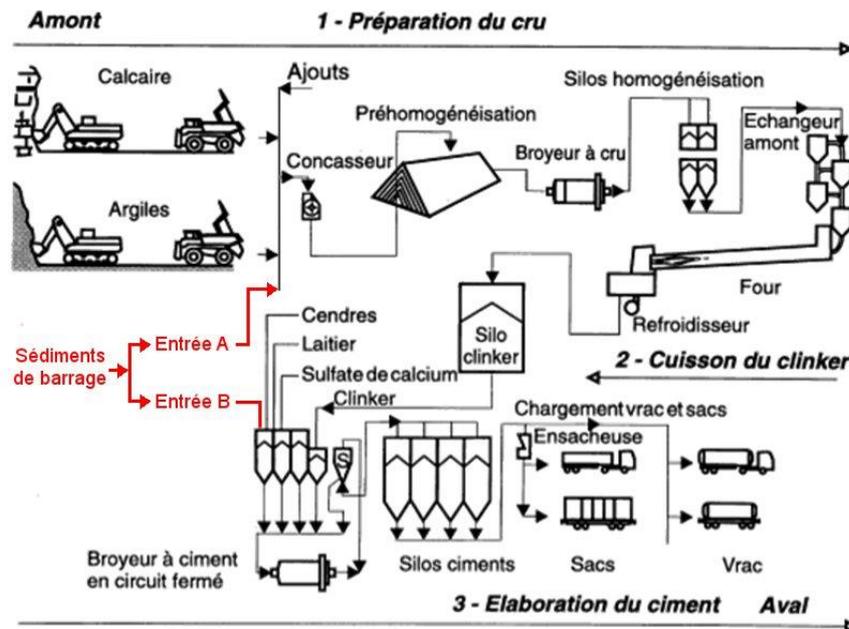


Figure 2-3. Fabrication du ciment d'après Baron et Ollivier [1996] et entrées potentielles des sédiments
Entrée A : valorisation dans le cru ; Entrée B : valorisation comme constituant (après calcination)

1.2. SPECIFICATIONS

Dans le domaine du ciment, il y a un grand nombre de normes nationales et internationales. Au niveau international, les normes ASTM sont très utilisées pour le commerce mondial du clinker et du ciment. Elles font une distinction entre les ciments Portland et les ciments composés. Les ciments Portland reposent principalement sur la norme ASTM C150 « *Specification for Portland Cement* » et pour les ciments composés sur la norme ASTM C595 « *Standard Specification for Blended Hydraulic Cements* ».

En France, la norme NF EN 197-1 concerne les ciments courants. Cette norme définit chaque type de ciment courant et donne les proportions pour lesquelles les constituants doivent être associés pour obtenir des produits différents dans une plage de neuf classes de résistance. La définition inclut également les exigences que les constituants doivent satisfaire et les exigences mécaniques, physiques et chimiques.

D'autres normes spécifiques existent. Elles concernent soit des propriétés particulières (prise mer [NF P 15-317], résistance aux eaux sulfatées [NF P 15-319] et à la teneur en sulfures limitée [NF P 15-318] qui sont destinées aux ouvrages en béton précontraint), soit des ciments à usage ciblé : ciment alumineux fondu [NF EN 14647], ciment prompt naturel [NF P 15-314] et ciment à maçonner [NF EN 413-1].

1.2.1. Composition chimique et minéralogique du cru pour la fabrication du clinker

Théoriquement, un cru de cimenterie est composé d'un mélange de calcaire et d'argile dans lequel peuvent venir s'ajouter d'autres constituants suivant l'ajustement des minéraux nécessaires. Les caractéristiques de ces matières premières naturelles varient d'un site à un autre et au sein d'une même carrière. Par conséquent, la composition du ciment Portland est différente d'une cimenterie à une autre avant tout à cause des caractéristiques minéralogiques des matières premières disponibles puis des spécifications locales du ciment. Chaque fabrication est un cas particulier et produit un clinker unique fortement dépendant de la nature minéralogique des matériaux extraits des carrières qui alimentent la cimenterie.

Thiéry *et al.* [2013] rappellent le cas particulier des couches du Berriasien (« calcaire de la Porte de France »), exploitées dans la région grenobloise, qui présentent dans certains bancs la composition idéale de « ciment naturel », c'est-à-dire qu'elles contiennent naturellement les bonnes proportions de calcaire et d'argile.

Le contexte géologique a donc une influence très forte sur la composition du cru ainsi que sur le recours à des matières premières alternatives utilisées pour corriger sa composition. Ainsi, les crus de cimenterie sont constitués de manière à équilibrer les différents éléments principaux du clinker (calcium, silicium, aluminium et fer).

Afin d'obtenir des crus dans la stœchiométrie souhaitée en éléments majeurs, des ratios et modules ont été définis. Ils sont les résultats d'études sur les mécanismes de formation et de réaction du clinker Portland et permettent le calcul de la proportion de chacun des ingrédients du cru. Les principaux sont les suivants :

$$\text{- Facteur de saturation en chaux (LSF)} = \left(\frac{\text{CaO}}{2,8 \times \text{SiO}_2 + 1,2 \times \text{Al}_2\text{O}_3 + 0,65 \times \text{Fe}_2\text{O}_3} \right) \quad \text{Eq. 5}$$

$$\text{- Module silicique (SR)} = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad \text{Eq. 6}$$

$$\text{- Module aluminoferrique (AR)} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad \text{Eq. 7}$$

$$\text{- Module hydraulique (HM)} = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad \text{Eq. 8}$$

La longue pratique industrielle de fabrication du clinker Portland a fixé des limites de variation des différents indices. Les valeurs préconisées pour les clinkers, selon Taylor [1997], sont données par le tableau 2-6.

Tableau 2-6. Intervalles préconisés pour les modules chimiques

<i>Indice</i>	<i>LSF</i>	<i>SR</i>	<i>AR</i>	<i>HM</i>
Intervalle	0,92 – 0,98	2 – 3	1 – 4	2,1 – 2,4

Afin de connaître la composition minéralogique d'un clinker à partir de sa composition chimique, on emploie les formules de Bogue. Elles permettent en effet de calculer les proportions théoriques des phases du clinker ou du CEM I à partir de la composition en oxydes sur la base des hypothèses suivantes :

- Les quatre phases principales sont C₃S, C₂S, C₃A et C₄AF ;
- Tout le fer se trouve sous la forme C₄AF ;
- Al₂O₃ restant se retrouve sous la forme C₃A ;

- CaO restant et SiO₂ se combinent sous les formes C₃S et C₂S ;
- La combinaison entre les différents constituants est complète et les éléments mineurs présents dans le clinker n'interviennent pas.

Les formules originellement établies par Bogue, en 1929, surestiment fortement la teneur en C₃S et sous-estiment d'autant la teneur en C₂S. Les formules de Bogue actuellement utilisées sont :

$$C_3S = 4,07 C^* - 7,60 S^* - 6,72 A - 1,43 F$$

$$C_2S = 8,60 S^* + 1,08 F + 5,07 A - 3,07 C^*$$

$$C_3A = 2,65 A - 1,69 F$$

$$C_4AF = 3.04 F$$

avec : F = Fe₂O₃ ; A = Al₂O₃

$$C^* = CaO (total) - CaO (libre) - 1,27 CO_2 - 0,7 SO_3$$

$$S^* = SiO_2 (total) - SiO_2 (non combinée)$$

Remarque : Notons que la silice non combinée est supposée égale aux éléments insolubles.

Le tableau 2-7 donne, pour exemple, la proportion et la composition d'éléments entrant comme matière première pour la fabrication d'un clinker. Des gammes de compositions chimiques pour les matières premières de base et de crus utilisés pour la fabrication du clinker sont présentées dans le tableau 2-8.

Tableau 2-7. Exemple de composition d'un cru basé sur 4 composants [Hewlett, 2003]

	Calcaire	Schiste argileux	Sable	Oxydes de fer	Composition du cru	Clinker
Part dans la composition (%)	73	22,5	4,2	0,3	-	-
SiO ₂ (%)	1,4	37,9	95,0	2,7	13,6	20,3
Al ₂ O ₃ (%)	0,5	16,5	1,4	6,6	4,2	6,2
Fe ₂ O ₃ (%)	0,2	5,1	1,3	84,0	1,6	2,4
CaO (%)	53,7	15,4	1,0	2,7	42,7	64,1
CaCO ₃ (%)	95,9	27,5	-	-	-	-
Chaux libre (%)	-	-	-	-	-	1,0
C ₃ S (Bogue) (%)	-	-	-	-	-	57
C ₂ S (Bogue) (%)	-	-	-	-	-	15
C ₃ A (Bogue) (%)	-	-	-	-	-	12,4
C ₄ AF (Bogue) (%)	-	-	-	-	-	7,3

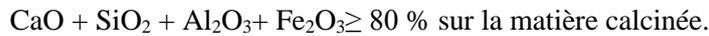
Tableau 2-8. Compositions chimiques courantes des matières premières et du cru pour la fabrication de clinker [CP/RAC, 2008 ; Schorcht et al., 2013]

Composants	Compositions courantes des matières premières de base			Cru
	Calcaire	Marne	Argile	
PF (CO ₂ +H ₂ O)	40 - 44	2 - 42	1 - 20	32 - 36
SiO ₂	0,5 - 3,0	3 - 50	37 - 78	12 - 16
Al ₂ O ₃	0,1 - 1,0	0,1 - 20	7 - 30	2 - 5
Fe ₂ O ₃	0,1 - 0,5	0,5 - 10,0	2 - 15	1,5 - 2,5
CaO	52 - 55	5 - 52	0,5 - 25,0	40 - 45
TiO ₂	0,0 - 0,7	0,0 - 0,7	0,2 - 1,8	0,0 - 0,5
MgO	0,5 - 5,0	0,5 - 5,0	~ 5	0,3 - 5
K ₂ O	~ 0,3	~ 3,5	~ 0,55	0,1 - 1,5
Na ₂ O	~ 0,1	~ 0,2	0,1 - 0,3	0,1 - 0,5
SO ₃	~ 0,1	0,1 - 4,0	~ 3	0 - 1,5
Cl	0,0 - 0,6	0,0 - 0,6	0,0 - 1,0	0,0 - 0,3
P ₂ O ₅	0,0 - 0,8	0,0 - 0,8	0,0 - 1,0	0,0 - 0,8

1.2.2. Exigences des cimentiers

En 2001, l'ensemble des groupes industriels constituant l'industrie cimentière française a signé un accord commun définissant les limites d'acceptabilité à l'entrée de l'usine des déchets minéraux utilisés en substitution aux matières premières du cru. Cette « charte de bonne pratique pour l'acceptation des déchets minéraux destinés à être ajoutés comme matière première en cimenterie » énonce les trois spécifications suivantes :

1 – En tant qu'éléments constitutifs du cru, les déchets doivent respecter la composition suivante :



2 – Les teneurs en « métaux lourds » dans les déchets ne doivent pas dépasser :

$$\text{Hg} \leq 10 \text{ mg/kg ;}$$

$$\text{Hg} + \text{Cd} + \text{Tl} \leq 100 \text{ mg/kg ;}$$

$$\text{As} + \text{Ni} + \text{Co} + \text{Se} + \text{Te} + \text{Cr} + \text{Pb} + \text{Sb} + \text{Sn} + \text{V} \leq 10\,000 \text{ mg/kg}$$

3 – La teneur en hydrocarbures totale des déchets minéraux incorporés dans le cru ne doit pas dépasser 5 000 mg/kg

En plus de cet accord, les cimenteries ont toutes des exigences qui leurs sont propres. Ces spécifications sur matériaux ajoutés directement dans le cru sont plus nombreuses et parfois plus contraignantes que celles données par la charte de bonne pratique. Le tableau 2-9 synthétise les spécifications de plusieurs cahiers des charges de cimenteries pour l'acceptation de matières premières alternatives.

Tableau 2-9. Exemples de valeurs limites pour des déchets utilisés comme matière première alternative dans différentes cimenteries.

Paramètres	Unité	France				Belgique		Suisse
		Usine A	Usine B	Usine C	Usine D	Usine E	Usine F	***
CaO+SiO ₂ + Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃		80	80	80	80	50	20	
HCT ¹	mg/kg MS	5 000	2 000*	5 000	5000			
PCDD/PCDF ²	ng TEQ/kg							10
PCB ³	mg/kg MS			50		5	5	50
PCB+PCT ⁴	mg/kg MS	50	50		50			
PCP ⁵	mg/kg MS	50			Absence			
S	%	1	4	5	2	2	1	
Cl total	%	0,5	0,2	1	2	1	0,5	
Br total	%	0,5			0,5			
I total	%	0,5			0,5			
F total	%	0,5	1	15	0,5			
F + Br + I	mg/kg MS					1 000	1 000	
As+Ni+Co+Se +Te+Cr+Pb+ Sb+Sn+V	mg/kg MS	10 000	10 000	10 000	5 000			
Cd + Tl + Hg	mg/kg MS	100	100	100	100			
Sb	mg/kg MS					150	150	20
As	mg/kg MS					100	100	20
Ba	mg/kg MS							600
Be	mg/kg MS							3
Cd	mg/kg MS					40	40	5
Cr	mg/kg MS	250	100	5 000		600	600	500
Co	mg/kg MS					80	80	100
Cu	mg/kg MS				20 000	800	800	500
Sn	mg/kg MS					500	500	100
Mn	mg/kg MS				10 000	900	900	
Hg	mg/kg MS	10	10	10	10	2	2	2
Ni	mg/kg MS					200	200	500
Pb	mg/kg MS			2 000		700	700	500
Se	mg/kg MS							1
Tl	mg/kg MS					6	6	1
V	mg/kg MS					300	300	200
Zn	mg/kg MS	10 000	5 000	15 000	2 000	4000	4000	1500
Na ₂ O+K ₂ O	% eq Na ₂ O			5				
P ₂ O ₅	%			15				
COT	%					5	5	
Siccité	%	> 90	**	>20		> 80 %	> 80	

1 : Hydrocarbures totaux ; 2 : Dioxines et furanes ; 3 : Polychlorobiphényles ; 4 : Polychloroterphényles ; 5 : Pentachlorophénol

*dont 1 000 mg/kg de HAP maximum ; **pelletable sans partie liquide ; *** OFEV [2005] : Seuils pour les déchets listés (sols, terre, déchets de déconstruction) dans l'annexe I de la directive

1.2.3. Spécifications sur les constituants

► Types de ciments et exigences relatives aux constituants

A l'heure actuelle, il existe en France cinq grandes catégories de ciment comprenant 27 ciments courants. La norme NF EN 197-1 en définit les champs d'application.

On a par convention :

$$\text{Clinker} + \text{Autres constituants} + \text{Constituants secondaires} = 100 \quad \text{Eq. 9}$$

En ce qui concerne les constituants entrant dans la composition des ciments, la norme NF EN 197-1 en énonce les spécifications d'entrée. Le tableau 2-10 renseigne sur les principales exigences relatives aux constituants pouvant entrer dans la composition des ciments courants.

La composition des ciments et leurs caractéristiques sont encadrées par la norme française NF EN 197-1. Elle contraint le produit final à posséder certaines exigences. Rappelons cependant qu'elle ne fournit pas d'informations sur les caractéristiques des matières premières qui rentrent dans la composition du cru.

Tableau 2-10. Exigences de la norme NF EN 197-1 relatives aux constituants des ciments

Constituants	Exigences	Normes d'essais
Clinker Portland (K)	$(C_3S + C_2S) > 2/3$ de la masse $(CaO/SiO_2) < 2$ $MgO < 5\%$ de la masse Cas des ciments résistants aux sulfates : $C_3A^* < 0\%$; 3 % ou 5 % selon les cas pour le CEM I - $C_3A < 9\%$ pour le CEM IV/A et B	[NF EN 196-2]
Laitier granulé de haut fourneau (S)	$(CaO + MgO + SiO_2) > 2/3$ de la masse $(CaO + MgO)/(SiO_2) > 1$	[NF EN 196-2]
Pouzzolane naturelle (P) et Pouzzolane naturelle calcinée (Q)	SiO_2 réactif $\geq 25\%$ de la masse Convenablement préparées (séchées ou traitées thermiquement et réduites en poudre)	[NF EN 196-2]
Cendre volante siliceuse (V)	$PF \leq 9,0\%$ (avec un temps de calcination d'1 heure) $CaO < 10\%$ en masse $SiO_2 \geq 25,0\%$ $Chaux libre \leq 1,0\%$ en masse ou $\leq 2,5$ si expansion < 10 mm dans un mélange 70/30 de CEMI/CV _{siliceuse}	[NF EN 196-2] [NF EN 196-2] [NF EN 196-2] [NF EN 451-1] et [NF EN 196-3]
Cendre volante calcique (W)	$PF \leq 9,0\%$ (avec un temps de calcination d'1 heure) $CaO \geq 10\%$ en masse $10,0\% \leq CaO \leq 15,0\% \Rightarrow SiO \geq 25,0\%$ $CaO \geq 15,0\% \Rightarrow Rc_{28j} \geq 10,0$ MPa Expansion < 10 mm dans un mélange 70/30 de CEMI/CV _{calcique}	[NF EN 196-2] [NF EN 196-1] [NF EN 196-3]
Schiste calciné (T)	$Rc_{28j} \geq 25,0$ MPa Expansion < 10 mm dans un mélange 70/30 de CEMI/Schiste Calciné	[NF EN 196-1] [NF EN 196-3]
Calcaire (LL, L)	$COT < 0,20\%$ en masse : LL $COT < 0,50\%$ en masse : L $CaCO_3 \geq 75,0\%$ (calculé à partir de la teneur CaO) $VBs < 1,20$ g/100g	[NF EN 13639] [NF EN 196-2] [NF EN 933-9]
Fumée de silice (D)	$SiO_2 \geq 85,0\%$ en masse $PF \leq 4,0\%$ (avec un temps de calcination d'1 heure) Silicium élémentaire $< 0,4\%$ $BET \geq 15,0$ m ² /g	[NF EN 196-2] [ISO 9286] [ISO 9277]

* $C_3A = 2,65A - 1,69F$ (selon la formule de Bogue)

1.2.4. Spécifications sur les ciments

Les spécifications sur les ciments portent sur des exigences physiques, chimiques et mécaniques. Les ciments sont répartis en trois classes de résistance, 32,5 ; 42,5 et 52,5, définies par la valeur minimale de la résistance normale du ciment à 28 jours en MPa. À chaque classe de résistance courante, correspondent trois classes de résistance à court terme : une classe de résistance à court terme ordinaire, une classe de résistance à court terme élevée, notée R, et une classe de faible résistance à court terme, notée L. La classe L est uniquement applicable aux ciments CEM III qui sont alors des ciments de haut fourneau à faible résistance à court terme. Cette dernière classe n'est pas indiquée dans le tableau 2-11 qui synthétise les exigences mécaniques.

Tableau 2-11. Exigences mécaniques des trois classes de résistance des ciments courants

Classe de résistance	Résistance à la compression (en MPa)		
	2 jours	7 jours	28 jours
32,5	-	> 16	32,5 – 52,5
32,5R	≥ 10	-	32,5 – 52,5
42,5	≥ 10	-	42,5 – 62,5
42,5R	≥ 20	-	42,5 – 62,5
52,5	≥ 20	-	≥ 52,5
52,5R	≥ 30	-	≥ 52,5

Les exigences sur les temps de début de prise, déterminés conformément à la norme NF EN 196-3, sont fonction de la classe de résistance du ciment. En effet, pour les classes 32,5, 42,5 et 52,5, les temps de début de prise sont respectivement supérieurs ou égaux à 75, 60 et 45 minutes. La stabilité est également déterminée conformément à la norme NF EN 196-3. Quelle que soit la classe du ciment, l'expansion doit être inférieure ou égale à 10 mm.

Les exigences chimiques vont, elles aussi, différer selon les types de ciment et leurs classes de résistance. Le tableau 2-12, issu de la norme NF EN 197-1 énonce les différentes exigences et les normes à suivre pour les essais. Un ciment courant résistant aux sulfates doit satisfaire des exigences chimiques supplémentaires pour être identifié par la notation SR. Ces exigences portent notamment sur la teneur en sulfate – qui doit être plus faible – et la teneur en C3A dont la spécification varie selon le type de ciment.

Tableau 2-12. Exigences chimiques définies en termes de valeurs caractéristiques [NF EN 197-1]

Propriété	Référence de l'essai	Type de ciment	Classe de résistance	Exigence ^{a)}
Perte au feu	NF EN 196-2	CEM I CEM III	Toutes classes	≤ 5,0 %
Résidu insoluble	NF EN 196-2 ^{b)}	CEM I CEM III	Toutes classes	≤ 5,0 %
Teneur en sulfate (SO ₃)	NF EN 196-2	CEM I CEM II ^{c)} CEM IV CEM V	32,5 N	≤ 3,5 %
			32,5 R	
			42,5 N	
			42,5 R	≤ 4,0 %
			52,5 N	
52,5 R				
		CEM III ^{d)}	Toutes classes	
Teneur en chlorure	NF EN 196-2	Tous types ^{e)}	Toutes classes	≤ 0,10 % ^{f)}
Pouzzolanité	NF EN 196-5	CEM IV	Toutes classes	Satisfait à l'essai

a) Les exigences sont données en pourcentage en masse de ciment produit fini.

b) Détermination des résidus insolubles dans l'acide chlorhydrique et le carbonate de sodium.

c) Les ciments de type CEM II/B-T et CEM II/B-M avec plus de 20 % de schiste calciné (T) peuvent contenir jusqu'à 4,5 % de sulfate SO₃ quelle que soit la classe de résistance.

d) Le ciment CEM III/C peut contenir jusqu'à 4,5 % de sulfate.

e) Le ciment de type CEM III peut contenir plus de 0,10 % de chlorure, mais dans ce cas, la teneur maximale en chlorure doit figurer sur l'emballage et/ou le bon de livraison.

f) Pour des applications en précontrainte, les ciments peuvent être produits selon une exigence plus basse. Dans ce cas, la valeur de 0,10 % doit être remplacée par cette valeur plus basse qui doit être mentionnée sur le bon de livraison.

Les spécifications sont précises pour les caractéristiques des ciments courants. Les exigences étant définies dans les normes. Les caractéristiques des composants des ciments sont eux aussi relativement bien encadrés par la normalisation.

Pour les matières premières composant le cru, le cahier des charges n'est pas clairement défini. Bien que des méthodes existent afin de calculer la composition d'un mélange selon les caractéristiques des matières à disposition ou que l'on souhaite employer, la composition d'un cru est le savoir-faire des groupes cimentiers. En effet, les usines peuvent avoir des exigences variées selon les procédés de fabrication employés, la réglementation qui encadre l'usine, le contexte géologique local, etc. De plus, certaines cimenteries sont équipées d'installations spécifiques permettant la valorisation de certains types de déchets, notamment issus de l'industrie métallurgique. Ces cimenteries bénéficient alors d'une expérience, parfois ancienne, de l'utilisation de matériaux alternatifs pour la fabrication du clinker.

1.3. APPLICATION AUX SEDIMENTS

Rappelons que deux entrées dans la fabrication du ciment peuvent être envisagées en vue d'une valorisation matière des sédiments (figure 2-3). Il s'agit d'utilisation :

- comme ajout dans le cru ;
- comme constituant, en tant que pouzzolane artificielle.

Le second cas implique un traitement thermique préalable pour envisager une utilisation.

1.3.1. Valorisation dans le cru

La faisabilité de l'utilisation de sous-produits et de déchets a été étudiée en vue d'une valorisation en matériau de substitution de matières premières pour la production de ciment. Les déchets étudiés sont notamment issus de l'industrie métallurgique [Shih *et al.*, 2005 ; Monshi et Asgarani, 1999 ; Bernardo *et al.*, 2007] et chimique [Gadayev et Kodess, 1999], du traitement de l'eau [Chen *et al.*, 2010 ; Lin *et al.*, 2012], de déchets de déconstruction [Schoon *et al.*, 2012 ; 2013 ; Puertas *et al.*, 2008] et de mâchefers d'incinération des ordures ménagères [Kikuchi, 2001 ; Shih *et al.*, 2003 ; Pan *et al.*, 2008].

Du fait de la composition chimique des sédiments, ceux-ci peuvent entrer comme substitut de matières premières pour la fabrication de clinker. Les caractéristiques de la plupart des sédiments fins des retenues hydroélectriques se rapprochent plus des matières premières traditionnelles issues des carrières que des déchets industriels – souvent dangereux – tant au niveau de leurs compositions minéralogiques qu'au niveau de leurs teneurs en contaminants anthropiques. Cependant, la littérature scientifique n'est pas abondante sur cette possibilité de valorisation pour le cas des sédiments.

► Fabrication d'un ciment à partir de sédiments marins

Les sédiments marins, du port de New York/New Jersey, ont fait l'objet de travaux portant sur cette possibilité de valorisation [Weimer *et al.*, 2002 ; Dalton *et al.*, 2004]. Selon Weimer *et al.* [2002], la quantité de substitution est limitée par la teneur en silice des matériaux de dragage. Les teneurs en éléments majeurs des sédiments dragués, déterminées par fluorescence X, sont données dans le tableau 2-13.

Tableau 2-13. Teneurs en éléments majeurs des sédiments marins du port de New York/New Jersey (en pourcentage massique) [Weimer *et al.*, 2002]

Sédiments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	PF
A	56,1	11,2	8,4	5,3	2,2	2,7	3,1	1,4	1,8	9,6
B	62,0	11,2	8,0	4,8	1,9	1,1	2,4	1,4	0,9	7,1
C	67,2	8,9	7,0	5,4	1,9	1,0	2,4	1,0	0,8	5,2

Trois taux de substitution ont été considérés (1,49 %, 6,63 % et 12,3 % de la masse du cru) pour une étude à l'échelle du laboratoire. Dalton *et al.* [2004], en plus de travaux à l'échelle du laboratoire, vont jusqu'à la mise en œuvre d'un pilote qui utilise un taux unique de substitution. Les sédiments entrent dans la composition du cru à hauteur de 6,5 % en matière sèche.

Les résistances à la compression, selon la norme d'essai ASTM C109, des mortiers de synthèse produits à l'échelle pilote répondent aux exigences de la norme ASTM C150 à partir de 28 jours. Aux jeunes âges, les résistances sont légèrement plus faibles que celles prescrites par la norme. Celles-ci sont plus faibles que celles développées par l'échantillon témoin qui ne contient pas de sédiment.

Les plus faibles résistances à la compression pourraient être dues à la présence d'alite en plus faible proportion dans le clinker de synthèse à base de déblais de dragage. La faible quantité d'alite pourrait être expliquée par le fait que la température de 1450°C n'est pas atteinte. Ceci a pour conséquence que la phase alite n'est pas complètement formée dans la phase finale de clinkérisation. Il est également possible que le refroidissement ne soit pas assez brutal.

Considérant les caractéristiques chimiques des matières premières utilisées par la cimenterie collaborant à ces travaux, un apport de 6,5 % de sédiments permet de réduire l'utilisation de bauxite, de fer et de cendre volante. Un maximum théorique de 14 % de sédiments est annoncé pour remplacer complètement l'utilisation de bauxite et de cendre volante.

► Fabrication d'un ciment à partir de sédiments fluviaux

Laronne [2000] rapporte que les sédiments fins présents dans la retenue israélienne de Shiqma ont fait l'objet d'une exploitation en 1998 profitant que la retenue était à sec. Le tableau 2-14 montre que la composition chimique des sédiments fins est proche de celle de l'argile « Kedma » en général utilisée localement pour la fabrication de ciment.

Tableau 2-14. Analyses chimiques des sédiments fins de la retenue de Shiqma et des argiles locales "Kedma" utilisées en cimenterie [Laronne, 2000].

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₄ ²⁻	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	PF
Sédiment de la retenue de Shiqma (Israël)	34,8	9,9	5,4	15,5	2,65	0,1	0,18	1,0	0,02	29,3
Argile « Kedma »	41,5	10,4	5,0	9,1	-	-	-	-	-	20,6

Plus récemment, Aouad *et al.* [2012], parviennent à élaborer un cru intégrant 39 % de sédiments (en % massique de matière sèche), issus du canal de la Scarpe (Pas-de-Calais, France). Le clinker fabriqué a des caractéristiques aussi bonnes, voire meilleures que celles d'un ciment Portland ordinaire. Pour caractériser le ciment synthétique, une analyse par DRX et un examen au MEB ont permis de caractériser la minéralogie. L'évolution de la chaleur d'hydratation a été suivie par calorimétrie isotherme et le suivi de l'évolution de la résistance à la compression à 1, 2, 4, 7, 14, 28 et 56 jours a été réalisé.

De par la faible capacité de production du four à l'échelle du laboratoire, l'étude des résistances à la compression des pâtes de ciments (avec un rapport E/C = 0,45) a été réalisée sur des cylindres de petite taille (hauteur = 12 mm, diamètre = 6 mm).

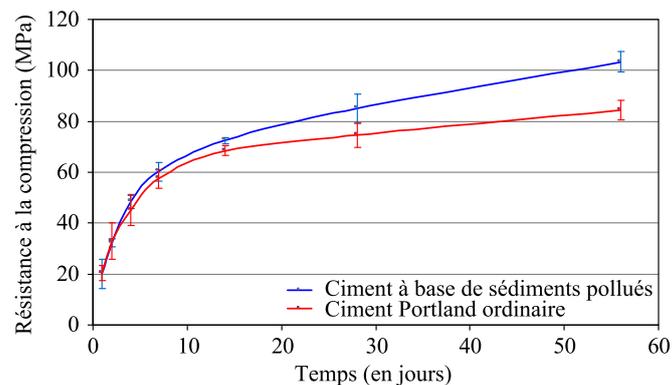


Figure 2-4. Résistances à la compression des pâtes de ciments obtenues après 1, 2, 4, 7, 14, 28 et 58 jours de maturation [Aouad *et al.*, 2012]

La mesure avec un calorimètre isotherme montre que le ciment de synthèse est au moins aussi réactif que le ciment Portland ordinaire de type CEM I 52,5. L'observation de l'évolution des résistances à la compression permet de constater que le ciment de synthèse a une résistance similaire au ciment ordinaire aux jeunes âges. En revanche, la résistance à la compression à 56 jours est de 20 points supérieure pour le ciment de synthèse, voir figure 2-4. Les auteurs émettent comme hypothèse que ces résultats sont dus au fait que les silicates sont plus réactifs dans le ciment de synthèse.

Ces travaux montrent donc qu'un taux important de sédiments peut être intégré en vue de limiter l'usage de matières premières et que le produit obtenu est d'une qualité très satisfaisante.

Cependant, les auteurs ne donnent pas d'informations sur la composition chimique des autres éléments entrant dans le mélange. Si les autres composants du cru sont de très bonne qualité, le dosage en sédiments peut être facilité. Dans des conditions réelles, il faudra composer le cru avec les matières premières – et leurs caractéristiques variables –, employées par les cimenteries.

► Fabrication d'un ciment bélitique

La production d'un ciment bélitique, dont l'alite (C₃S) est remplacée par la bélite (C₂S), est une façon d'économiser l'énergie thermique et de réduire les émissions de CO₂. En effet, la formation de

C₂S s'achève à des températures de cuisson plus basses comparativement au C₃S et, le cru nécessite un mélange ayant une plus faible teneur en CaCO₃.

Les travaux de Mazouzi et *al.* [2011] aboutissent à la fabrication d'un ciment bélitique par un procédé hydrothermal en utilisant un sédiment de barrage.

Le cru préparé est composé de deux déchets industriels : un sédiment issu d'un barrage situé à l'Ouest de l'Algérie comme source de silice, et une poussière de chaux éteinte récupérée dans un atelier d'ensachage comme source d'oxyde de calcium (CaO).

Les compositions chimiques et minéralogiques des matériaux ont été respectivement déterminées par fluorescence X (Tableau 2-15) et diffraction des rayons X et par analyse thermogravimétrique. Pour produire un ciment bélitique avec des propriétés mécaniques adéquates, la bélite doit présenter une réactivité améliorée (de forme allotropique α' ou β -C₂S).

Tableau 2-15. Teneurs en éléments majeurs des sédiments de la retenue de Fergoug [Mazouzi et *al.*, 2011]

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PF
Sédiment de barrage	38,72	11,94	7,23	15,81	2,66	0,37	21,03

Le mélange cru, composé de sédiments de barrage et de chaux éteinte avec un rapport molaire CaO/SiO₂ = 2, est mis dans une solution alcaline de KOH (1M), avec un rapport liquide/solide égale à 5. Le mélange liquide est agité pendant une durée de 4h à pression atmosphérique. La suspension obtenue est filtrée sous vide, séchée dans une étuve à 100 °C puis le mélange hydrothermal est caractérisé par DRX. La deuxième étape du processus de synthèse est la cuisson du mélange hydrothermal dans un four à moufle à une température de 1100°C.

Le ciment bélitique synthétisé à partir d'un mélange de chaux éteinte et de sédiments de barrage, renferme une grande proportion de bélite réactive (β -C₂S) et un très faible taux de chaux libre. Le suivi dans le temps par analyse DRX des phases minéralogiques de ce mélange hydraté a permis de constater la présence notable de C-S-H et de portlandite et leur augmentation entre 2 et 28 jours, ce qui montre la réactivité hydraulique de ce ciment. Cette réactivité est confirmée par des essais physiques et mécaniques : la prise du ciment bélitique est plus rapide par comparaison au ciment ordinaire. La résistance mécanique de ce ciment bélitique est similaire à celle d'un ciment ordinaire CEM I-CRS 42,5.

1.3.2. Valorisation comme constituant du ciment

Plus de 60 % du CO₂ émis par l'industrie cimentière provient de la décarbonation du calcaire. La réduction de la part du clinker par l'ajout d'autres constituants dans le ciment au sens de la norme NF EN 197-1 permet de réduire le volume d'émission.

L'intégration des sédiments comme constituant peut être envisagée à condition que ceux-ci possèdent un caractère pouzzolanique. Ce caractère est essentiellement lié au type et au degré de cristallinité des espèces argileuses. Un faible degré de cristallinité rend la silice et l'alumine partiellement mobilisables. L'activité pouzzolanique est liée à cette particularité.

Rodriguez et *al.* [2013] réalisent des mélanges avec des sédiments provenant de 5 retenues Algériennes, sans traitement préalable, avec du ciment. L'objectif était d'évaluer l'activité pouzzolanique des sédiments. Parmi les essais réalisés, des éprouvettes de mortier normalisé (EN 197-1) sont confectionnées. 20 % du ciment de type CEM I 42.5 N sont remplacés par des sédiments. Pour quatre des sédiments, la résistance à la compression à 90 jours est plus faible que celle du témoin. Pour le dernier sédiment, provenant de la retenue de Tipaza, la résistance à la compression à 90 jours est supérieure au témoin. Or, il s'agit également du sédiment dont les minéraux argileux ont la plus faible cristallinité parmi les sédiments étudiés.

Lorsque les sédiments fins ne possèdent pas naturellement un caractère pouzzolanique prononcé, il est possible de développer ce dernier en calcinant les sédiments à une température adaptée. Durant le processus de cuisson, les structures de l'argile vont se modifier vers un état « cristallographiquement » désorganisé. Une cuisson trop poussée fait apparaître une recristallisation de la structure. Dans la norme EN 197-1, il est précisé que les pouzzolanes naturelles calcinées (Q) sont des constituants

composés de « matériaux d'origine volcanique, d'argiles, de schistes ou de roches sédimentaires, activés thermiquement ». Ainsi, les sédiments fins, ayant une fraction argileuse importante, pourraient rentrer dans cette définition. Dans le CEM II, la part de pouzzolanes naturelles calcinées dans la composition du ciment peut atteindre 35 %.

Dans cette optique, Semcha [2006], parvient à fabriquer une pouzzolane artificielle à partir de sédiments fins issus du barrage de Fergoug (Algérie).

Les sédiments subissent d'abord une cuisson à 750°C durant 5h. Cette température optimale de cuisson est déterminée à l'aide d'une technique d'analyse minéralogique (DRX, ATD, ATG). Trois taux de substitution de ciment sont testés : 30, 50 et 70 % de la masse totale. Avec une substitution de 30 % de ciment par des sédiments calcinés, les performances mécaniques sont semblables aux témoins composés uniquement de ciment.

Il conclut que ce « ciment pouzzolanique de synthèse composé de 30 % de sédiment calciné et 70 % de ciment Portland (CEM I), représente un véritable intérêt économique (économie de 30 % de ciment) avec des performances mécaniques similaires, voire meilleures qu'un ciment ordinaire ». Une comparaison des résistances à la compression à 28 jours de la pouzzolane artificielle, avec une pouzzolane naturelle utilisée par les cimentiers, a été également réalisée. La pouzzolane de synthèse à base de sédiments calcinés présente un meilleur comportement mécanique.

Benamara *et al.* [2013], effectuent à nouveau une étude sur l'élaboration d'une pouzzolane de synthèse à partir des sédiments du barrage de Fergoug. Les sédiments bruts ont une granulométrie étalée avec un d_{90} égal à 80 μm . L'analyse chimique des sédiments est donnée dans le tableau 2-16.

Tableau 2-16. Analyse chimique des sédiments du barrage de Fergoug [Benamara *et al.*, 2013].

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	PF
Sédiment brut	43,79	8,41	4,01	16,02	2,07	0,13	25,07

Le traitement thermique est le même que celui utilisé par Semcha [2006] c'est-à-dire une température de cuisson de 750°C, durant 5 heures et une montée de température de 5°C/minute. Après analyse par DRX des produits cuits, on observe la disparition des raies caractéristiques de la kaolinite, de la gibbsite et des carbonates. Des éprouvettes cylindriques de pâte pure, de 2 cm de diamètre et de 4 cm de hauteur sont ensuite confectionnées avec des proportions de sédiment calciné de 0 (témoin), 30, 50 et 70 %. La quantité d'eau de gâchage est déterminée par l'essai de consistance normale. Le rapport E/L varie entre 0,3 et 0,45 pour le mélange contenant le plus de sédiment calciné. Les résistances mécaniques à la compression simple de différents mélanges sont présentées sur la figure 2-5.

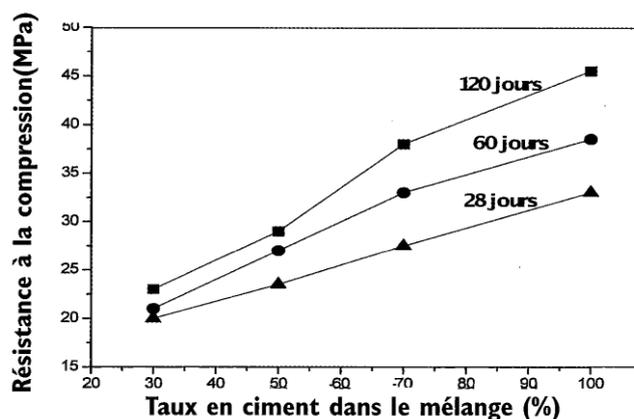


Figure 2-5. Résistances mécaniques à la compression des pâtes de sédiments calcinés/ciment [Benamara *et al.*, 2013].

Le mélange à 30 % de sédiments calcinés à 750°C est jugé honorable selon les auteurs puisqu'il conduit à des résistances en compression égales à 85 % de celles obtenues avec le ciment seul.

Bibi *et al.* [2008] mènent une étude sur un sédiment venant d'une autre retenue algérienne, à savoir les sédiments issus du dragage du barrage Ksob. L'objectif des travaux est d'évaluer l'influence d'ajout de matière argileuse calcinée sur les propriétés des matériaux cimentaires. Pour ce faire, deux matériaux sont étudiés : une marne rouge et des sédiments du barrage. Leurs compositions chimiques et minéralogiques sont respectivement rapportées dans le tableau 2-17 et dans le tableau 2-18.

Tableau 2-17. Composition chimique des matériaux argileux bruts, en %

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PF
Sédiment de Ksob	37,37	13,52	5,00	17,02	2,75	0,36	1,92	0,45	20,73
Marne rouge	32,96	6,87	3,01	23,24	5,80	1,19	1,96	0,01	24,46

Tableau 2-18. Composition minéralogique des matériaux argileux bruts, en %

	Quartz	Calcite	Dolomite	Feldspath plagioclase	Gypse	Minéraux ferrugineux	Kaolinite	Illite Muscovite	Chlorite
Sédiment de Ksob	37,37	13,52	5,00	17,02	2,75	0,36	1,92	0,45	20,73
Marne rouge	32,96	6,87	3,01	23,24	5,80	1,19	1,96	0,01	24,46

Ces matériaux font également l'objet d'une analyse thermique ATD/ATG. La marne rouge et le sédiment sont respectivement calcinés à 780 et 750°C.

Sept ciments sont ensuite élaborés à base de clinker (65 à 95 %), de gypse (5 %) et de matériaux argileux calcinés (10 à 30 %). Pour caractériser les ciments, ceux-ci subissent une analyse spectrométrique à fluorescence X. Pour discuter des compositions chimiques des ciments, les modules silicique, aluminoferrique et hydraulique sont calculés. Avec l'augmentation de la part de matériaux calcinés dans la composition du ciment, on constate que : la masse volumique des ciments diminue, la finesse augmente, le temps de prise augmente légèrement et la demande en eau augmente pour une consistance normale. Des essais mécaniques, à 2 et 28 jours, ont été réalisés sur des mortiers et des bétons pour chacun des sept ciments. Les résistances en compression à 28 jours sont synthétisées dans le tableau 2-19. On observe que l'intégration de 10 % de matériaux calcinés procure aux mortiers et bétons des résistances assez proches de celles obtenues en utilisant un ciment Portland ordinaire.

Tableau 2-19. Résistances à la compression simple des mortiers et bétons à base de ciments composés de matériaux argileux calcinés

Proportion de matériaux calcinés dans les ciments	Témoïn	Marne rouge			Sédiment de Ksob		
	0	10	20	30	10	20	30
Rc des mortiers à 28j (MPa)	44,22	43,5	39,38	36,41	42,63	38,01	35,67
Rc des bétons à 28j (MPa)	58	57	51,75	45,25	54	50,83	42,25

Dang *et al.* [2013], utilisent un sédiment marin provenant de l'estuaire de la Rance. D'abord, le sédiment est caractérisé avec plusieurs techniques. Les propriétés physiques telles que la teneur en eau, la granulométrie et la densité sont mesurées. La minéralogie est étudiée par DRX et ATG. Des analyses chimiques sont menées en vue de connaître la composition en éléments majeurs, en éléments traces métalliques, et en PCB et HAP. Les résultats montrent que les sédiments ont une forte teneur en eau (w = 198 %), une fraction fine importante (d₅₀ = 25 μm) et les principaux minéraux observés sont de la calcite, du quartz, de la kaolinite, de l'illite et de la muscovite.

Tableau 2-20. Concentration en éléments majeurs des sédiments de Lyvet [Dang et al., 2013]

	Si	Al	Fe	Ca	Mg	S	Na	K	Ti	Mn
Concentration (g/kg)	188,7	27,9	31,5	67,1	9,6	3,2	10,7	6,4	0,63	0,32

Ensuite, les sédiments sont calcinés (à 650 °C et 850 °C) pour éliminer les matières organiques et activer les minéraux argileux. Le choix de la température de cuisson est fondé sur les données des courbes ATG. En observant les courbes, deux changements apparaissent : à 600 °C et 800 °C. Le premier changement vers 600 °C correspond certainement à la transformation du kaolin en métakaolin. Le deuxième vers 800 °C correspond à la décomposition du calcaire. Ainsi, les deux températures de cuisson retenues pour l'étude sont :

- 650 °C : la température qui permet de transformer le kaolin en métakaolin sans décomposition de la calcite ;
- 850 °C : la température qui permet la décomposition de la calcite.

Les sédiments calcinés ont été ensuite utilisés comme liants à différents dosages (8, 16, 33 % par rapport à la masse sèche du liant) avec du ciment Portland (CEM I 52.5N). Les sédiments calcinés à 650°C et à 850°C sont respectivement référencés « L650 » et « L850 ».

	CEM I (g)	L650 (g)	L850 (g)	Eau (g)	Sable normalisé (g)
Témoin (T)	450	-	-	225	1350
8L650	414	36	-	225	1350
16L650	378	72	-	225	1350
33L650	300	150	-	225	1350
8L850	414	-	36	225	1350
16L850	378	-	72	225	1350
33L850	300	-	150	225	1350

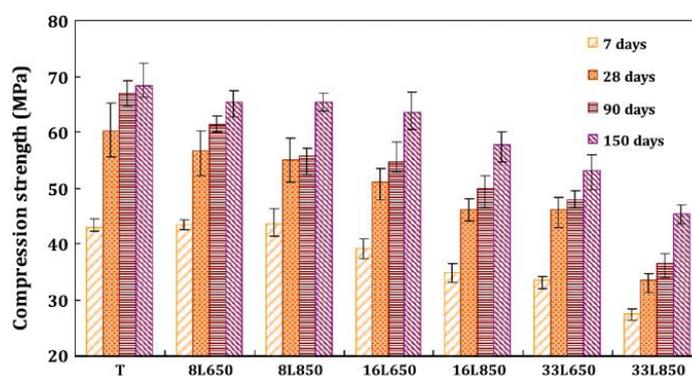


Figure 2-6. Compositions et évolution de la résistance à la compression des mortiers à base de sédiments calcinés [Dang et al., 2013]

Des pâtes et des mortiers normalisés sont préparés et caractérisés. La microstructure est étudiée par analyse thermique. La porosité ouverte, la densité apparente, la perméabilité au gaz, le module d'Young et la résistance à la compression sont mesurés. Les résultats montrent que la cuisson à 650 °C est plus pertinente que celle à 850 °C, en termes d'économie d'énergie et de performance mécanique, voir figure 2-6. L'étude conclut que le sédiment calciné à 650 °C a des propriétés intéressantes car il développe notamment une meilleure résistance à la compression qu'un filler calcaire et il peut être utilisé comme constituant dans les formulations de ciments composés.

1.3.3. Intérêts de la filière et des sédiments

► Intérêts de la filière pour les sédiments

Peu d'articles scientifiques traitent de la substitution de matière première par des sédiments, pourtant, les cimenteries disposent généralement de carrières à proximité où il serait possible de stocker les sédiments avant qu'ils n'entrent dans la cimenterie comme matière première. Pour réaliser à l'échelle industrielle cette valorisation, il sera nécessaire d'avoir un flux d'entrée régulier et de qualité constante. Les carrières peuvent alors servir de stockage temporaire permettant également un séchage. Les sédiments seraient alors utilisés au fur et à mesure des besoins pour la fabrication.

Cette filière est intéressante, car l'argile, la matière organique, ou la finesse des grains ne sont pas des freins pour cette filière.

De plus, en valorisation comme matière première, cette filière est adaptée pour recevoir des sédiments pollués en éléments traces métalliques. En effet, selon Gineys [2011], les cimenteries seraient en capacité de valoriser des déchets contenant de grandes quantités d'éléments métalliques.

Concernant les composés traces organiques, la haute température mène à leur destruction dans la plupart des cas. Cependant, certains types pouvant se volatiliser à basse température peuvent échapper au système de retraitement des fumées et peuvent être émis dans l'atmosphère. Pour pallier ce problème, certaines usines sont équipées d'un système de post-combustion des fumées de séchage (Thermal Oxidiser) permettant d'éliminer toute trace de composés organiques dans les rejets à la cheminée.

► Intérêts des sédiments pour la filière

La finesse des sédiments est un véritable atout car elle peut permettre l'économie de la phase de broyage. En revanche, comme il a été rappelé, il est important de connaître précisément la composition minéralogique des sédiments. Celle-ci peut avoir un rôle de correcteur de la minéralogie des matériaux issus des carrières sources.

A l'heure actuelle, les cimenteries ont des filières robustes afin de s'approvisionner en matières premières. Mais le contexte à venir, avec des contraintes grandissantes pour étendre les carrières, pour ouvrir de nouveaux sites d'extraction,... fait que les sédiments peuvent constituer un gisement potentiel pour limiter l'extraction de matières premières. Les sédiments ne sont plus à considérer comme un déchet couteux à éliminer mais comme une réelle ressource.

► Effet de proximité

Les cimenteries sont implantées près des gisements de calcaire, roche qui est très répandue en France. Du fait du contexte géologique français et de la demande en ciment, la concentration en installations est plus importante dans le quart sud-est (figure 2-7).

Si l'on considère la répartition dans cette zone, de nombreuses installations hydroélectriques y sont concentrées. De par cette proximité, les coûts de transport pour valoriser les sédiments dragués seraient minimisés.

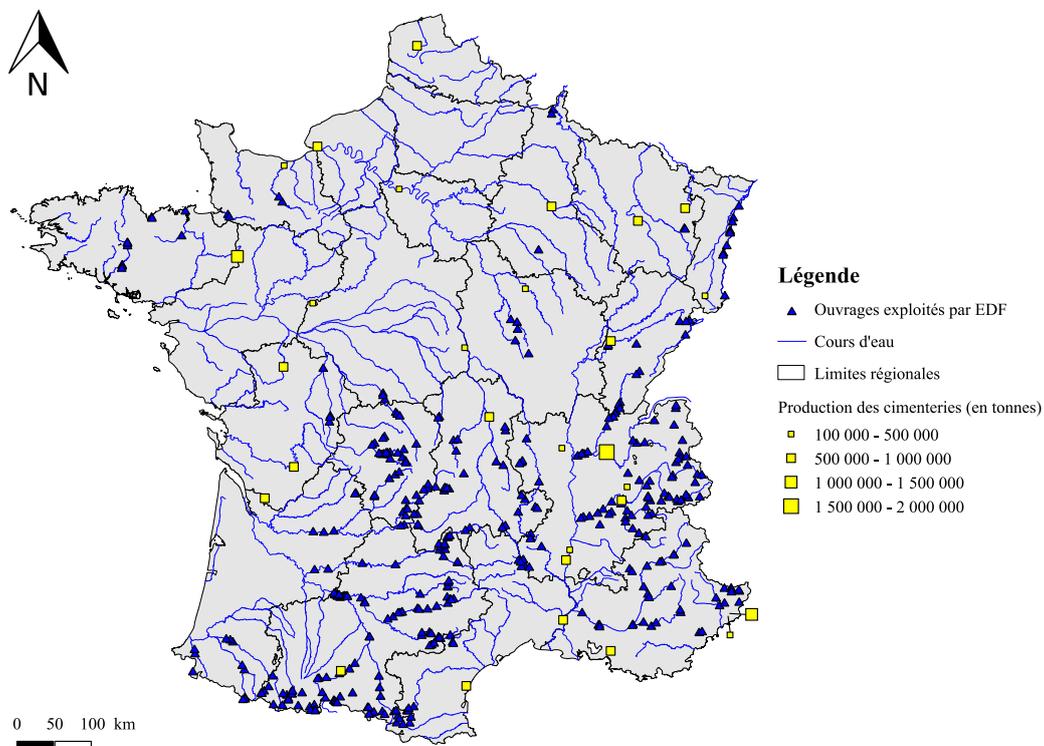


Figure 2-7. Localisation comparée des cimenteries et des ouvrages hydroélectriques exploités par EDF (données : BRGM [2009], Global Cement [2012])

► *Intérêt environnemental*

L'industrie cimentière a une empreinte environnementale importante venant de son important besoin d'énergie, de ses émissions fortement carbonées et des impacts liés à l'extraction de matériaux naturels. Utiliser des matières minérales telles que des sédiments à la place de matières premières traditionnellement utilisées diminue les impacts environnementaux locaux liés à l'exploitation des carrières et l'extraction de matériaux.

Du point de vue des impacts globaux, c'est le processus de fabrication du clinker qui est impactant. La substitution des matières premières traditionnelles, d'un point de vue global, n'est pas une réelle diminution de l'impact environnemental, car ces ressources, telles que l'argile et le calcaire, ne sont pas rares sur la planète.

Notons que l'ajout de matériaux pouzzolaniques naturels ou obtenus avec une cuisson à température nettement plus faible (~700 °C) que celle de clinkérisation (1 450 °C), dans la composition des ciments permet une économie d'énergie par rapport à un ciment ordinaire de type CEM I, composé à 95 % de clinker. Les intérêts d'une utilisation de matériaux pouzzolaniques seront développés dans le chapitre 4.

► *Contraintes liées au procédé et à la teneur en eau*

Le clinker peut être fabriqué en utilisant soit un procédé par voie humide ou sèche. Avec le procédé par voie humide, les matières premières entrent dans le four sous forme de boues humides. Ce processus requiert plus d'énergie et une grande quantité d'eau et, par conséquent, est actuellement moins utilisé que le procédé par voie sèche. En France, seulement l'usine Holcim de Lumbres (62) utilise un procédé par voie humide. Ce type d'usine de fabrication par voie humide semble mieux adapté que les usines en voie sèche pour accepter des sédiments dragués en raison de leur teneur en eau [Dalton *et al.*, 2004 ; Aouad *et al.*, 2012].

1.4. CONCLUSION

Un défi pour l'avenir de l'industrie du ciment est d'intégrer plus de matières premières alternatives en provenance d'autres industries ou directement à partir d'autres flux de déchets. L'industrie du ciment a une bonne tradition de mise en œuvre de nouveaux matériaux. Il est possible d'envisager les sédiments fins dans son portefeuille de matières premières.

Deux étapes de la fabrication du ciment permettraient la valorisation matière des sédiments fins, à savoir (i) dans le cru et (ii) comme constituant, favorisant ainsi l'économie de ressources naturelles.

Les spécifications sur les sédiments en vue d'une valorisation en cimenterie sont variables. Elles sont fonction du point d'entrée dans le procédé de fabrication. Dans les deux cas possibles d'utilisation, la présence de phyllosilicates dans les sédiments favorisera leur valorisation.

La valorisation dans le cru est la solution la plus facile à mettre en place. En effet, de nombreuses cimenteries ont la possibilité d'introduire directement des déchets minéraux qui viennent se substituer partiellement à l'argile ou au calcaire. Ce type de valorisation est d'ailleurs couramment utilisé pour valoriser des déchets tels que les boues rouges issues de la production d'aluminium ou des sables de fonderie. L'intégration et la proportion des sédiments fins dans le cru dépendent de leurs caractéristiques, notamment minéralogiques, des procédés utilisés dans la cimenterie mais aussi des caractéristiques des autres matières premières entrant dans la composition du cru. Un autre intérêt de la filière vient de la haute température requise dans le process à l'origine du phénomène de clinkérisation. Ce phénomène piège les métaux lourds au sein d'une matrice stable et permet la destruction de composés organiques. Cette filière a donc l'avantage de ne pas être sensible aux contaminants pouvant être présents dans les sédiments.

Pour une valorisation comme constituant, l'intégration de sédiments fins paraît plus délicate mais possède de véritables avantages. Au préalable, il faut que les caractéristiques du cortège argileux présent dans les sédiments dragués montrent une aptitude à développer des propriétés pouzzolaniques après une activation thermique. Ensuite, les sédiments ne rentrent actuellement pas dans le cadre de la norme NF EN 197-1 encadrant les composants du ciment. Des déchets tels que les cendres volantes ou

les laitiers de haut fourneau sont actuellement valorisés de cette manière. Or, ces sous-produits industriels sont affectés par les aléas technico-économiques de la fabrication de l'acier (laitier de la sidérurgie) ou de la production de l'électricité (cendres volantes). Il est alors possible d'envisager une évolution du cadre normatif et l'intégration des sédiments calcinés sous réserve qu'ils présentent les caractéristiques adéquates. Par ailleurs, l'obtention de sédiments calcinés à caractère pouzzolanique est effectuée avec une cuisson à température nettement plus faible (~700 °C) que celle de clinkérisation (1 450 °C). L'ajout de sédiments calcinés permettrait une économie d'énergie par rapport à l'élaboration d'un ciment ordinaire de type CEM I, composé presque uniquement de clinker.

Enfin, pour les différentes situations, il faudra prendre en compte le contexte local. La répartition géographique des cimenteries et le coût du transport conditionnent la faisabilité économique de la valorisation.

2. LA FILIERE « BETONS, MORTIERS, COULIS »

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde. Il est présent dans tous les secteurs de la construction, ses qualités et ses performances répondent aux différents besoins en matière de bâtiment et de génie civil en respectant les exigences de sécurité, d'esthétique et de durabilité.

Le béton est un matériau minéral confectionné depuis très longtemps à partir d'un mélange de ciment, d'eau et de granulats. La formulation s'est progressivement compliquée avec l'utilisation des additions minérales et des adjuvants si bien que les bétons actuels comportent de façon courante cinq constituants.

Le béton a un comportement évolutif : il est d'abord fluide ce qui lui permet de prendre toutes les formes possibles, puis progressivement il devient dur et très résistant. C'est un matériau qui paraît rustique et simple mais qui est en réalité très complexe et possède de multiples qualités. Il est associé à d'autres matériaux : de l'acier sous forme d'armatures passives ou précontraintes ou des fibres métalliques ou non.

La pratique courante distingue trois origines de production du béton [Charonnat, 1999] :

- la production de chantier, qui est réalisée sur le site de l'ouvrage à construire ;
- la production BPE (Béton Prêt à l'Emploi) qui est réalisée par une installation « indépendante » des chantiers ; elle met à disposition des chantiers du béton frais ;
- la production pour éléments manufacturés, qui est réalisée sur le lieu où sont fabriqués ces éléments manufacturés qui seront transportés, une fois durci, vers le lieu d'utilisation.

2.1. DESCRIPTION

2.1.1. Béton, mortier, coulis

Le béton hydraulique est composé de granulats, de ciment, d'eau, d'air et éventuellement d'adjuvants et d'additions minérales. Selon les éléments qui entrent dans la composition du mélange, nous parlons de coulis, mortier ou béton. En effet, si l'on emploie simplement de l'eau, du ciment et des adjuvants, nous avons un coulis. En ajoutant du sable à ces trois éléments, on obtient un mortier. Enfin l'ajout de graviers au mortier donne un béton.

Les coulis sont composés principalement de ciment (C) et d'eau (E). Dès que l'on mélange le ciment avec de l'eau, l'hydratation va commencer et les propriétés de la pâte sont évolutives dans le temps. Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée, la pâte reste plus ou moins malléable, ce qui permet de lui faire épouser par moulage la forme désirée. Mais après un certain temps, les cristaux d'hydrates prenant de plus en plus d'importance, le mélange se raidit, on dit qu'il fait prise, et le matériau commence alors à s'apparenter plus à un solide qu'à un fluide.

Le mortier est un matériau de construction, qui contient du ciment, de l'eau, du sable, des adjuvants et éventuellement des additions. Ils peuvent être très différents les uns des autres selon la nature et les pourcentages des constituants, le malaxage, la mise en œuvre et la cure. Dans toute construction, il est indispensable de réunir entre eux les différents éléments (blocs de béton, briques, éléments en béton préfabriqué, etc.) au moyen d'un mortier de ciment ou d'autre liant qui a pour but de :

- solidariser les éléments entre eux ;
- assurer la stabilité de l'ouvrage ;
- combler les interstices entre les blocs de construction.

2.1.2. Les composants

► *Le ciment*

La norme NF EN 197-1 définit 27 principaux types de ciments selon les constituants ajoutés au clinker et leur quantité. La fabrication du ciment ainsi que ses caractéristiques ont été développées dans la section précédente (Chap. 2-§1) relative à la valorisation des sédiments dans le ciment.

Les différents types de ciments ont une influence sur les propriétés des bétons. Selon l'application pour laquelle le béton va être utilisé, certains types de ciments vont être utilisés préférentiellement.

Pour certaines classes d'exposition ou certains ouvrages particuliers, des exigences relatives aux caractéristiques des ciments peuvent être requises. Les ciments possédant ces caractéristiques font l'objet de normes spécifiques : ciment pour travaux à la mer [NF P15-317], ciment à teneur en sulfure limitée pour béton précontraint [NF P15-318], ciment pour travaux en eaux à forte teneur en sulfates [NF P15-319], ciment prompt naturel [NF P15-314], ciment alumineux fondu [NF EN 14647], ciment de haut fourneau à faible résistance à court terme [NF EN 197-4].

► *Les granulats*

Elément constitutif du béton, les granulats ont pour objectif d'améliorer la résistance de la matrice. Leur taille variable déterminera l'utilisation du béton. La résistance du béton augmente avec la variété des calibres mélangés. Selon l'origine des granulats, leurs caractéristiques seront différentes et pourront avoir une influence sur le béton.

L'arrêté ministériel du 27 juin 2003¹ [JORF, 2003] rend obligatoire, en France, le respect des normes suivantes :

- NF EN 13139+A1 : Granulats pour mortiers ;
- NF EN 12620 : Granulats pour bétons hydrauliques ;
- NF EN 13055-1 : Granulats légers pour bétons, mortiers et coulis.

Ces normes spécifient les caractéristiques des granulats et des fillers élaborés à partir de matériaux naturels, artificiels ou recyclés.

► *L'eau*

Indispensable à l'hydratation du ciment, l'eau de gâchage contribue aussi à l'ouvrabilité du béton. Elle doit être exempte d'impuretés nuisibles telles que les matières organiques, les acides, les alcalins et les sels. L'eau utilisée pour la fabrication du béton doit répondre à la norme NF EN 1008. Le dosage en eau doit être précis. En effet, c'est l'eau qui permet de débiter la réaction de prise et qui confère au béton sa plasticité et donc son ouvrabilité. Elle ne doit pas être employée avec excès sous risque de diminuer les résistances mécaniques et la durabilité du béton. En effet, lorsque l'eau disparaît, elle laisse place à des vides qui ne seront plus comblés. Dans certains cas, cela peut altérer la qualité du béton et sa durée de vie.

► *Les adjuvants*

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés à faible dose, généralement moins de 5 % de la masse du ciment, avant ou pendant le malaxage. Ils ont pour but de modifier les propriétés du matériau frais ou durci.

Il est ainsi possible de jouer sur de nombreuses propriétés du béton. Il existe, à l'heure actuelle, une multitude d'adjuvants, répondant à la norme EN 934-2+A1, ayant des rôles bien précis :

- les plastifiants ou superplastifiants, permettent de réduire la teneur en eau, sans modifier la consistance et *vice-versa* ;
- les entraîneurs d'air permettent d'incorporer pendant le malaxage une certaine quantité de bulles d'air ;
- les accélérateurs de prise diminuent le temps de transition du mélange pour passer de l'état plastique à l'état solide ;
- les accélérateurs de durcissement augmentent uniquement la vitesse de développement des résistances initiales du béton ;
- les retardateurs de prise augmentent le temps de transition du mélange pour passer de l'état plastique à l'état solide.

¹portant application aux granulats et enrochements du décret n° 92-647 du 8 juillet 1992 concernant l'aptitude à l'usage des produits de construction, modifié par le décret n° 95-1051 du 20 septembre 1995.

Chaque adjuvant possède une propriété principale et souvent des effets secondaires qui peuvent être souhaités ou non. Le choix du type d'adjuvant s'effectue en fonction de l'effet principal recherché.

La tendance actuelle consiste à ajouter, quasi systématiquement, un ou plusieurs adjuvants à la formulation du béton. Toutefois, il est judicieux de s'assurer de leur compatibilité au sein du matériau et de vérifier que leurs effets ne se contrarient pas [Bernier, 2004].

► *Les additions*

La norme européenne NF EN 206-1 définit une addition comme un « matériau minéral finement divisé utilisé dans le béton afin d'améliorer certaines propriétés ou lui conférer des propriétés particulières ».

Par leur finesse et par leur réactivité plus ou moins importante en présence de ciment, les additions engendrent des modifications significatives des propriétés des matériaux cimentaires (bétons, mortiers, pâtes, coulis). En effet, l'ajout d'additions minérales permet :

- d'améliorer l'ouvrabilité et l'homogénéité du béton frais ;
- d'augmenter l'efficacité du liant, éventuellement diminuer son dosage ;
- de diminuer le retrait et les risques de fissuration ;
- d'améliorer la résistance du béton aux agressions extérieures (durabilité).

La norme distingue deux types d'additions minérales : les additions quasiment inertes (de type I) et les additions à caractère pouzzolanique ou hydraulique latent (de type II).

Les additions de type I sont :

- les additions calcaires [NF P 18-508] ;
- les additions siliceuses [NF P 18-509].

Les additions de type II regroupent :

- les cendres volantes [NF EN 450-1] ;
- les fumées de silice [NF EN 13263-1+A1] ;
- les laitiers vitrifiés [NF EN 15167-1] ;
- les métakaolins de type A [NF P18-513].

Ces additions de type II sont utilisées en substitution partielle au ciment pour constituer un liant équivalent.

2.1.3. Principe chimique

La réaction chimique qui permet au béton à base de ciment de faire prise est assez lente : au bout de sept jours, la résistance mécanique atteint à peine 75 % de la résistance finale.

La vitesse de durcissement du béton peut cependant être affectée par la nature du ciment utilisé, par la température du matériau lors de son durcissement, par la quantité d'eau utilisée, par la finesse de la mouture du ciment ou par la présence d'éléments organiques. La valeur prise comme référence dans les calculs de résistance est celle obtenue à 28 jours. On sait aussi qu'en présence d'eau, la résistance continuera d'augmenter très légèrement, même après 28 jours.

Il est possible de modifier la vitesse de prise en incorporant au béton frais des adjuvants ou des additifs, ou en utilisant un ciment prompt ou à prise rapide. D'autres types d'adjuvants permettent de modifier certaines propriétés physico-chimiques des bétons. On peut, par exemple, augmenter la fluidité du béton pour faciliter sa mise en œuvre en utilisant des « plastifiants », le rendre hydrofuge par l'adjonction d'un liquide hydrofuge ou d'une résine polymère, ou maîtriser la quantité d'air incluse avec un « entraîneur d'air ».

2.1.4. Propriétés du béton

Plinskin [1992] rappelle que le terme « béton » recèle une ambiguïté. Le matériau doit en effet être considéré sous deux formes :

- le béton frais, mélange homogène de matières premières solides en suspension dans l'eau : c'est l'état dans lequel il se trouve lors de sa fabrication. Il se trouve en état foisonné dans et à la sortie des appareils assurant l'obtention d'un mélange homogène, et en état compacté dans son coffrage, après mise en place et damage, serrage ou vibration ;
- le béton durci, solide dont les propriétés physiques et mécaniques s'acquièrent au cours des réactions physico-chimiques qui se déroulent entre ses composants à vitesse relativement rapide au début, puis à vitesse fortement décroissante avec le temps.

Le béton est un matériau composite. Ses propriétés dépendent de la nature et de la qualité de ses composants mais aussi de leurs proportions relatives. S'agissant des propriétés, il convient de distinguer celles qui concernent le béton frais et le béton durci.

► *La composition du béton*

En se limitant aux points de vue du maître d'ouvrage, du concepteur et de l'entreprise qui réalisent des travaux, un béton peut être caractérisé par trois critères : (i) la durabilité et (ii) la résistance à la compression du béton durci, qui garantissent la pérennité et la sécurité des ouvrages, d'une part, et, d'autre part, (iii) la consistance ou la maniabilité du béton frais, qui mesure sa facilité de mise en œuvre.

Ces propriétés dépendent de la qualité des constituants, mais aussi de la composition du béton, c'est-à-dire des quantités des divers constituants contenus dans 1 m³ de béton en place.

Plinskin [1992] rappelle que dès 1898, René Féret a établi les principes d'optimisation de la composition conduisant à l'obtention de bétons de résistance spécifiée. Il a énoncé la relation qui lie la résistance à la compression R_c d'un béton aux volumes de ciment c , d'eau e et de vides v contenus dans une unité de volume de béton durci :

$$R_c = k_{\text{granulats}} k_{\text{ciment}} \left(\frac{c}{1 + \frac{e+v}{c}} \right)^2 \quad \text{Eq. 10}$$

avec les notations suivantes :

R_c : résistance du béton, $k_{\text{granulats}}$: coefficient dépendant de la nature des granulats, k_{ciment} : coefficient dépendant de la nature du ciment, c : volume de ciment, e : volume d'eau, v : volume des vides.

Cette expression met en évidence le fait que la résistance R_c croît avec le dosage en ciment, c'est-à-dire avec la masse de ciment contenue dans 1 m³ de béton durci, les coefficients k_i dépendant de la nature des granulats et du ciment. Elle montre aussi que la résistance décroît lorsque croissent la quantité d'eau et le volume des vides contenu dans le béton. Si la quantité d'eau e est supérieure à celle qui est strictement nécessaire pour l'hydratation du ciment, il subsistera de l'eau excédentaire qui, après évaporation, laissera des vides s'ajoutant aux vides physiques de volume v . Le béton présentera une certaine porosité du fait de ces vides. La formule de Féret met donc en évidence le fait que, pour un dosage donné de ciment, la résistance est d'autant plus grande que la teneur en eau du béton frais est plus réduite, c'est-à-dire que la porosité du béton durci est plus faible. Depuis, de nombreuses méthodes ayant pour objectif la minimisation de la porosité et donc, en pratique, du volume $(e+v)$, ont été proposées. Il n'est cependant pas possible de diminuer fortement la teneur en eau, car on obtient des bétons frais très peu fluides, donc très difficiles à mettre en place.

C'est l'emploi d'adjuvants, tels que les superfluidifiants réducteurs d'eau, qui permet de réduire le dosage en eau tout en améliorant la maniabilité des bétons frais. Ces adjuvants sont à l'origine du développement des bétons à hautes performances.

Alors que les valeurs du rapport pondéral Eau/Ciment (E/C) des bétons courants sont comprises entre 0,50 et 0,60, celles des Bétons à Hautes Performances (BHP) s'étalent entre 0,15 et 0,40. Il en résulte que, si la porosité des bétons ordinaires est de l'ordre de 15 à 20 %, celle des BHP est inférieure à 7 % dès lors que le rapport E/C est inférieur à 0,40. Les très faibles porosités ne peuvent être obtenues que par l'addition d'ultrafines, telles que les fumées de silice, dont l'extrême finesse des grains permet un comblement des vides qui subsistent entre les grains de ciment. Les bétons à hautes et à très hautes performances offrant une maniabilité correcte sont donc confectionnés en ajoutant aux composants classiques du béton, de faibles quantités d'adjuvants réducteurs d'eau et d'ultrafines.

A titre d'exemple, les dosages courants en ciment varient de 150 à 300 kg/m³ pour le béton non armé et de 250 à 400 kg/m³ pour le béton armé. Ils sont compris entre 350 et 400 kg/m³ pour le béton précontraint.

► *L'ouvrabilité*

La rhéologie, qui décrit les propriétés d'écoulement des matériaux à l'état fluide, est mesurée en physique par des instruments de type rhéomètre ou viscosimètre. Il en existe très peu utilisable sur chantier. Plus couramment, on mesure l'aptitude au placement du béton par un essai simple et facile de réalisation : c'est l'essai d'affaissement au cône d'Abrams. On moule un cône de béton et on mesure son affaissement vertical après démoulage. Plus la consistance tend vers une consistance fluide, plus l'affaissement est important. La consistance varie alors de « ferme » (affaissement de 10 à 40 mm correspondant à la classe S1) à « fluide » (affaissement supérieur à 220 mm correspondant à la classe S5). La norme NF EN 206-1 définit l'ensemble des classes de consistance.

En plus de l'essai d'affaissement selon la norme EN 12350-2, d'autres essais permettent de mesurer la consistance, notamment :

- l'essai Vébé selon l'EN 12350-3 ;
- l'essai d'indice de serrage selon l'EN 12350-4 ;
- l'essai d'étalement sur table selon l'EN 12350-5.

Le béton auto-plaçant a la propriété de se mettre en place dans les coffrages sans vibration. On comprend alors que son affaissement au cône d'Abrams soit complet. Dans ce cas, la technique consiste plutôt à mesurer l'étalement du béton.

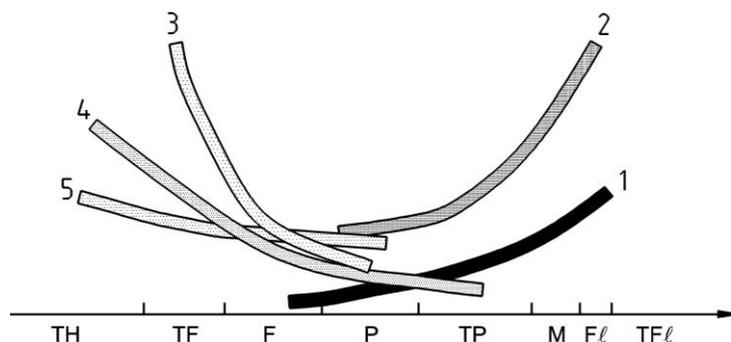


Figure 2-8. Plage d'utilisation des différents types d'essais pour la mesure de la consistance [FD P 18-457]
 1 - Affaissement ; 2 - Étalement (chocs) ; 3 - Maniabilité ; 4 - Temps Vébé ; 5 - Degré de compactage
 Terre humide (TH), très ferme (TF), ferme (F), plastique (P) très plastique (TP), mou (M), fluide (Fl), très fluide (TFℓ)

► *Résistance*

La principale qualité du béton est de posséder une forte résistance à la compression. Cependant, la résistance à la traction est nettement moins performante. La résistance mécanique du béton est évolutive, elle augmente beaucoup au cours du premier mois après coulage. On considère que cette valeur est stable et quasi-maximale à 28 jours.

La classe de résistance définit pour chaque béton la résistance à la compression à 28 jours demandée pour la réalisation de l'ouvrage. Elle s'exprime en méga pascal (MPa) référencée comme suit : C suivi de la valeur de la résistance sur cylindre / résistance sur cube. A titre d'exemple la référence C25/30 correspond à une résistance à la compression de 25 MPa avec une éprouvette cylindrique et 30 MPa pour une éprouvette cubique.

► *Durabilité*

La durabilité du béton est un fait reconnu et attesté par la pérennité des ouvrages exposés à des conditions climatiques ou d'environnement les plus variées. Les ouvrages usuels, réalisés en bétons

courants, aussi bien que les plates-formes offshore en milieu marin, les autoroutes sollicitées par un trafic intense, les viaducs soumis à l'action du gel et des sels de déverglaçage, résistent au fil des années aux multiples agressions physico-chimiques auxquelles ils sont soumis.

Néanmoins, il arrive que des défauts de conception ou de mise en œuvre et que des causes accidentelles soient à l'origine de désordres. La notion de durabilité est donc indissociable de celle de qualité à tous les niveaux et, en particulier, de celle du matériau béton. L'exigence de qualité est devenue aujourd'hui une nécessité, car elle est la garantie d'avantages techniques et, en particulier, de durabilité. Elle est aussi un facteur d'économie par sa contribution à la limitation des coûts de maintenance.

La formulation d'un béton doit intégrer avant tout les exigences de la norme NF EN 206-1, laquelle, en fonction de l'environnement dans lequel sera mis en place le béton, sera plus ou moins contraignante vis-à-vis de la quantité minimale de ciment – ou de liant équivalent – à insérer dans la formule ainsi que la quantité d'eau maximum tolérée dans la formule, tableau 2-21.

De même, à chaque environnement donné, une résistance garantie à 28 jours sur éprouvettes sera exigée aux producteurs. Ceci peut justifier des dosages de ciment plus ou moins supérieurs à la recommandation de la norme.

Tableau 2-21. Valeurs limites spécifiées applicables en France à la composition et aux propriétés des bétons [NF EN 206-1]

<i>Classes d'exposition</i>		<i>Rapport Eeff/Liant eq. maximal</i>	<i>Classe de résistance minimale</i>	<i>Teneur minimale en Liant eq. (kg/m³)</i>	<i>Teneur minimale en air (%)</i>
<i>Aucun risque de corrosion ou d'attaque</i>	<i>X0</i>	-	-	150	-
	<i>XC1</i>	0,65	<i>C20/25</i>	260	-
<i>Carbonatation</i>	<i>XC2</i>	0,65	<i>C20/25</i>	260	-
	<i>XC3</i>	0,60	<i>C25/30</i>	280	-
	<i>XC4</i>	0,60	<i>C25/30</i>	280	-
	<i>XS1</i>	0,55	<i>C30/37</i>	330	-
<i>Corrosion induite par les chlorures</i>	<i>Eau de mer XS2</i>	0,55	<i>C30/37</i>	330	-
	<i>XS3</i>	0,50	<i>C35/45</i>	350	-
	<i>Chlorures autres que l'eau de mer XD1</i>	0,60	<i>C25/30</i>	280	-
<i>Attaque gel/dégel</i>	<i>XD2</i>	0,55	<i>C30/37</i>	330	-
	<i>XD3</i>	0,50	<i>C35/45</i>	350	-
	<i>XF1</i>	0,60	<i>C25/30</i>	280	-
	<i>XF2</i>	0,55	<i>C25/30</i>	300	4,0
<i>Environnement contenant des substances chimiques agressives</i>	<i>XF3</i>	0,55	<i>C30/37</i>	315	4,0
	<i>XF4</i>	0,45	<i>C30/37</i>	340	4,0
<i>Environnement contenant des substances chimiques agressives</i>	<i>XA1</i>	0,55	<i>C30/37</i>	330	-
	<i>XA2</i>	0,50	<i>C35/45</i>	350	-
	<i>XA3</i>	0,45	<i>C40/50</i>	385	-

D'autres exigences de la norme NF EN 206-1 imposent l'emploi de ciments particuliers en raison de milieux plus ou moins agressifs ainsi que l'addition d'adjuvants conférant des propriétés différentes à la pâte de ciment que ce soit le délai de mise en œuvre, la plasticité, la quantité d'air occlus, ...

2.2. SPECIFICATIONS

Les spécifications pour le béton concernent principalement les caractéristiques finales que le matériau doit posséder à l'état frais ainsi qu'à l'état durci. Le béton étant un mélange, et la façon la plus simple de qualifier un mélange donné est donc de s'assurer en premier lieu de la qualité de ses constituants et de donner des limites sur leurs proportions. Des normes ont donc été conçues pour définir leurs propriétés, les mesurer et les contrôler, afin de s'assurer de leur aptitude à l'emploi dans un béton donné.

En ce qui concerne les proportions respectives des constituants, plusieurs critères interviennent. Le critère économique conduit à minimiser la quantité des constituants les plus onéreux, c'est-à-dire le ciment et les granulats. Les constituants sont encadrés d'un point de vue normatif et la liste des constituants est exhaustive. Selon la norme NF EN 206-1/CN, seules les additions suivantes peuvent être employées :

- les additions calcaires, conformes à la norme NF P 18-508 ;
- les additions siliceuses, conformes à la norme NF P 18-509 ;
- les cendres volantes, conformes à la norme NF EN 450-1 ;
- les fumées de silice, conformes à la norme NF EN 13263-1+A1 ;
- les laitiers vitrifiés moulus de haut-fourneau, conformes à la norme NF EN 15167-1 ;
- les métakaolins de type A (Indice d'activité à 28 jours supérieur ou égal à 100%), conformes à la norme NF P18-513.

L'aptitude générale à l'emploi de ces additions est normalisée pour les coproduits ou déchets industriels qui font l'objet d'une pratique relativement ancienne. En effet, les cendres volantes sont encadrées par la norme NF EN 450-1, les fumées de silice par la norme NF EN 13263-1+A1, le laitier de haut fourneau par la norme NF EN 15167-1.

Les métakaolins sont les dernières additions à être entrées dans le cadre de la norme avec la publication d'un complément national à la norme NF EN 206-1. Ce document intitulé NF EN 206-1/CN a pris effet en décembre 2012. Notons que la norme NF P18-513, qui encadre les métakaolins, précise que « les produits provenant de la calcination d'argiles autres que la kaolinite ou de l'incinération de boues de papeterie et d'autres déchets industriels n'entrent pas dans le domaine d'application de la norme ». Ainsi, les autres matériaux argileux, dépourvus de kaolinite, et ayant subi un traitement similaire – calcination à une température comprise entre 600° et 850° – ne rentrent pas dans le cadre de cette norme, même s'ils présentent des caractéristiques similaires.

Pour qu'un béton puisse être conforme à une norme, il faut, en principe, que tous ses constituants soient normalisés. Chacune des additions possède une norme qui lui est propre. En revanche, les fillers sont encadrés par la norme NF EN 12620+A1 « granulats pour béton ». Avant cette date de juillet 2012, les fillers trouvaient des spécifications dans la norme NF P 18-501 « Additions pour béton hydraulique – Fillers » qui est désormais caduque.

Le tableau 2-22 synthétise les spécifications normatives sur les additions minérales et les fillers.

Tableau 2-22. Synthèse des spécifications chimiques et physiques pour les additions et fillers

Spécifications chimiques		Additions de type II			Additions de type I		Granulat	
Paramètre	Norme d'essai	Fumée de silice [NF EN 13263-1+A1]	Laitier vitrifié [NF EN 15167-1]	Cendre volante [NF EN 450-1]	Métakaolin [NF P 18-513]	Addition siliceuse [NF P18-509]	Addition calcaire [NF P18-508]	Filler [NF EN 12620+A1]
Teneur en silice	NF EN 196-2	≥ 80 %*	-	-	-	> 96,0 %	-	-
Silicium élémentaire	ISO 9286	> 0,4 %	-	-	-	-	-	-
Silice réactive	NF EN 197-1	-	-	< 25 %	-	-	-	-
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	NF EN 196-2	-	-	> 70 %	-	-	-	-
SiO ₂ +Al ₂ O ₃	NF EN 196-2	-	-	-	> 90 %	-	-	-
(CaO+MgO)/(SiO ₂)	NF EN 196-2	-	< 1	-	-	-	-	-
Teneur en carbonate	NF EN 196-2	-	-	-	-	-	> 65 %*	-
CaCO ₃ +MgO	NF EN 196-2	-	-	-	-	-	> 90 %*	-
MgO	NF EN 196-2	-	≤ 18 %	< 4,0 %	≤ 4,0 %	-	-	-
Chaux libre	NF EN 451-1	≤ 1,0 %	-	< 1,5 %	≤ 1,0 %	-	-	-

<i>Spécifications chimiques (suite)</i>		<i>Additions de type II</i>			<i>Additions de type I</i>		<i>Granulat</i>	
<i>Paramètre</i>	<i>Norme d'essai</i>	<i>Fumée de silice [NF EN 13263-1+A1]</i>	<i>Laitier vitrifié [NF EN 15167-1]</i>	<i>Cendre volante [NF EN 450-1]</i>	<i>Métakaolin [NF P 18-513]</i>	<i>Addition siliceuse [NF P18-509]</i>	<i>Addition calcaire [NF P18-508]</i>	<i>Filler [NF EN 12620+A1]</i>
<i>Oxyde de calcium réactif</i>	<i>NF EN 197-1 (§3.1)</i>	-	-	< 10,0 %	-	-	-	-
<i>Sulfate (SO₃)</i>	<i>NF EN 196-2</i>	≤ 2 %	≤ 2,5 %	< 3,0 %	< 1,0 %	-	< 0,15 %	-
<i>Teneur totale en alcalin</i>	<i>NF EN 196-2</i>	à indiquer	à indiquer	< 5,0 %	à indiquer	à indiquer	à indiquer	à indiquer
<i>Chlorure</i>	<i>NF EN 196-2</i>	≤ 0,3 %	mention si > 0,10 %	< 0,10 %	< 0,10 %	< 0,10 %	< 0,10 %	indiquer si > 1 %
<i>Perte au feu</i>	<i>NF EN 196-2</i>	≤ 4,0 %	< 3 %	< 9 %*	≤ 4,0 %	< 0,15 %	-	-
<i>Teneur en eau</i>	<i>NF EN 1097-5</i>	-	< 1,0 %	-	-	< 1 %	-	-
<i>Teneur en soufre total</i>	<i>NF EN 1744-1</i>	-	< 2 %	-	-	< 0,15 %	< 0,4 %	< 1 %
<i>Matière organique</i>	<i>NF EN 13639</i>	-	-	-	-	< 0,2 %	< 0,2 %	**
<i>Phosphate</i>	<i>NF EN ISO 29581-2</i>	-	-	< 5,0 %	-	-	-	-
<i>Fixation du Ca(OH)₂</i>	<i>NF P 18-513 (annexe A)</i>	-	-	-	≥ 700 mg de Ca(OH) ₂ /g	-	-	-
						-	-	-

<i>Spécifications physiques</i>		<i>Additions de type II</i>			<i>Additions de type I</i>		<i>Granulat</i>	
<i>Paramètre</i>	<i>Norme d'essai</i>	<i>Fumée de silice</i> [NF EN 13263-1+A1]	<i>Laitier vitrifié</i> [NF EN 15167-1]	<i>Cendre volante</i> [NF EN 450-1]	<i>Métakaolin</i> [NF P 18-513]	<i>Addition siliceuse</i> [NF P18-509]	<i>Addition calcaire</i> [NF P18-508]	<i>Filler</i> [NF EN 12620+A1]
<i>Finesse/granularité</i>	NF EN 451-2/ NF EN 933-10/ NF EN 933-1	-	-	$D_{60} < 45 \mu\text{m}$	$D_{70} < 63 \mu\text{m}^*$	$D_{70} < 63 \mu\text{m}^*$	$D_{70} < 63 \mu\text{m}^*$ $D_{85} < 125 \mu\text{m}^*$	$D_{70} < 63 \mu\text{m}$
<i>Valeur au bleu</i>	NF EN 933-9	-	-	-	$< 10 \text{ g/kg}$	$< 3 \text{ g/kg}$	$< 10 \text{ g/kg}^*$	limite à spécifier
<i>Surface spécifique</i>	NF EN 196-6/ ISO 9277	15,0 à 35,0 m ² /g (BET)	$> 375 \text{ m}^2/\text{kg}$ (Blaine)	-	-	$> 150 \text{ m}^2/\text{kg}^*$ (Blaine)	$> 220 \text{ m}^2/\text{kg}^*$ (Blaine)	-
<i>Masse volumique absolue</i>	NF EN 1097-7	-	-	-	-	2250 à 2700 kg/m ³	à déclarer	à indiquer
<i>Indice activité</i>	Selon addition	$> 100 \% \text{ à } 28\text{j}$ (2)***	$> 70 \% \text{ à } 28\text{j}^{**}(1)$	$> 75 \% \text{ à } 28\text{j}$ $> 85 \% \text{ à } 90\text{j}$ (3)	$> 100 \% \text{ à } 28\text{j}$ (type A) (4)	$> 70 \text{ à } 28\text{j}^* (3)$	$> 71 \% \text{ à } 28\text{j} (3)$	-
<i>Stabilité</i>	NF EN 196-3	-	-	$< 10 \text{ mm}$	$< 10 \text{ mm}$	-	-	-
<i>Masse volumique</i>	NF EN 1097-1	-	-	à déclarer	-	-	-	-
<i>Temps de début de prise</i>	NF EN 196-3	-	$< 2 \text{ x temps ciment seul}$	$< 2 \text{ x temps ciment seul}$	Variation $< \text{à } 25 \% \text{ du temps du ciment seul}$	-	-	-

* selon catégorie ; (1) l'indice d'activité est calculé avec un taux de substitution de ciment de 50 % ; (2) l'indice d'activité est calculé avec un taux de substitution de ciment de 10 % ; (3) l'indice d'activité est calculé avec un taux de substitution de ciment de 25 % ; (4) l'indice d'activité est calculé avec un taux de substitution de ciment de 15 % ; ** pas de seuil sur les matières organiques pour les fillers, mais les matériaux doivent être utilisés en proportion pour qu'ils ne provoquent pas :a) une augmentation du temps de prise des témoins de mortier supérieure à 120 minutes et b) une réduction de la résistance à la compression des témoins de mortier supérieure à 20 % à 28 jours.

2.3. APPLICATION AUX SEDIMENTS

2.3.1. Essais de valorisation et réalisations

► *Le projet SEDIBET*

L'acronyme SEDIBET vient de « Utilisation de SEDIments inertes et de fines dans la conception de nouveaux BETons ». Ce projet ANR a été réalisé entre 2007 et 2010.

Dans le cadre du projet SEDIBET, tous les sédiments ont d'abord subi un traitement avec le procédé Novosol®. Ce traitement est un procédé en deux étapes dont la première est une phase de phosphatation et la seconde, une phase de calcination comprise entre 650 et 900°C.

Plusieurs travaux de thèse [Boucard, 2006 ; Agostini, 2006] ont porté sur l'utilisation de sédiments inertés avec le procédé Novosol®. Des essais ont été menés sur des mortiers incorporant des sédiments ainsi traités.

Toujours dans ce projet, l'incorporation de sédiments dans des matériaux cimentaires a notamment été réalisée sur deux types de matériaux : des pavés (production annuelle 4,8 Mm³) et des bétons autoplaçants. Ce sont des produits de construction élaborés.

De ce projet SEDIBET, Samara *et al.*, [2008] démontrent que la granulométrie étalée (0/2mm) des sédiments ayant subi le traitement permet d'envisager à la fois la substitution du ciment, des fines ou des granulats.

Quant aux produits de construction, les travaux mettent en évidence la faisabilité de la mise en œuvre de la filière « pavés » car la conformité par rapport à la norme NF EN 1338, jusqu'à 80kg/m³, est assurée.

Pour ce qui est de l'utilisation dans des bétons autoplaçants (BAP), les conclusions montrent qu'à long terme, le risque de fissuration est légèrement plus élevé pour le BAP avec sédiments en comparaison au BAP à base de fillers calcaires. Ce comportement est probablement dû au fait que son retrait se caractérise par une cinétique d'évolution plus rapide et que sa rigidité est plus élevée.

Afin d'estimer correctement cette plus grande sensibilité à la fissuration des bétons avec sédiments par rapport à un BAP avec fillers calcaires, les auteurs soulignent que l'âge de fissuration du BAP avec sédiments (24 jours) avoisine celui d'un béton avec une teneur en laitier de haut-fourneau supérieure ou égale à 50%. Au final, l'étude des déformations différées de ce matériau BAP avec sédiments montre que son utilisation au jeune âge nécessitera probablement l'utilisation de produits de cure afin d'éviter tout risque de fissuration.

► *Béton avec incorporation de sédiments sans traitement comme granulats*

Des sédiments marins dragués dans le port de Dunkerque ont été incorporés dans des bétons. Zri [2010] parvient à confectionner un béton de sable composé pour une part de sédiments limono-sableux.

Dans ces travaux, Limeira [2011], étudie les propriétés mécaniques ainsi que la durabilité de bétons intégrant des déblais de dragage. Les sédiments marins sableux (DMS) proviennent des ports de Sant Carles de la Ràpita et de Barcelone. Après un travail de formulation et de mise au point en laboratoire, l'étude va jusqu'à la construction d'une chaussée en béton.

L'analyse de l'influence de l'ajout des sédiments dans des pâtes, des mortiers et des bétons est complète et bien détaillée. Deux phases expérimentales ont été effectuées après avoir déterminé les caractéristiques chimiques et physiques de sédiments. Tout d'abord, des pâtes et des mortiers ont été préparés en utilisant un ciment CEM II / AM 42.5R, avec différents pourcentages de remplacement du sable naturel par les sédiments DMS. L'utilisation d'additifs plastifiants a été envisagée afin d'obtenir les propriétés requises aux états frais et durcis les mélanges étudiés. Ensuite, les sédiments DMS ont servi de granulats fins dans la fabrication de bétons.

Pour finaliser les travaux menés en laboratoire, une expérience pilote a été menée sur des chaussées portuaires en béton, construites à l'échelle industrielle. Le tableau 2-23 synthétise les différents essais qui ont concerné l'expérimentation pilote. Des carottages dans la chaussée en béton ont été réalisés pour suivre l'évolution du matériau à 150 jours et valider les formulations.

Tableau 2-23. Essais menés sur l'expérimentation pilote suite aux travaux de laboratoire

<i>Essais</i>	<i>à 28 jours</i>	<i>à 150 jours (carottage)</i>
<i>Affaissement au cône d'Abrams UNE EN 12350*</i>	X	-
<i>Résistance à la compression UNE EN 12390*</i>	X	X
<i>Module d'élasticité UNE EN 83316*</i>	X	X
<i>Résistance à la flexion EN 14651</i>	X	-
<i>Barcelona test PrUNE 83515*</i>	X	-
<i>Absorption ASTM C 642**</i>	X	X
<i>Succion capillaire UNE 83982*</i>	X	X
<i>Profondeur de pénétration d'eau sous pression EN 12390-8</i>	-	X

* Normes espagnoles, ** Normes américaines

Les résultats ont été comparés à des mélanges témoins sans incorporation de sédiments. Un comportement satisfaisant des bétons avec substitution de sédiments DMS comme correcteur granulaire a été observé.

► *Utilisation des sédiments fins comme filler*

Millrath [2003], utilise les sédiments du port de New York / New Jersey dans des mortiers. Les sédiments fins, argilo-limoneux, sont utilisés en substitution de sable ou comme filler. De nombreux essais sont réalisés avec des sédiments bruts (avec leur teneur en eau naturelle), secs, et après avoir subi un traitement chimique (tel que décrit dans le brevet de Kozlova *et al.* [2002]).

Les résultats mettent en avant qu'une utilisation des sédiments fins en substitution de granulats entraîne soit une baisse drastique de la résistance à la compression soit de la maniabilité. Même l'addition d'un superplastifiant ne permet pas un compromis raisonnable entre les caractéristiques à l'état frais et à l'état durci. Cependant, l'utilisation des sédiments comme filler est plus prometteuse. Des essais mécaniques ont suggéré que l'addition de 30 % de sédiments par rapport à la masse de ciment semble être la limite supérieure. Cela revient à une réduction de ciment de 7 % par unité de volume. Au-delà, la réduction de la résistance est jugée inacceptable selon l'auteur.

► *Sédiments calcinés dans un mortier et un béton*

Ces études sur les sédiments calcinés se basent sur les travaux de Semcha [2006], déjà décrits dans la partie « ciment », car la pouzzolane artificielle est également confectionnée à partir des sédiments calcinés du barrage de Fergoug (Ouest Algérien) avec le même protocole.

A propos de l'incorporation de cette pouzzolane artificielle dans des mortiers, Benkaddour *et al.* [2009] comparent le comportement d'un mortier élaboré à base de ciment seul (CEM I 42.5) et celui de mortiers contenant différents dosages de pouzzolane naturelle (Pouzzolane de Beni-Saf) et de pouzzolane artificielle à base de sédiments de barrage. L'étude porte sur les résistances mécaniques et les performances de durabilité vis-à-vis des milieux acides des mortiers confectionnés.

Dans une première série d'éprouvettes, de la pouzzolane naturelle a été incorporée à différents dosages (0, 10, 20 et 30 %). Dans la deuxième série d'éprouvettes, c'est de la pouzzolane artificielle qui a été incorporée avec les mêmes dosages. Le sable utilisé est de nature calcaire, de dimension 0/3mm.

Les résultats fournis par les différents essais donnent des valeurs semblables pour les mortiers intégrant des pouzzolanes naturelles et artificielles. Les performances mécaniques, déterminées à 2, 7 et 28 jours, sont plus faibles pour les éprouvettes comportant ces pouzzolanes que pour les éprouvettes témoins. Cependant, les résistances à la compression à 28 jours de mortiers avec 10 % de pouzzolanes naturelles et artificielles rejoignent celles obtenues sur des éprouvettes témoins sans pouzzolane. Les auteurs recommandent de mener des investigations à plus long terme. Quant à la durabilité vis-à-vis des milieux acides, l'addition de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle améliore le comportement des mortiers soumis aux attaques des acides HCl et H₂SO₄.

Pour l'étude de bétons avec incorporation de pouzzolane artificielle à base de sédiments calcinés, Belas *et al.* [2009] et Bouhamou *et al.* [2011] élaborent plusieurs formulations avec différents dosages en pouzzolane.

Les taux de substitution retenus en sédiments calcinés vis-à-vis du ciment sont de 10, 15 et 20 %, dosages exprimés par rapport à la masse de ciment. Les bétons ainsi confectionnés sont testés vis-à-vis du comportement mécanique (compression et traction) et du retrait.

Le ciment utilisé est un CEM I 42.5. Les granulats employés sont deux graviers (8/15mm et 3/8 mm) et un sable de dimension 0/3mm. Les résultats obtenus montrent, selon les auteurs, de belles perspectives pour les bétons à base de sédiments calcinés qui affichent des performances mécaniques et un comportement au retrait satisfaisants.

► *Liant sulfo-alumineux*

La division Recherche & Innovation du groupe cimentier ItalCimenti a mis au point un procédé breveté de traitement des sédiments marins ou fluviaux dans le but de les incorporer dans des formules de béton ou de mortier [Cassat *et al.*, 2011].

Ce procédé repose sur un liant à base d'un clinker sulfo-alumineux. L'intérêt de ce liant breveté est qu'il est conçu pour des sédiments avec une forte teneur en eau libre. Il n'est alors pas nécessaire de réaliser des opérations de déshydratation pour aboutir à une teneur en eau optimale pour l'application visée.

Pour une teneur en eau w des sédiments de 100 %, il faut approximativement 10 % de liant. Le taux de liant est réduit si la teneur en eau est moins importante. Un autre avantage porte sur le fait que les éléments traces métalliques peuvent se retrouver piégés.

Après un pré-traitement avec ce liant, le mélange eau-sédiment devient un matériau compact mais friable. Il faut alors concasser le produit obtenu avant de l'intégrer dans la centrale à béton. Selon les performances demandées au béton, la part à intégrer est variable.

Ainsi, dans le cadre d'un chantier expérimental dans le port de Dunkerque, le produit obtenu après un pré-traitement de sédiments marins a été intégré à hauteur d'environ 16 % de la masse totale du béton frais. Des enrochements artificiels de type Accropode ont été réalisés avec différentes formulations de béton incorporant des sédiments.

Cependant, le béton ne peut pas être normalisé selon la norme NF EN 206-1 car les sédiments traités ne font pas partie de la liste des constituants cités dans la norme. Le béton produit peut alors seulement être utilisé dans des ouvrages qui ne nécessitent pas un béton normalisé.

► *Coulis de comblement de réseau*

Dans la démarche PREDIS Nord-Pas-de-Calais, le guide technique relatif à la gestion des sédiments de dragage portuaire [Damidot *et al.*, 2006], une étude porte sur la réutilisation possible des sédiments de dragage en tant que matériau de construction pour le comblement d'anciennes galeries ou bien également pour le remblaiement de cavités et de tranchées. L'étude expérimentale a été réalisée sur des boues de dragage provenant du port de Gravelines et de Dunkerque. Le protocole d'essais utilisé à la suite du malaxage est le suivant : mesure de la fluidité au cône de Marsh, mesure de l'étalement au mini cône, mesure du ressuage statique, mesure des grandeurs rhéologiques au viscosimètre, mesure du temps de début de prise, confection d'éprouvettes pour essais mécaniques et essais de retrait.

L'étude conclut que des formulations optimales de coulis à base de sédiments de dragage de Dunkerque et de Gravelines ont été développées dans le cas de l'application du comblement de réseaux.

► *Sédiments, déchets et coproduits pour fabriquer un béton – C'Urban*

Le projet C'Urban porte sur l'élaboration d'un béton fabriqué à partir de sédiments fluviaux et de matériaux minéraux recyclés.

En effet, les composants traditionnellement utilisés dans un béton sont remplacés par des déchets de déconstruction, du sable de fonderie et des sédiments fluviaux. Ce nouveau béton aurait pour

vocation la réalisation d'éléments de mobilier urbain, type bordures de trottoirs, bancs, ... [Environnement Magazine, 2012 ; La Voix Du Nord, 2012a, 2012b]. Des exemples de prototypes sont visibles sur la Figure 2-9. Le nom commercial de ce béton constitué de matières recyclées est C'Urban pour « *Concrete Urban* ». Un développement industriel et commercial de C'Urban est en préparation [SITA, 2014].



Figure 2-9. Prototype de jardinière fabriquée à partir de sédiments fluviaux et de matériaux minéraux recyclés (à gauche) [VitaMines, 2012] et support de vélo modulable (à droite) [LeMoniteur.fr, 2014]

2.3.2. Intérêts de la filière et des sédiments

► Intérêts de la filière

La filière « béton » présente deux intérêts majeurs : (i) le béton est un matériau utilisé en très grande quantité et (ii) les centrales à béton où est confectionné le matériau sont mobiles.

En effet, en 2011, la production de béton prêt à l'emploi était de 41,6 Mm³ auquel il faut ajouter les 24,0 Mt de produits en béton fabriqué [UNICEM, 2012]. Ainsi, la filière pourrait absorber des volumes importants de sédiments.

Un autre avantage non négligeable de la filière est que celle-ci peut accepter des matériaux avec une teneur en eau relativement importante car la confection du béton nécessite un apport d'eau.

► Intérêts des sédiments pour la filière

Les sédiments peuvent être considérés comme un gisement alternatif de matériaux. Ainsi, leur utilisation permet une économie de ressources minérales en évitant l'extraction des matières premières. En préservant les ressources naturelles, le béton acquiert un caractère plus respectueux de l'environnement.

La finesse des sédiments peut également avoir un intérêt. Utilisés comme correcteur, ils vont étaler la courbe granulométrique des granulats dans la conception de bétons. Les sédiments fins vont avoir dans ce cas une action positive sur la compacité et par conséquent améliorer les performances du béton.

Mais les sédiments renferment des matières organiques et des argiles qui sont néfastes dans la confection d'un béton.

L'intérêt d'un traitement thermique apparaît. Celui-ci va détruire la matière organique, rendre les argiles plus inertes, limitant les effets de retrait et de gonflement, voire même leur donner un caractère pouzzolanique.

Dans tous les cas, l'utilisation des sédiments sera freinée par l'encadrement normatif du béton et de l'ensemble de tous les composants nécessaires pour le confectionner.

2.4. CONCLUSION

La filière béton présente des intérêts, mais celle-ci semble difficile à mettre en place de par les caractéristiques des sédiments fins non traités et le contexte normatif strict qui encadre la filière. Pour cette filière, il existe un grand nombre d'exigences sur le produit final mais pas seulement. En effet, les additions utilisables dans les bétons sont très encadrées et la liste est exhaustive.

Les sédiments peuvent entrer dans des formulations de béton avec ou sans traitement. Dans les deux cas, le produit final ne peut pas être normalisé. En effet, la confection d'un béton avec des constituants qui ne sont pas normalisés amènera à l'obtention d'un matériau final non agréé selon l'EN 206-1. L'utilisation de sédiments, ayant subi ou non un traitement, mène donc à ce constat.

Les sédiments fluviaux contiennent en quantité parfois importante des éléments qui sont néfastes aux performances des bétons et mortiers, à savoir les matières organiques et les argiles. Pour une utilisation de sédiments « bruts », sans traitement thermique, il est essentiel de caractériser ces paramètres. Si un traitement thermique est envisagé, comme pour la filière ciment, il faut déterminer l'aptitude des sédiments à acquérir un caractère de réactivité pouzzolanique. Dans ce cas, une attention particulière doit être portée à la minéralogie des espèces argileuses en présence et à la variation de leur comportement pendant la cuisson.

Notons qu'une utilisation des sédiments reste possible dans des produits n'ayant pas besoin d'un béton normalisé. Presque 1/5^{ème} du béton produit en France est utilisé pour des éléments non-structurants (caniveaux, par exemple) dans lesquels des sédiments pourraient être incorporés. Ainsi, on peut envisager de concevoir un béton intégrant des sédiments avec une formulation plus riche en ciment ou de faire subir un traitement aux sédiments. Il est alors possible d'atteindre des résistances similaires ou supérieures à un béton ordinaire mais le coût de ce matériau non normalisé sera plus important. En effet, dans le premier cas, un dosage plus important en ciment – constituant onéreux – va être à l'origine du surcoût, dans le second cas, c'est le procédé de traitement qui va induire un surcoût.

3. LA FILIERE « MATERIAU ROUTIER ET ASSIMILE »

Parmi les différents secteurs du génie civil, le domaine routier est un grand consommateur de matériaux. Les volumes nécessaires à la réalisation des infrastructures routières et assimilées (voies piétonnes, chemins...) sont importants.

L'évolution actuelle du contexte socio-économique dans le domaine des ouvrages en terre (terrassements) est marquée par la nécessité de réutiliser au maximum les matériaux, situés à proximité des projets, même ceux dont les caractéristiques de mise en œuvre, notamment mécaniques, sont très faibles. Il est cependant possible d'améliorer ces matériaux par un traitement à la chaux et/ou au liant hydraulique. Le réemploi des sols fins traités est alors devenu pratique assez courante. Ce domaine semble donc intéressant pour constituer et développer une voie de valorisation pour les sédiments.

Dans une structure routière, les différentes couches, selon leur rôle, n'ont pas les mêmes performances mécaniques à justifier. En couche de forme, les résistances mécaniques des matériaux peuvent rester relativement faibles.

C'est également une filière qui accueille déjà des déchets et coproduits industriels tels que les MIOM, cendres volantes, etc. De par leurs caractéristiques intrinsèques (finesse, matière organique), les sédiments sont à considérer comme un type de matériau à part.

3.1. DESCRIPTION

3.1.1. La structure routière type

D'un point de vue structurel, une route doit résister à diverses sollicitations, notamment celles dues au trafic et assurer la diffusion des efforts induits par ce même trafic dans le sol de fondation. Ses dimensions et son nombre de couches dépendent principalement de deux données fondamentales que sont le trafic et la capacité portante du sol. Ces paramètres de base utiles au dimensionnement interviennent au niveau des interfaces de la structure : au sommet pour le trafic et au-dessus du sol pour la portance. Ceci permet d'effectuer une séparation distincte quant au rôle que doivent jouer les différentes couches dans le fonctionnement d'une chaussée. De façon générale, on peut admettre que les couches supérieures, outre leur fonction de confort et de sécurité pour l'utilisateur, ont un rôle de diffusion des efforts de trafic alors que la partie inférieure doit assurer une certaine portance permettant la transmission de ces efforts dans le sol de fondation.

La coupe transversale d'une route fait apparaître en plus du terrassement, les 4 couches principales constituant la structure (Figure 2-10).

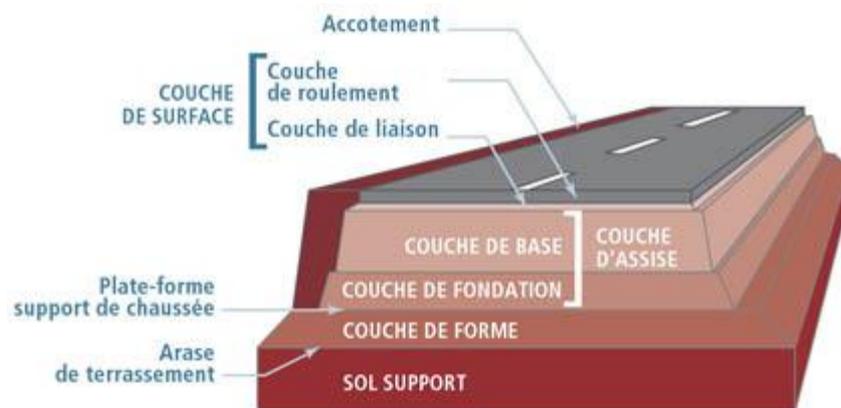


Figure 2-10. Coupe transversale d'une structure routière type

En remontant de la Partie Supérieure des Terrassements (PST), on distingue la couche de forme, les couches de fondation et de base qui forment l'assise de la chaussée et la couche de roulement. De façon générale, plus on s'éloigne de la PST, plus les performances mécaniques requises sont

importantes. Par conséquent, les matériaux, les liants utilisés, les techniques et les modalités du compactage sont propres à chaque couche.

La couche de forme est une structure qui sert à adapter les caractéristiques aléatoires et dispersées des matériaux de remblai aux caractéristiques mécaniques, géométriques et thermiques requises pour optimiser les couches de chaussée. Elle facilite la traficabilité du chantier, protège l'arase du terrassement en évitant qu'elle subisse des modifications physiques, qu'il s'agisse de sa géométrie ou de sa portance. Ses performances mécaniques facilitent la mise en œuvre des couches d'assise et leur compactage tout en permettant un dimensionnement plus précis. A long terme, la couche de forme permet d'élever et d'homogénéiser la portance de la PST. Lorsque c'est possible, elle est constituée des matériaux en place après un traitement à la chaux ou tout autre liant hydraulique. Cependant, il peut arriver que les propriétés du sol ne soient pas adaptées alors on a recours à des matériaux d'apport.

Les couches de l'assise (couches de fondation et de base) ont un rôle structural beaucoup plus important. Elles doivent reprendre les efforts verticaux statiques et dynamiques tout en permettant la distribution de ces charges sur le sol. Les performances mécaniques requises sont donc plus importantes que pour une couche de forme, ce qui se traduit notamment par une différence dans l'énergie de compactage nécessaire pour leur mise en œuvre. Elles sont généralement constituées par une grave traitée ou non.

Enfin, la couche de roulement a pour fonction principale de supporter les efforts superficiels dynamiques dus au trafic et surtout les efforts horizontaux. Les matériaux utilisés doivent présenter de bonnes performances mécaniques, notamment en ce qui concerne leur usure et leur fragmentabilité. Le liant utilisé peut être bitumineux ou non, en fonction du type de chaussée (souple ou rigide).

3.1.2. La classification selon le Guide Technique Routière (GTR)

Cette classification a été conçue pour les sols, mais il est également possible d'utiliser cette classification pour les sédiments. Ils sont classés d'après leur nature, leur état et leur comportement mécanique. La partie de la classification relative aux sols fins (classe A), dans laquelle on pourrait retrouver les sédiments fins de barrage, est donnée en annexe 2.

Rappelons que le terme « sol » a différentes significations selon le contexte et selon la profession qui l'utilise. Pour les ingénieurs routiers et les géotechniciens, les « sols » sont des matériaux naturels, constitués de grains faciles à séparer par simple trituration ou par l'action d'un courant d'eau. Ces grains, ou éléments, peuvent être de dimensions extrêmement variables, allant des particules d'argile aux blocs rocheux.

Pour se référer au GTR [SETRA-LCPC, 1992] et aboutir à une classification, il faut effectuer une phase de caractérisation géotechnique des matériaux que l'on souhaite utiliser dans la structure routière. La classification fait également l'objet d'une norme, il s'agit de la norme NF P 11-300 « Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières »

► Paramètres de nature

La granularité

Le tamisat à 80 µm est un paramètre qui permet de distinguer les sols riches en fines et, dans une large mesure, d'appréhender leur sensibilité à l'eau. Les seuils retenus pour le passant à 80 µm sont les suivants :

- 35 % : c'est le seuil au-delà duquel le comportement du sol peut être considéré comme régi par celui de la fraction fine (< 80 µm),
- 12 % : c'est un seuil conventionnel permettant d'établir une distinction entre les matériaux sableux et graveleux pauvres ou riches en fines.

L'argilosité

L'argilosité représente la sensibilité à l'eau des sols. Deux essais sont proposés : la valeur au bleu de méthylène (VBS) et l'indice de plasticité, obtenu avec les limites d'Atterberg.

La VBS s'exprime en grammes de bleu pour 100 g de sol [NF P94-068]. Les seuils retenus dans le GTR sont les suivants :

- 0,1 : seuil en dessous duquel on peut considérer que le sol est insensible à l'eau. Ce critère doit cependant être complété par la vérification du tamisat à 80 µm qui doit être $\leq 12\%$;
- 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.

Les limites d'Atterberg [NF P 94-051] renseignent la valeur de la limite de liquidité (w_l) et la valeur de la limite de plasticité (w_p). Ainsi, il est possible de déduire l'indice de plasticité I_p ($I_p = w_l - w_p$). Trois seuils d'indice de plasticité sont retenus pour la classification :

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

L'indice de plasticité (I_p) présente quelques avantages sur la valeur au bleu dans le cas des sols moyennement à très argileux. Il est plus sensible que la VBS dès que les sols deviennent vraiment argileux. Et surtout, il s'agit d'un paramètre qui est à la fois un paramètre d'identification, mais aussi de comportement. En effet, l' I_p définit en réalité l'intervalle de teneur en eau dans lequel le sol reste souple et déformable tout en conservant une certaine résistance au cisaillement. La connaissance de cet intervalle est d'une manière générale très utile dans la conception des ouvrages en terre (remblais, digues, talus, merlons,...).

La granularité et l'argilosité sont les deux paramètres d'entrée qui permettent de distinguer les 4 grandes classes de sols – A, B, C et D – définies par le GTR, figure 2-11.

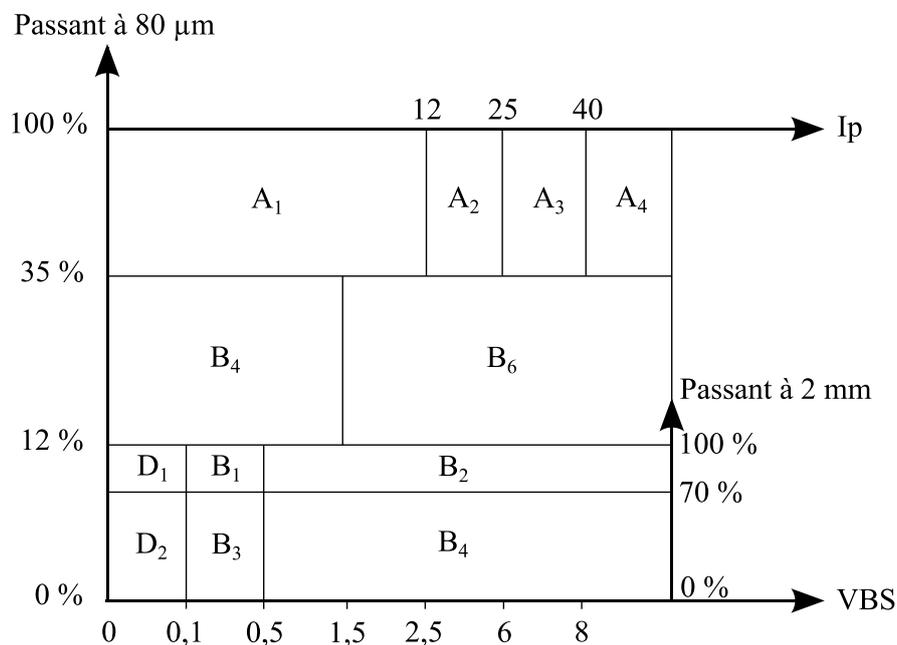


Figure 2-11. Classification du GTR des sols avec un D_{max} inférieure à 50 mm [SETRA-LCPC, 1992]

► **Les paramètres de comportement mécanique**

Certains sols nécessitent la connaissance de paramètres de comportement mécanique pour leur classification. Dans ce cas, les paramètres considérés sont la valeur Los Angeles (LA) [NF EN 1097-2] et la valeur micro-Deval en présence d'eau (MDE) [NF EN 1097-1], ou la valeur de friabilité des

sables (FS) pour les sols sableux [NF P 18-576]. Ils distinguent les matériaux dont la fraction granulaire est susceptible de résister au trafic et qui de ce fait peuvent être utilisés tels quels dans la structure, de ceux qui risquent de se fragmenter pour se transformer en un sol constitué en majorité d'éléments fins, inutilisable dans son état naturel sans dispositions particulières *i.e.* sans traitement. Les deux seuils retenus sont :

- 45 pour les valeurs LA et MDE ;
- 60 pour les valeurs FS.

Notons que ces paramètres de comportement mécanique ne rentrent pas en compte dans la classification des sols fins, voir annexe (classe A – passant à $80\mu\text{m} > 35\%$).

► Paramètres utilisés pour caractériser l'état hydrique

Il s'agit des paramètres qui ne sont pas propres au sol mais fonction de l'environnement dans lequel il se trouve. Le guide technique routière a retenu pour caractériser l'état hydrique d'un sol, l'un ou l'autre des trois paramètres suivants :

- la position de sa teneur en eau naturelle (w_n), (fraction 0/20 du matériau) par rapport à sa teneur en eau à l'Optimum Proctor Normal (w_{OPN}), (voir [NF P 94-050] et [NF P 94-093]) exprimée par le rapport : w_n/w_{OPN}
- la position de sa teneur en eau naturelle (w_n) par rapport à ses limites d'Atterberg (w_L et w_P) qui s'exprime par l'indice de consistance I_c [NF P 94-051] :

$$I_c = (w_L - w_n) / (w_L - w_P) \quad \text{Eq. 11}$$

- l'indice portant immédiat (IPI) qui exprime la valeur de l'Indice CBR immédiat mesuré sans surcharge, ni immersion sur une éprouvette de sol compacté à l'énergie Proctor normal¹ et à sa teneur en eau naturelle [norme P 94-078].

3.1.3. Techniques d'amélioration des sols

Afin de limiter les emprunts et les dépôts et de réduire les distances de transport, les ingénieurs routiers ont été conduits à faire appel à des techniques permettant d'améliorer les sols considérés comme impropres pour les utiliser. Pour une valorisation des sédiments traités en technique routière, la démarche adoptée sera analogue à celle appliquée à un sol usuel c'est-à-dire une opération consistant à mélanger au sol, une ou des substances actives dans le but d'améliorer ses propriétés.

Ces traitements (chaux et/ou liants hydrauliques) confèrent au matériau des performances mécaniques supérieures à celles qu'il possède à l'état naturel, et durables tout au long de la vie de l'ouvrage. Le choix de traitement se fait après essai, en fonction de la nature et de la granularité du matériau.

Généralement les traitements aux liants se font avec un pourcentage en ciment de 4 à 8 %, et un pourcentage en chaux maximal de 2 %. L'utilisation d'un liant hydraulique routier peut également être faite.

Utilisée en France depuis vingt-cinq ans, cette technique s'inscrit dans une démarche environnementale de développement durable. En effet, par le simple ajout de chaux et/ou de ciment, elle permet d'améliorer la traficabilité du terrain et de rendre les plates-formes de terrassement et de couche de forme, plus rigides et insensibles aux intempéries.

► Le traitement à la chaux

Les sédiments fins peuvent être apparentés à des sols limoneux et/ou argileux. En raison de leurs propriétés géotechniques et/ou de leur teneur en eau, ils sont considérés comme des matériaux médiocres, voire inaptes, dans le domaine routier. Un traitement à la chaux permet d'améliorer les sols de façon immédiate et à long terme grâce à la réaction de la chaux sur les particules argileuses. Les

¹ Energie Proctor normal correspond à un compactage à l'énergie fixée (dimensions et dame de poids définis selon la norme NF P 94-093).

modifications immédiates (abaissement de la teneur en eau et amélioration de la portance) sont provoquées par l'apport d'ions Ca^{2+} et OH^- . Ceux-ci entraînent un échange des cations Na^+ et K^+ par Ca^{2+} et une floculation des particules argileuses, provoquée par les forces électriques mises en jeu par cet échange [SETRA-LCPC, 1972]. Cette floculation se traduit par d'importantes améliorations géotechniques.

La limite de plasticité augmente fortement, alors que la limite de liquidité varie très peu. L'indice de plasticité est donc nettement diminué, ce qui peut faire passer d'un sol plastique, déformable, collant, à un mélange « solide », apte aux opérations de terrassements (figure 2-12).

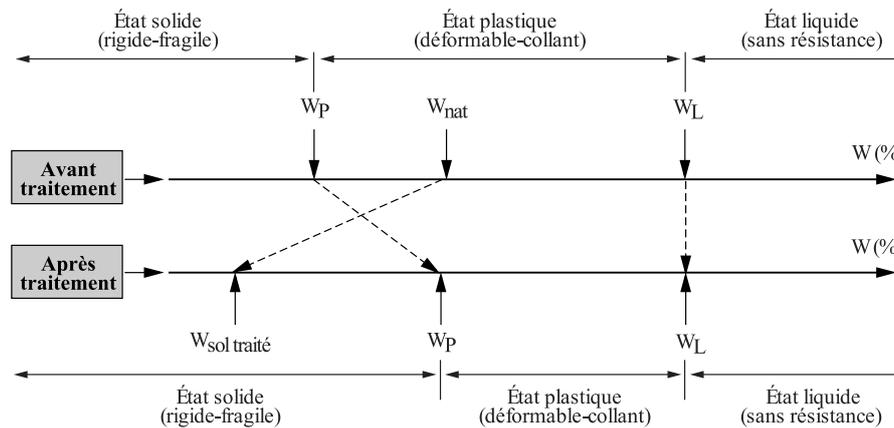


Figure 2-12. Modification immédiate du comportement d'un sol argileux humide relative à l'introduction de chaux vive [SETRA-LCPC, 2000]

Les caractéristiques de compactage sont modifiées, avec en particulier une augmentation de la teneur en eau optimale (et une diminution de la densité maximale Proctor). Le traitement à la chaux améliore également les niveaux de portance (IPI et CBR). L'augmentation de la teneur en eau optimale et l'aplatissement de la courbe Proctor indiquent que le matériau traité sera plus facile à compacter efficacement avec plus d'humidité et moins sensible aux variations de teneur en eau. La figure 2-13 illustre ces effets.

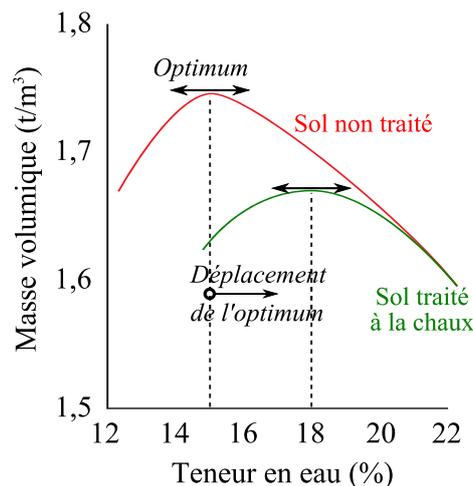


Figure 2-13. Influence du traitement à la chaux sur les caractéristiques de compactage d'un sol (courbe Proctor) [CIMBETON, 2009]

Les modifications à long terme comme l'amélioration des résistances, proviennent d'une réaction lente entre l'argile et la chaux qui créent de nouvelles espèces minérales. Celles-ci constituent des ciments qui vont lier les particules inertes du sol. En effet, la chaux, en tant que base forte élève le pH

du limon et favorise la mise en solution de l'alumine et de la silice. Ils se forment des aluminates et des silicates de calcium hydratés qui, en cristallisant, agissent comme un liant entre les grains.

A partir d'un essai développé dans les années soixante aux Etats-Unis [Eades et Grim, 1966], il a été établi que la mesure du pH d'une suspension de sol au contact de diverses teneurs en chaux permet de déterminer la quantité de chaux nécessaire et suffisante à apporter à un sol pour assurer à la fois une saturation des sites d'échanges des argiles et initier les réactions pouzzolaniques. Le Point de Fixation de la Chaux – PFC – a été défini. Il est évalué par la mesure du pH de la solution saturée en $\text{Ca}(\text{OH})_2$, soit 12,4 à 20°C favorisant ainsi les réactions pouzzolaniques.

En résumé, la chaux floccule les argiles, assèche les matériaux et le ciment apporte une rigidification rapide. En effet, les traitements à la chaux sont le plus souvent utilisés pour les sols fins à trop forte teneur en eau. L'objectif du traitement est d'améliorer l'ouvrabilité du matériau en abaissant sa teneur en eau. De plus, les réactions pouzzolaniques lentes avec la chaux contribuent en outre à développer les résistances mécaniques à moyen terme et à long terme. Enfin, la présence de chaux rend le sol moins sensible aux variations naturelles en eau.

Avec l'ajout de chaux, les performances mécaniques se trouvent améliorées, mais parfois, insuffisamment pour permettre d'utiliser le mélange limon-chaux en assise de chaussée seule. Il convient d'ajouter du ciment.

► *Traitement avec d'autres liants hydrauliques*

Des traitements utilisent du ciment. Ce dernier va permettre la cristallisation des produits par la prise hydraulique. C'est la croissance des microcristaux formés, leur enchevêtrement et leur feutrage progressif qui enrobe et relie les grains des matériaux entre eux, formant des ponts de plus en plus solides. Ce phénomène conduit rapidement au durcissement du mélange, et à l'obtention de caractéristiques mécaniques élevées et à sa stabilité à l'eau et au gel.

Les traitements au ciment visent surtout à obtenir de bonnes résistances mécaniques dans un bref délai. Les traitements mixtes chaux-ciment peuvent s'appliquer aux sols fins à forte teneur en eau et aussi aux sédiments. Leur maniabilité est améliorée par la chaux tandis que le ciment permet d'accroître rapidement les résistances mécaniques.

En alternative à l'utilisation des ciments classiques normalisés, les cimentiers français ont commencé à concevoir et à mettre au point des liants hydrauliques dédiés à la construction routière. Ces produits appelés Liants Hydrauliques Routiers (LHR) se sont beaucoup développés.

Du point de vue technique, le but est de mettre à la disposition des acteurs de la construction routière, des liants spécialement formulés pour donner de meilleurs résultats pour certaines opérations de terrassements ou de construction d'assises, tant en termes de facilité d'usage (délai de maniabilité, en particulier) que du niveau des performances du mélange final. En outre, certains LHR ont été spécifiquement conçus pour le traitement de matériaux particuliers (sols régionaux) ou pour atteindre des objectifs de performance à court terme (liant pour une portance rapide).

Du point de vue économique, les formulations de certains LHR font largement appel à des coproduits d'industries. Dans certains cas, le producteur de ces co-produits joue également sur la finesse de mouture. Par conséquent, les prix des LHR sont en général moins élevés que ceux des ciments.

3.2. SPECIFICATIONS

Toute valorisation des sols fins ou équivalents en tant que matériau routier ou assimilé doit satisfaire les recommandations du GTR [SETRA-LCPC, 1992], du GTS [SETRA-LCPC, 2000] mais aussi tenir compte de critères économiques [LEVACHER *et al.*, 2006] et de critères environnementaux précis depuis la parution en mars 2011 du guide SETRA [SETRA, 2011] portant sur l'acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière. Ce dernier donne des valeurs seuils et les étapes de caractérisation afin d'avoir une évaluation environnementale.

Par « matériau routier et assimilé », il est entendu un usage potentiel comme couche de forme ou remblai routier dans une structure routière et dans des applications telles que des chemins piétonniers,

des pistes cyclables, des aires de stationnement, etc. Notons que dans le cas de voies piétonnes ou des pistes cyclables, il n'existe pas de guide technique officiel mais les sollicitations sur la structure sont moindres. Les exigences mécaniques seraient donc plus faibles.

3.2.1. Performances à obtenir après traitement

Généralement, les sols fins et les sédiments (à cause de leur finesse), présentent une sensibilité à l'eau et une plasticité élevée. Ils sont normalement inutilisables en technique routière sans traitement. Pour améliorer leurs propriétés mécaniques, un traitement au ciment et/ou à la chaux est préconisé.

Il convient alors de se référer au guide du SETRA portant sur le traitement des sols en technique routière. L'édition de 2000 est consacrée à l'utilisation des sols fins en couche de forme et une édition de 2007 pour les couches d'assise [SETRA, 2007]. La partie ci-après synthétise les propriétés principales à atteindre, après un traitement, en vue d'une utilisation en technique routière et plus particulièrement en couche de forme.

► *Aptitude du sol au traitement*

Le mélange sol + liant(s) sélectionné(s) doit satisfaire les critères du tableau 2-24 lorsqu'il est soumis à l'essai d'aptitude selon la norme NF P 94-100.

Tableau 2-24. Critères pour décider de l'aptitude d'un sol au traitement au ciment ou à la chaux

Type de traitement	Aptitude du sol	Gonflement volumique Gv (%)	Résistance à la compression diamétrale Rit (MPa) après 7 jours d'immersion à 40°C [NF EN 13286-42]
Liant hydraulique éventuellement associé à la chaux	Apte	≤ 5	≥ 0,2
	Douteux	5 à 10	0,1 à 0,2
	Inapte	≥ 10	≤ 0,1
Chaux seule	Apte	≤ 5	Paramètre non pertinent
	Douteux	5 à 10	(lenteur de la prise pouzzolanique)
	Inapte	≥ 10	

Les critères de résistance ci-dessus sont valables pour les ciments. Avec certains liants LHR, le seuil de 0,2 MPa peut ne pas être atteint à 7 jours, alors que le sol traité est satisfaisant. Une étude spécifique est alors nécessaire.

► *Âge autorisant la circulation sur la couche traitée*

On admet généralement qu'une couche de forme stabilisée peut être circulée sans dommage dès que sa résistance en compression simple Rc atteint 1 MPa. En laboratoire, on mesure Rc à différents âges et on interpole pour déterminer le délai de mise en circulation, ce dernier pouvant être modulé en fonction de la température.

► *Tenue à l'immersion*

L'indicateur est la résistance en compression simple Rc. Ainsi, on mesure Rc₆₀ après 60 jours de cure normale à 20°C et Rci après 28 jours de cure normale, puis 32 jours d'immersion totale dans de l'eau à 20 °C. La tenue à l'immersion est jugée satisfaisante si :

- Rci/Rc₆₀ ≥ 0,80 avec un sol de VBs ≤ 0,5
- Rci/Rc₆₀ ≥ 0,60 avec un sol de VBs ≥ 0,5

Ces exigences peuvent être renforcées si l'ouvrage est particulièrement exposé à des arrivées d'eau (zone inondable, nappe phréatique très proche, etc.).

► *Tenue au gel*

Là encore, il s'agit de garantir que le matériau aura développé une résistance suffisante au moment où le premier gel risque de se produire. L'indicateur est la résistance en traction directe Rt ou

la résistance par fendage en compression diamétrale R_{it} . En règle générale, la condition à satisfaire est :

$$R_t \geq 0,20 \text{ MPa ou } R_{it} \geq 0,25 \text{ MPa}$$

Des cas particuliers (climats très rudes, certains matériaux sensibles comme la craie) sont passibles de spécifications plus sévères.

► Performances mécaniques à long terme

Les caractéristiques mécaniques à utiliser pour le dimensionnement sont le module de rigidité (ou module d'Young) E et la résistance en traction directe R_t . Celle-ci est, soit mesurée directement, soit déduite à partir de l'essai de fendage par la relation : $R_t \sim 0,8 R_{it}$

Ces caractéristiques sont mesurées à 28 et 90 jours avec les ciments et liants LHR « à durcissement rapide », à 180 jours avec les liants LHR « à durcissement normal ». Le couple R_t - E , mesuré à 90 ou 180 jours, est la base de la définition de la classe mécanique du matériau traité. Il permet de le situer dans l'abaque de la figure 2-14. Pour une couche de forme, il faut parvenir au moins à la zone 5.

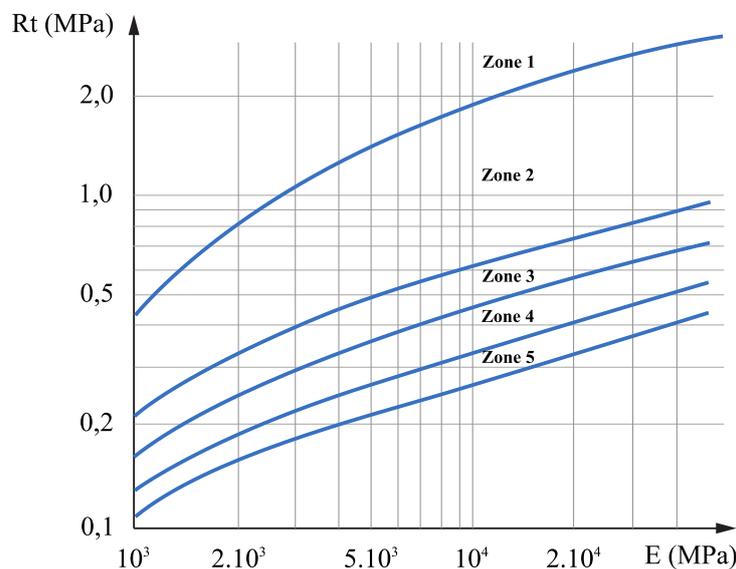


Figure 2-14. Abaque de situation des matériaux de couche de forme traités [SETRA/LCPC, 2000]

Les principales spécifications techniques, issues des guides techniques « Traitement des sols à la chaux et /ou aux liants hydrauliques » sont synthétisées dans le tableau 2-25.

Tableau 2-25. Performances à atteindre après traitement [SETRA/LCPC, 2000 ; SETRA, 2007]

Critères à satisfaire		Exigences mécaniques requises	
		Couche de forme	Couche d'assise
A court terme	Critère de traficabilité	R_c (en MPa) $\geq 1,0$	1 1,2 1,5
	Critère d'insensibilité à l'eau	R_{ci}/R_{c60} $\geq 0,8$ si $VBS \leq 0,5$ $\geq 0,6$ si $VBS > 0,5$	0,8 si $VBS \leq 0,5$ $\geq 0,7$ si $VBS > 0,5$
A long terme	Résistance au gel	R_t ou R_{it} (en MPa) $R_t \geq 0,20$ ou $R_{it} \geq 0,25$	$R_t \geq 0,20$ ou $R_{it} \geq 0,25$
	Performances escomptables à long terme	R_{it} ; E	Classification selon NF EN 14227-10 ou -13

Une fois que ces paramètres techniques sont vérifiés, deux critères sont ensuite importants pour les opérations de mise en œuvre et pour l'intégrité de l'ouvrage. Il s'agit du délai de maniabilité et de la portance immédiate.

► *Délai de maniabilité*

Le délai, pour lequel l'ensemble des opérations de mise en œuvre (compactage compris) doit être terminé, est couramment de 4 à 6 heures. Un délai de maniabilité nettement plus long est obtenu avec certains liants LHR, le maximum annoncé étant de 16 heures à 20°C, ce qui procure de la souplesse au chantier.

En laboratoire, deux méthodes de mesure du temps de maniabilité sont possibles, l'une par suivi de l'évaluation de la densité maximale Proctor Normal, l'autre par l'analyse de la propagation d'ondes soniques. Quelle que soit la méthode, il est nécessaire d'évaluer le délai à la température maximale prévisible du sol au cours des travaux. Il est aussi intéressant de le connaître à la température minimale probable.

► *Portance immédiate*

La portance à obtenir à la mise en œuvre est donnée par la valeur des indices portants immédiats IPI, voir le tableau 2-26. Elle varie selon les cas des sols étudiés.

Tableau 2-26. Indice portant immédiat (IPI) minimum à obtenir à la mise en œuvre d'une couche de forme traitée selon le GTS [SETRA-LCPC, 2000]

<i>Classes de sols</i>	<i>A₁ ; C₁A₁ ; B₅ ; C₁B₅</i>	<i>A₂ ; C₁A₂ ; B₆ ; C₁B₆</i>	<i>A₃ ; C₁A₃</i>	<i>Autres classes</i>
<i>IPI minimum</i>	20	15	10	<i>Selon expérience ou étude spécifique</i>

Les essais de poinçonnement sont conduits sur des éprouvettes compactées avec l'énergie Proctor Normal et à la teneur en eau maximale prévisible.

Les guides techniques pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (assises de chaussées [SETRA, 2007] et remblais et des couches de forme [SETRA/LCPC, 2000]) contiennent des recommandations sur l'utilisation de la chaux et du ciment dans les ouvrages routiers, mais ils font aussi référence à d'autres types d'ouvrages (ferroviaires, aéroportuaires, etc.), [Lesueur *et al.*, 2011].

3.2.2. L'évaluation environnementale

Les sédiments peuvent être utilisés en technique routière en tant que «granulats» selon l'arrêté du 30 mai 2008. Pour ce faire, le SETRA a publié en mars 2011 un guide méthodologique intitulé «Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière – Évaluation environnementale» dont l'objet est de présenter une méthodologie de caractérisation environnementale des matériaux selon trois niveaux d'investigation. Ce guide ne s'intéresse pas exclusivement aux sédiments, mais « à toute typologie de matériaux alternatifs élaborés à partir de déchets et utilisés sous forme de granulats, de graves, de sols, de fillers ou de liants, à l'exception de ceux élaborés à partir de déchets dangereux ou contenant une substance radioactive » [SETRA, 2011].

Les matériaux alternatifs susceptibles d'être utilisés en technique routière ne doivent donc pas avoir été élaborés à partir de déchets dangereux. Rappelons qu'il est considéré comme dangereux, tout déchet présentant au moins une des propriétés de danger définies à l'annexe I de l'article R.541-8 du code de l'environnement. Dans le cadre des sédiments, c'est le critère H14, dont le protocole d'évaluation sera prochainement mis en place, qui dira si oui ou non le sédiment est dangereux. Un sédiment dangereux, même ayant subi un traitement est donc inutilisable en technique routière au regard des informations qui sont données dans ce guide.

La démarche d'évaluation environnementale s'appuie sur la norme NF EN 12920+A1 [AFNOR, 2008] sur la caractérisation des déchets, qui donne une méthodologie pour la détermination du comportement à la lixiviation d'un déchet dans des conditions spécifiées.

Cette démarche d'évaluation environnementale envisage trois niveaux d'investigation permettant, au final, de graduer l'effort de démonstration en fonction du risque que présentent les matériaux concernés, vis-à-vis de l'environnement :

- un niveau 1 qui repose sur la réalisation d'essais de lixiviation et d'analyses en contenu total ;
- un niveau 2 qui repose sur la réalisation d'essais de percolation ;
- un niveau 3 qui repose sur la production d'une étude spécifique.

La réalisation de la caractérisation environnementale de niveau 1 est obligatoire.

Le guide précise qu'il est important de s'assurer que tout « matériau alternatif, dont l'utilisation est proposée en technique routière, remplit une fonction utile. C'est-à-dire qu'il présente des caractéristiques mécaniques, géotechniques et/ou hydrauliques correspondant à l'usage visé et conformément aux normes de spécifications d'usage en vigueur ». Il est donc nécessaire de cibler, pour la valorisation des sédiments, les critères techniques au même titre que les critères environnementaux.

3.2.3. Synthèse des essais et spécifications

Le tableau 2-27 synthétise (*i*) les paramètres à déterminer pour caractériser des sols en vue d'une utilisation en technique routière, (*ii*) les essais à réaliser pour vérifier les performances atteintes par un sol ayant subi un traitement et (*iii*) les spécifications techniques venant des guides ainsi que des normes.

Tableau 2-27. Synthèse des essais et des spécifications applicables pour un matériau routier

Caractéristiques	Méthodes et essais	Normes d'essai	Paramètres	Références	Seuils notables	
Granularité	Méthode par tamisage à sec après lavage	NF P 94-056	Granulométrie des matériaux	NF P 11-300	Classification GTR / NF P 11-300	
	Méthode par diffraction laser	NF ISO 13320-1		GTR	Classification GTR / NF P 11-300	
Argilosité	VBS - Capacité d'adsorption de bleu de méthylène	NF P 94-068	VBS (g/100g)	NF P 11-300 GTR	Classification GTR / NF P 11-300	
	Limites d'Atterberg	Liquidité à la coupelle/plasticité au rouleau	NF P 94-051		$w_L ; w_P ; I_P ; I_C$ (%)	Classification GTR / NF P 11-300
		Cône de pénétration (Fall cone)	NF P 94-052-1			Classification GTR / NF P 11-300
Teneur en eau	Méthode par étuvage	NF P 94-050	w (%)	NF P 11-300	Classification GTR / NF P 11-300	
	Méthode par micro-ondes	NFP94-049-1		GTR	Classification GTR / NF P 11-300	
Teneur en MO	Méthode chimique	NF P 94-055	MO (%)	NF P 11-300	GTR : Non organique < 3 < faiblement organique < 10 < fortement organique	
	Méthode par calcination	XP P 94-047		GTR		
Caractéristiques mécaniques	Résistance à la compression simple	NF EN 13286-41	R _c (MPa)	NF EN 14227-10 GTS	R _c > 1 MPa (circulation possible des engins)	
	Résistance à la traction	Essai de compression diamétrale (essai de résistance à la traction indirecte)	NF EN 13286-42	R _{it} / E (MPa)	GTS	R _{it} (cas chaux + liant hydraulique) : Adapté > 0,2 MPa > Douteux > 0,1 MPa > Inadapté
		Résistance à la traction directe	NF EN 13286-40	R _t / E		R _t = ~ 0,8 R _{it}
	Gonflement	NF EN 13286-49	G _v (%)	NF P 94-100 GTS	GTS : G _v 7j% : adapté < 5% < Douteux < 10% < Inadapté	

Tableau 2-27. Synthèse des essais et des spécifications applicables pour un matériau routier (suite)

<i>Caractéristiques</i>	<i>Méthodes et essais</i>	<i>Normes d'essai</i>	<i>Paramètres</i>	<i>Références</i>	<i>Seuils</i>
<i>Résistance au poinçonnement</i>	<i>IPI et indice CBR</i>	<i>NF P 94-078</i>	<i>IPI ; I.CBR</i>	<i>NF P 11-300 - GTS</i>	<i>CBR > IPI</i> <i>Avec IPI au minimum égal à 15 (en fonction du niveau d'arase recherché)</i>
<i>Compactage</i>	<i>Références de compactage d'un matériau (Essai Proctor)</i>	<i>NF P 94-093</i>	$\rho_{OPN/OPM}$; $W_{OPN/OPM}$	<i>NF P 11-300 - GTR</i>	<i>Classification NF P 11-300</i>
<i>Teneur en carbonate</i>	<i>Méthode du calcimètre</i>	<i>NF P 94-048</i>	$CaCO_3(\%)$		<i>Non calcaire < 10 < peu calcaire < 30 < moyennement calcaire < 70 < fortement calcaire < 90 < calcaire</i>
<i>Essai de durabilité</i>	<i>Gel/dégel</i>	<i>NF P 98-234-1</i>	$R_{CG/Dj}$		<i>Utilisation du ratio $R_{CG/Dj} / R_{Cj}$</i>
	<i>Mouillage/séchage</i>	<i>D'après Stegemann et Cote (1992)</i>	$R_{CM/Sj}$		<i>Utilisation $R_{CG/Dj} / R_{Cj}$</i>
	<i>Sensibilité à l'eau</i>	<i>NF P 94-102-1</i>	R_{CI}/R_{C60}	<i>GTS</i>	<i>$R_{CI}/R_{C60} > 0,6$ si $VBS > 0,5$</i>
<i>Essais environnementaux</i>	<i>Lixiviation</i>	<i>Lixiviation des déchets fragmentés et des boues</i>	<i>NF EN 12457-2</i>	<i>Guide SETRA 2011</i>	<i>Sur lixiviats : As, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn, Chlorure, fluorure, sulfate, FS</i> <i>Sur brut : BTEX, Hydrocarbures totaux, COT, HAP (16) et PCB (7)</i>

3.3. APPLICATION AUX SEDIMENTS

De très nombreux travaux, parfois en association avec des professionnels du secteur routier, ont porté sur cette problématique. Dans certains cas, les travaux ont mené à la réalisation de tronçons routiers. Les techniques d'amélioration des sols fins (liants, correction granulométrique) ont fortement contribué au développement de la stabilisation/solidification des sédiments. Cette section présente quelques travaux notables.

3.3.1. Travaux de recherche

De par les volumes qui peuvent être absorbés, beaucoup de travaux de recherche ont été orientés en vue d'une utilisation des sédiments dans le domaine routier. Le premier verrou, commun à toutes les filières de valorisation ou presque, est la teneur en eau. Le second verrou vient des faibles performances mécaniques relatives aux sédiments traités.

Il est essentiel d'améliorer les résistances mécaniques jusqu'à un niveau acceptable qui est variable selon l'utilisation envisagée dans la structure d'une chaussée. Ainsi, beaucoup de travaux ont été menés dans ce sens.

► *Traitement d'un sédiment avec apport de liants*

Les premiers travaux français sur la solidification/stabilisation des sédiments ont été menés par Boutouil [1998]. L'étude portait sur des sédiments marins du port du Havre. De multiples ajouts ont été testés en vue de quantifier leurs effets, notamment sur les propriétés mécaniques : chaux, ciment, liant routier, cendres volantes et fumée de silice. Rey [1999] se focalise sur l'utilisation de la chaux éventuellement accompagnée de ciment ou de cendres volantes.

Les travaux de Colin [2003] portent sur les sédiments du Port Autonome de Rouen en vue d'une utilisation en couche de forme. Un pré-traitement est d'abord réalisé en vue de réduire la teneur en eau. Un traitement à base de chaux et de ciment est étudié selon la méthodologie décrite par le GTS. Les résultats ont révélé que les dosages employés ne permettaient pas aux sédiments étudiés d'atteindre des performances mécaniques suffisantes. Pour que le traitement se révèle efficace, il faudrait des dosages en ciment CEM I de l'ordre de 12 à 18 %, ce qui n'est économiquement pas acceptable. Pour parvenir aux performances minimales pour une utilisation en couche de forme, il choisit d'ajouter un correcteur granulométrique.

Les sédiments du port de New York/New Jersey (USA) ont fait l'objet de travaux en vue d'une utilisation en génie civil. Les travaux de Maher *et al.* [2004] portent sur des formulations à base de ciment et de cendres volantes. L'étude conclut qu'une utilisation en technique routière est envisageable. L'étude géotechnique est ensuite complétée par une étude environnementale [Douglas *et al.*, 2005].

Lemée [2005] veut activer les propriétés pouzzolaniques des sédiments de la baie du Mont-Saint-Michel. Le procédé d'alcali-activation est utilisé. Cette technique consiste à utiliser des produits d'alcalinité supérieure à celle de la chaux. Ainsi, le recours à des bases fortes comme la potasse ou la soude permet d'élever l'alcalinité du milieu et par conséquent de faciliter la phase de dissolution des composés pouzzolaniques et la formation d'hydrates liants. Des cendres volantes sont ajoutées afin d'augmenter la proportion de matières pouzzolaniques dans les mélanges.

Le mélange réalisant les meilleures performances est composé de 6 % de cendres volantes ainsi que d'une solution alcaline de sorte à avoir une alcalinité du milieu $[HO^-]$ à 3,92 mol/l. Les sédiments ainsi traités montrent :

- de bonnes performances mécaniques au jeune âge ($R_{C28j} = 0,9$ MPa) ;
- une bonne résistance aux agressions gel/dégel ($R_{C_{G/Dj}} / R_{Cj} > 1$) ;
- une vitesse de durcissement acceptable entre 28 et 60 jours ($R_{C_{60j}}/R_{C_{28j}} = 1,3$) ;
- une très bonne tenue à l'eau ($R_{C_{M/Sj}} / R_{Cj} > 1$).

Les matériaux stabilisés sont destinés à la réalisation de structures routières d'aménagement à très faibles trafics dont notamment les projets de parkings et voies vertes s'inscrivant dans l'opération grand site de la Baie du Mont-Saint-Michel.

L'objectif de l'étude de Dubois [2006] était de caractériser, sur le plan physique, mécanique, et environnementale, les sédiments des ports de Dunkerque et de Gravelines / Grand Fort Philippe, et d'utiliser ces sédiments pour mettre au point un matériau de couche d'assise de chaussée, en s'appuyant sur une démarche de valorisation, ne prenant en compte ni traitement spécifique des sédiments, ni dosages excessifs en ciment et en chaux.

Behmanesh [2008] focalise ses travaux sur des aspects de durabilité des sédiments fins dragués dans le port autonome du Havre puis traités avec des liants principalement constitués de 2 à 4% de ciment, de 2% de chaux, de 2% de cendre volante et de 1 % de fumée de silice. Dans cette optique, des essais de gel/dégel et de mouillage/séchage sont réalisés sur les sédiments traités.

Sannier [2008], dans le cadre du projet SEDIMARD83, a réalisé des traitements sur des sédiments provenant d'un large éventail de ports méditerranéens et ayant parfois subi un prétraitement. Son critère discriminant principal est le seuil de résistance à la compression de 1 MPa. A partir de là, ses travaux aboutissent à l'identification de groupes de traitements à performances équivalentes associant la notion de coût, de résistance mécanique et de produit valorisable [Sannier *et al.*, 2009].

Dans le cas précis des sédiments de barrage, Kham-Khoeup et Jigorel [1997], effectuent une étude de la stabilisation à la chaux et au ciment des sédiments du site de Lyvet dans l'estuaire de la Rance. Une formulation avec 3% de chaux + 3% de ciment procure aux sédiments des résistances proches d'1 MPa.

Fall *et al.* [2009] puis Jauberthie *et al.* [2010] approfondissent l'étude de stabilisation/solidification des sédiments de la Rance en testant de nouvelles formulations. Ainsi, avec un mélange à 3,5 % de ciment + 3,5 de chaux, la résistance à la compression atteint 3 MPa alors qu'elle n'atteint que 2 MPa pour 7% de chaux et 2,3 MPa pour 7% de ciment.

Notons que Seklaoui-Oukid *et al.* [2012] comparent l'influence d'une cuisson pour les caractéristiques géotechniques sur des sédiments de la Rance et sur des sédiments du barrage d'El Merdja Sidi Abed (Algérie).

L'expérience acquise par ces travaux de recherche montre que la teneur en eau, la fraction fine et la matière organique conditionnent l'efficacité des modes de traitement.

► **Traitement des sédiments avec le procédé Novosol®**

Plusieurs travaux ont porté sur l'utilisation des sédiments traités avec le procédé Novosol en vue d'une utilisation comme matériau routier.

Scordia [2008] a travaillé sur la valorisation de sédiments fluviaux traités en vue d'une utilisation en couche de forme. Nguyen [2008] réalise l'étude des comportements mécanique et environnemental de couches d'assise contenant différents taux d'introduction de sédiments issus du canal de Dampremy (Belgique) ayant reçu le procédé Novosol®. Enfin, Tribout [2010] s'intéresse principalement à des aspects d'acceptabilité environnementale des sédiments traités avec Novosol® puis utilisés comme un matériau routier.

► **Traitement d'un sédiment avec apport d'un correcteur granulométrique**

L'apport d'un correcteur granulométrique à un matériau traité consiste, la plupart du temps, à améliorer son squelette granulaire afin de réduire ses vides et apporter de la résistance. En effet, l'augmentation de la compacité lui permet ainsi de développer de meilleures performances mécaniques. Les sédiments traités présentent une porosité très importante, de l'ordre de 50%, qui suffit à elle seule pour expliquer les faibles performances mécaniques obtenues. Pour réduire cette porosité, l'ajout d'un correcteur granulométrique (avec des éléments plus grossiers) aux sédiments peut être envisagé. Dans le cas d'un traitement de solidification d'un sédiment fin de dragage, le correcteur ne va pas seulement modifier la compacité du matériau, mais l'ensemble des paramètres. Il joue, tout d'abord, un rôle de diluant en modifiant les paramètres de nature (diminution de l'argilosité et de la teneur en matière organique) et il modifie également la mise en œuvre du matériau [Levacher *et al.*, 2006].

Plusieurs études sur la valorisation des sédiments de dragage incluent la possibilité d'utiliser un correcteur granulométrique [Colin, 2003 ; Dubois, 2006 ; Sannier, 2008] en complément du traitement aux liants hydrauliques. Boutouil et Saussaye [2011a et 2011b], utilisent ce type de traitement sur des sédiments marins issus du port de Ouistreham. La répartition granulométrique du correcteur et la forme du sable jouent un rôle dans l'efficacité du traitement.

Les travaux de thèse de Bourabah [2012], portent sur la valorisation des sédiments du barrage Algérien de Cheufas. Pour évaluer l'utilisation des sédiments en technique routière, les normes françaises ont été utilisées. Pour atteindre les seuils requis, plusieurs études ont été menées : une étude avec un traitement à base de chaux et de liant hydraulique, puis une autre, avec un ajout d'un correcteur granulométrique.

► *Traitement d'un sédiment avec un apport de fibres*

Les travaux de Liang [2012], ouvrent la voie de la co-valorisation des sédiments avec d'autres déchets afin de limiter le coût de la valorisation. L'objectif final visé étant toujours une utilisation des matériaux en technique routière. Pour ce faire, des fibres naturelles (lin) et synthétiques (polypropylène et polyacrylonitrile) ont été ajoutées à plusieurs sédiments marins (de plusieurs façades maritimes) ainsi qu'à des fines de carrières.

Les matériaux ont ensuite subi un traitement avec des ajouts de chaux et de liants hydrauliques, mais aussi des incorporations de cendres volantes, de fumée de silice ou de sables correcteurs.

Les résultats sont prometteurs, car, selon Liang *et al.*[2011] dans le concept « sédiment-liant pouzzolanique-fibres végétales », il est supposé que s'il y a dégradation éventuelle des fibres dans le temps, l'effet des liants pouzzolaniques se traduira par une augmentation des résistances à long terme qui viendra pallier en partie cette dégradation.

3.3.2. Réalisations

Il y a malheureusement peu de réalisations d'ouvrages routiers en Europe à une échelle vraie grandeur, mais quelques cas d'ouvrages partiels sur tronçons réduits ont été proposés.

► *Plate-forme expérimentale avec les sédiments marins de Port-en-Bessin*

Dans le cadre des travaux de Silitonga [2010], la réalisation d'une plate-forme expérimentale sur site pour valider les résultats expérimentaux de laboratoire a été proposée. La formulation testée sur les sédiments de Port-en-Bessin (Basse-Normandie) comprend de la chaux (3 %), du sable (5 %), du ciment (5 %) et enfin de la fumée de silice (1 %). La figure 2-15 illustre le chantier où les sédiments dragués ont été mis en place pour créer la plate-forme.



Figure 2-15. Mise en place des matériaux [Silitonga, 2010]

► *Tronçon expérimental avec les sédiments du port de Dunkerque*

A Dunkerque (Nord-Pas-de-Calais), après une étude réalisée à l'École des Mines de Douai, les sédiments marins issus des dragages ont été utilisés pour la conception d'une route dont la réalisation a été confiée à l'entreprise Colas.

Dans un premier temps, une planche expérimentale a été réalisée en 2005 [Damidot *et al.*, 2006]. La figure 2-16 illustre le chantier de la plate-forme expérimentale. Cependant, cet ouvrage expérimental n'a jamais été soumis à la circulation [SIM, 2012]. Le bilan de la première planche expérimentale aura consisté à valider le passage de la phase « laboratoire » à la phase « exécution ».

C'est en 2012 qu'une route expérimentale est construite. Appelée route du quai « Freycinet 12 », elle intègre un mélange sable/sédiment pour sa couche de fondation. Avant d'être utilisés, les sédiments sont préalablement lagunés jusqu'à obtenir des teneurs en eau proches de 30 % [R&V, 2012]. L'épaisseur de la couche de fondation est d'une trentaine de centimètres et la proportion est de 2/3 de sable pour 1/3 de sédiment. Une partie de la route a été instrumentée pour effectuer un suivi environnemental en récupérant la percolation de l'eau circulant à travers la chaussée.



Figure 2-16. Mise en place de la plate-forme expérimentale dans le port de Dunkerque [Damidot *et al.*, 2006]

► *Route test avec des sédiments fluviaux traités avec le procédé Novosol®*

A Dombasle (Lorraine), une route « test » de 100 m² a été construite en décembre 2005 (figure 2-17).



Figure 2-17. Construction de la route « test » [Depelsenair, 2007]

Des sédiments fluviaux, préalablement traités avec le procédé Novosol®, ont été incorporés à hauteur de 30% à la couche d'assise d'une épaisseur de 25 cm [SEDIBET, 2010]. Un suivi environnemental et de comportement mécanique a été réalisé.

► *Voies cyclables du Mont-Saint-Michel*

Un volume de 70 000 m³ de tange a été valorisé en voie cyclable (figure 2-18). Pour réaliser cette voie d'une longueur de 35km, le procédé ECOVOIE® de la société ARD a été utilisé. Ce procédé utilise un liant hyper pouzzolanique dont le nom commercial est ACTI100. Les sédiments sont alors traités avec ce liant pour acquérir les performances suffisantes pour ce type d'utilisation.



Figure 2-18. Voie verte du Mont-Saint-Michel

3.3.3. Intérêts de la filière et des sédiments

► *Intérêts de la filière*

Cette filière est intéressante de par les volumes de matériaux qu'elle consomme – de l'ordre de 200 millions de t/an – et du fait d'un manque de granulats éventuel dans les années à venir. De plus, le domaine routier exploite des matériaux de nature très variée qui demandent des caractéristiques de résistance mécanique peu élevées en fonction de la position du matériau dans la structure routière.

Rappelons également que les entreprises routières ont déjà une grande expérience en matière de recyclage de matériaux avec certains déchets ou co-produits tels que les cendres volantes, les MIOMs, les laitiers d'aciérie, etc.

Certaines utilisations, telles que les chemins piétonniers, voies cyclables, aires de stationnement, n'ont ni guide technique dédié ni cadre normatif aussi bien définis que pour la technique routière. De plus, les performances techniques que doivent acquérir les sédiments sont plus faibles que pour une utilisation en couche de forme. En effet, les contraintes liées à leurs usages étant moins importantes. La réalisation d'ouvrages de ce type constitue donc des opportunités qu'il ne faut pas écarter.

► *Intérêts des sédiments*

Dans cette voie de valorisation, les sédiments peuvent constituer une source de matériaux pour la construction d'ouvrages. Ils constituent un gisement alternatif renouvelable pour des applications où les performances requises ne demandent pas un matériau noble.

3.4. CONCLUSION

Il existe des utilisations potentielles des sédiments en technique routière. Certaines spécifications techniques pour les différentes couches des structures routières sont clairement établies. En revanche, les cahiers des charges pour des applications telles que des chemins, des aires de stationnements, pistes cyclables ne sont pas aussi bien définis. De plus, on sait que des matériaux avec des performances moindres peuvent convenir à ces types d'utilisation.

Les sédiments fins impliquent qu'un traitement soit réalisé pour être utilisés en technique routière. La caractérisation géotechnique doit alors être faite sur les sédiments bruts pour adapter au mieux le traitement. Mais une seconde phase d'essais est nécessaire pour connaître les performances des sédiments après avoir subi un traitement, et ce, afin d'estimer leur capacité à être utilisés en couches routières.

Pour caractériser les sédiments fins bruts en vue d'une application en technique routière, il faut en premier lieu connaître les « paramètres d'identification ». Ils sont au nombre de trois : la granularité, l'argilosité et la teneur en matière organique.

La caractérisation des sédiments traités porte sur des paramètres de comportement mécanique. Les paramètres essentiels à retenir sont (i) la résistance à la compression et (ii) le couple résistance à la traction/module d'élasticité.

La résistance à la compression (R_c), est l'indicateur de référence pour une utilisation en couche de forme. La résistance à la compression doit atteindre 1 MPa, [SETRA-LCPC, 2000 ; NF P 94-102-1]. C'est le critère de traficabilité autorisant la circulation du chantier. La résistance à la compression simple est aussi un indicateur de l'intégrité physique d'un matériau solidifié. Dans le cadre du projet SEDIMARD83, Sannier et al. [2008 et 2009] utilisent la résistance à la compression à 28 jours comme indicateur de l'efficacité de multiples traitements appliqués sur différents sédiments portuaires méditerranéens. La résistance à la compression permet d'une part, de déterminer un dosage optimal en liant(s) à utiliser pour obtenir le critère de portance (ou de résistance) et d'autre part, de déterminer le temps de cure nécessaire permettant de garantir certaines performances comme la traficabilité.

Le couple résistance à la traction indirecte/module de déformation (R_t/E) est à considérer. Il permet de connaître les performances mécaniques à long terme. Ce couple est presque systématiquement mesuré dans les travaux de valorisation de sédiments fins pour une couche de forme [Levacher *et al.*, 2006 ; Kamali *et al.*, 2008 ; Zentar *et al.*, 2008 ; Dubois *et al.*, 2009 ; Obana *et al.*, 2010 ; Boutouil et Saussaye, 2011b ; Tribout et Husson, 2011 ; Wang *et al.*, 2011 ; Miraoui *et al.*, 2012 ; Tribout *et al.*, 2012]. Si ces essais apparaissent nécessaires pour une validation de sédiments traités pour une application en couche de forme, il faut valider en amont un seuil de résistance R_c minimal.

La France bénéficie d'une longue expérience en matière de traitement des sols fins. Le cas des sédiments y est relativement proche. C'est pour cela que de nombreux travaux de recherche ont été orientés dans ce sens. Ils ont permis de démontrer la faisabilité technique de cette voie de valorisation. Cependant, à ce jour, il n'existe que peu de réalisations finalisées.

Le contexte amorce progressivement une évolution dans cette filière, et commence à reconnaître l'utilisation des sédiments. Par exemple, le guide méthodologique « chapeau » sur les matériaux alternatifs en technique routière (SETRA, 2011) prévoit une application potentielle aux déblais de dragage. De même, on retrouve les sédiments comme un gisement de matériau dans la base OFRIR2 (2013) « *Observatoire Français des Ressources pour les Infrastructures* », développée par des organismes reconnus en matière d'infrastructures routières et de gestion des déchets. Ces matériaux restent cependant dans la catégorie des matériaux naturels « hors spécifications ».

4. LA FILIERE « MATERIAU CERAMIQUE »

La grande majorité des matériaux produits par l'industrie céramique est consommée dans le bâtiment et l'habitat. Les matériaux de terre cuite sont utilisés dans le bâtiment depuis des siècles et ceci, dans tous les pays du monde. De nombreux objets et usages peuvent être recensés. Les briques et tuiles constituent les objets les plus couramment employés. Ils se sont adaptés à l'évolution de la construction et à ses impératifs. Avec l'apparition des porcelaines et des faïences, initialement dédiées aux objets servant à la décoration et objets d'art ces matériaux céramiques ont évolué vers des usages domestiques. Ces matériaux font partie de la famille des céramiques traditionnelles. Ces céramiques, aussi dites conventionnelles ou silicatées, sont des matériaux préparés à partir de matières premières naturelles dont le constituant principal est l'argile.

Plus récemment, des céramiques dites techniques ont fait leur apparition. Elles sont dotées de nouvelles propriétés : tenue à très haute température, conductivité, ... Elles se rencontrent dans les applications médicales ou industrielles très particulières. Cependant, les volumes restent faibles par rapport aux matériaux de construction en terre cuite. Ce sont donc ces derniers matériaux, à grande diffusion, qui sont ciblés dans le cadre de la valorisation des sédiments.

Selon la FFTB (Fédération Française des Tuiles et des Briques), la production de terre cuite en 2011 était proche de 5 500 000 t. Elle se répartit selon divers produits comme indiqué dans le tableau 2-28.

Tableau 2-28. Répartition de la production française en terre cuite en 2011, données FFTB

<i>Matériaux</i>	<i>Tonne (en kt)</i>	<i>% du total</i>
<i>Tuiles (avec accessoires)</i>	<i>2737</i>	<i>50,4</i>
<i>Briques de structure</i>	<i>2446</i>	<i>45,0</i>
<i>Briques apparentes + pavage</i>	<i>216</i>	<i>4,0</i>
<i>Autres produits</i>	<i>32</i>	<i>0,6</i>
<i>Total</i>	<i>5431</i>	<i>100</i>

La production est assurée par des usines réparties sur l'ensemble du territoire français. Les principaux groupes industriels dont ces usines dépendent sont : Bouyer Leroux, Imerys, Monier group, Terreal et Wienerberger.

Dans cette section, on va tout d'abord décrire d'une manière générale la matière première utilisée, les principaux produits céramiques et les techniques de fabrication. La partie suivante portant sur les spécifications va être dédiée aux caractéristiques des matières premières pour la confection de matériaux de construction en terre cuite.

4.1. DESCRIPTION

4.1.1. La matière première de base : l'argile

La matière première de base des céramiques traditionnelles est l'argile. Après une préparation spécifique du mélange, la « terre glaise » est mise en forme, séchée et finalement cuite.

Le terme « argile » a plusieurs définitions qui ne se recouvrent que globalement. Il peut désigner ainsi :

- des minéraux de structures et propriétés particulières (minéral argileux) ;
- des roches argileuses composées pour l'essentiel de ces minéraux ;
- la partie la plus fine (< 2 µm) d'une analyse granulométrique d'un sol meuble ou sédiment fin, bien que des cristaux du minéral « argile » puissent être plus gros que 2 µm et que ceux des autres éléments, comme le quartz, puissent être plus petits.

Les minéraux argileux sont fondamentalement constitués de silicium, aluminium, oxygène et ions hydroxydes. Ce sont des phyllosilicates d'alumine hydratés, le préfixe « phyllo » désignant des minéraux qui prennent la forme de feuillets.

Les matériaux céramiques reposent en partie sur une connaissance très pointue de cette matière première utilisée.

► **Structure des argiles et critères de classification**

Produit de réactions électrochimiques, la structure des argiles est caractérisée par la superposition de deux couches :

- couche tétraédrique « T » (tétraèdres d'atomes d'oxygène autour d'un atome central de silicium Si) ;
- couche octaédrique « O » (octaèdres d'ions hydroxyles OH avec, au centre, un ion aluminium Al³⁺).

Ces deux couches peuvent s'associer de différentes façons. Chaque groupe minéralogique se caractérise par une structure particulière en couches avec divers éléments remplissant l'espace interfoliaire (figure 2-19). Par conséquent, l'espace basal donne une indication sur le minéral présent dans l'échantillon (figure 2-20). Les trois structures principales sont :

- les minéraux T/O ou 1/1 avec un espace basal de 7Å (kaolinite) ;
- les minéraux T/O/T ou 2/1 avec un espace basal de 9.5Å pour le talc et les pyrophyllites, 10Å pour l'illite et l'halloysite, 10,4Å pour la palygorskite, 12Å pour la sépiolite, 14 à 15Å pour les smectites et les vermiculites ;
- les minéraux T/O/T - O ou 2/1/1 avec un espace basal de 14Å (chlorite).

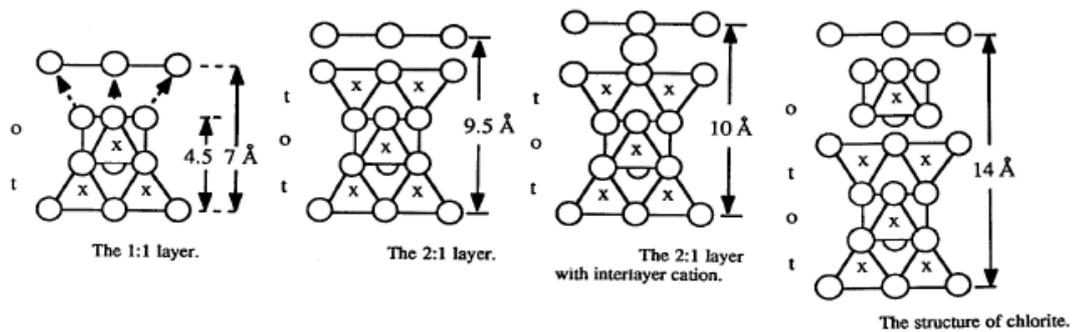


Figure 2-19. Schéma des modèles structuraux [Moore et Reynolds, 1989]

MINÉRAUX 1:1 ou T-O		MINÉRAUX 2:1 ou T-O-T				
Equidistance	Equidistance	Equidistance	Equidistance	Equidistance	Equidistance	Equidistance
≈ 7 Å	≈ 10 Å	≈ 9.4 Å	≈ 10 Å	10.4, 12 Å	14 - 15 Å	
STABLE	VARIABLE	STABLE	STABLE	STABLE	STABLE	VARIABLE
KAOLINITE	HALLOYSITE	TALC PYROPHYLLITE	ILLITE	ARGILES FIBREUSES Palygorskite (10.4 Å) Sépiolite (12 Å)	CHLORITE	SMECTITE VERMICULITE

Figure 2-20. Familles argileuses [Holtzapffel, 1985]

Il peut y avoir des substitutions ioniques dans la couche T (Si⁴⁺ est remplacé par Al³⁺) et dans la couche O (Al³⁺ est remplacé par Mg²⁺ ou Fe²⁺). Ces substitutions entraînent un manque d'ions, et les couches ne sont plus neutres électriquement. Pour conserver la neutralité, des cations (K⁺, Na⁺, Ca²⁺,...) vont venir s'absorber, en particulier entre les couches et les feuillets. Ces cations additionnels sont plus ou moins liés et échangeables. Certaines argiles présentent donc une capacité d'échange

cationique élevée. Les molécules d'eau sont attirées par ces cations et les argiles présentent une grande capacité d'absorption d'eau, entraînant parfois une certaine expansion de la maille.

► *Les principales formes minéralogiques*

Suivant l'arrangement des couches dans le feuillet et les substitutions ioniques, on obtient de nombreuses argiles dont les principales sont les suivantes :

- *Famille des Kaolinites*

La kaolinite est un minéral argileux très utilisé en céramique, notamment pour la fabrication de porcelaine. Le mot vient du chinois 高岭土, *gāo líng tǔ* signifiant « terre de la haute colline ». Ce minéral a deux couches T-O. Le feuillet est neutre et l'espace interfoliaire est vide. L'unité structurale a une épaisseur de 7,2 angströms. Les feuillets sont liés par de fortes liaisons hydrogènes. La structure est stable : l'eau ne peut s'adsorber qu'autour des particules et cette argile n'est pas gonflante. La kaolinite est fréquente dans les sédiments argileux provenant de l'altération de roches acides riches en feldspath (granites par exemple). Elle présente une forte teneur en alumine (46 %) et montre des propriétés de plasticité, de faible retrait au séchage et à la cuisson. La kaolinite est pauvre en alcalins et alcalino-terreux, ce qui a pour conséquence de lui donner un caractère assez réfractaire. Elle demande donc des températures de cuisson élevées.

- *Famille des Illites*

C'est le type d'argile le plus répandu et le plus utilisé dans la terre cuite [Kornmann *et al.*, 2005]. Son nom vient de l'État américain de l'Illinois, où l'illite a été décrite pour la première fois en 1937. La structure des illites est proche de celle de la muscovite mais en diffère par le degré de substitution Si/Al (inférieur dans l'illite), la présence de potassium (inférieure dans l'illite) et la quantité d'eau (supérieure dans l'illite). La composition de l'illite est variable en fonction des conditions de formation. La capacité d'échange des illites est limitée et l'espace inter-foliaire reste constant, à 10 Å.

Ce phyllosilicate contribue fortement à la plasticité des pâtes céramiques du fait de sa forte surface spécifique. De plus, la présence de potassium en son sein joue le rôle de fondant pouvant abaisser la température de début de fusion vers 1050°C.

- *La famille des Smectites*

Ce groupe d'argile possède une structure à 3 couches T-O-T. Il peut y avoir différentes substitutions dans les couches, avec des teneurs variables en Na, Ca, Al, Fe, Mg.

A la différence des illites, les cations placés dans l'espace interfoliaire des smectites (Mg^{2+} , Fe^{3+}) sont très peu liés et la quantité d'eau dans cet espace est très variable. L'écart réticulaire est donc variable entre 10 et 21 Å en fonction de la présence d'eau. Les cristaux sont généralement très fins. De cette structure et de cette capacité d'absorption d'eau dans l'espace interfoliaire, découlent leurs propriétés particulières de haute plasticité, de grande absorption d'eau, de retrait/gonflement important, de pouvoir liant, d'absorbant.

La montmorillonite, tenant son nom de Montmorillon (commune de la Vienne, France), appartient à la famille des smectites. Dans ce cas, un des ions Al^{3+} de la couche octaédrique est remplacé par Mg^{2+} . Les feuillets ne sont plus neutres mais négatifs et des compensations sont faites par des cations faiblement liés (Ca^{2+} ou, moins fréquemment, Na^+).

- *Famille des Chlorites*

Les chlorites (du grec « khlôros » vert) sont des composés à trois couches T-O-T avec un espace interfoliaire occupé par un feuillet d'hydroxydes de magnésium chargé positivement, constituant quasiment une quatrième couche. L'espace basal caractéristique atteint 14,1Å. Les chlorites sont assez fréquents dans le cortège argileux des matières premières pour la terre cuite.

Les caractéristiques des principales argiles sont regroupées dans le tableau 2-29.

Tableau 2-29. Comparaison des propriétés des différentes argiles [Kornmann, 2009]

Minéral	Couches	Épaisseur du feuillet (Å)	Cations absorbés en compensation	CEC en cmol/kg	Expansion à l'humidité	Surface spécifique m ² /g
Kaolinite	TO	7	Sans Ca ²⁺ , Na ⁺ hydratés	3-15	Faible	5-20
Smectite	TOT	10-21	secs entre feuillets et externes	80-150	Élevée	700-800
Illite	TOT	10	K ⁺ secs entre feuillets et externes	10-40	Faible	100-200
Chlorite	TOT (O)	14,1	Mg ²⁺ externe	10-40	Faible	5-20

De par leur composition minéralogique et leurs propriétés caractéristiques, les argiles vont avoir des conséquences sur les propriétés et le procédé d'un produit céramique.

Le tableau 2-30 renseigne sur l'influence des minéraux argileux d'un mélange mais également sur l'effet des autres minéraux pouvant entrer dans la composition du mélange.

Tableau 2-30. Influence de différents minéraux d'un mélange [Kornmann et al., 2005]

Minéral	Plasticité, cohésion, susceptibilité aux feuilletages	Difficulté de séchage	Cuisson
Kaolinite	Augmente la plasticité	Difficulté limitée	Rend plus réfractaire, élargit la zone de vitrification
Illite	Apporte une bonne plasticité	Difficulté moyenne	Agit comme flux* grésant/fondant
Smectite Montmorillonite	Apporte une très grande plasticité et une grande cohésion	Grande difficulté : Retrait important et rétention capillaire	Améliore la compacité
Mica (muscovite, sérinite...)	Réduit la plasticité, favorise les feuilletages, effet dégraissant	Limitée	Peut baisser la température de grésage
Quartz	Réduit la plasticité et la cohésion, effet dégraissant, favorise les feuilletages	Limitée	Rend plus réfractaire, apporte une sensibilité au refroidissement
Feldspath	Réduit la plasticité, effet dégraissant	Limitée	Agit comme un flux grésant* au-dessus de 1 000°C
Carbonates	Effet dégraissant	Limitée	Action sur la couleur, rend plus étroit le palier de fusion, augmente la porosité
Oxyde de fer	Limitée	Limitée	Action sur la couleur, agit comme flux grésant*

*Flux : additif qui abaisse le point de fusion (fondant) et augmente le grésage (vitrification)

Les formules (ou pâtes) des céramiques à base d'argile peuvent être constituées d'une seule ou plusieurs argiles, mélangées à des modificateurs minéraux, dits « non plastiques », tels que la poudre de quartz et de feldspath qui ont un effet de dégraissant.

Ces matières dégraissantes permettent de réduire la plasticité du matériau et de le rendre moins gras : cela a pour intérêt de réduire la quantité d'eau, ce qui facilite le séchage, et réduit le risque d'apparition de fissures ou de déformations lors de la cuisson. Un autre des principaux matériaux dégraissants traditionnels est la chamotte, composée d'argile calcinée.

4.1.2. Les techniques de fabrication

La fabrication de pièces céramiques comprend différentes étapes. L'extraction des matières premières constitue la première phase. Il faut ensuite préparer le mélange à base d'argile afin d'éliminer les éventuelles impuretés, homogénéiser et ajuster l'humidité en vue de l'étape de façonnage ou mise forme.

Les céramiques silicatées peuvent être mises en forme de différentes façons selon les produits à fabriquer. La quantité d'eau contenue dans l'échantillon dépendra du mode de façonnage. Ensuite, l'eau est le plus souvent éliminée au cours d'un traitement spécifique de séchage.

La pièce crue est enfin transformée en céramique par la cuisson, aussi appelé frittage, réalisé dans des conditions de température, de vitesse de chauffe et d'atmosphère appropriées. Selon l'application envisagée, cette céramique, parfois appelée tesson, peut être dense ou poreuse, blanche ou colorée.

La figure 2-21 schématise les principales étapes pour fabriquer une pièce céramique.

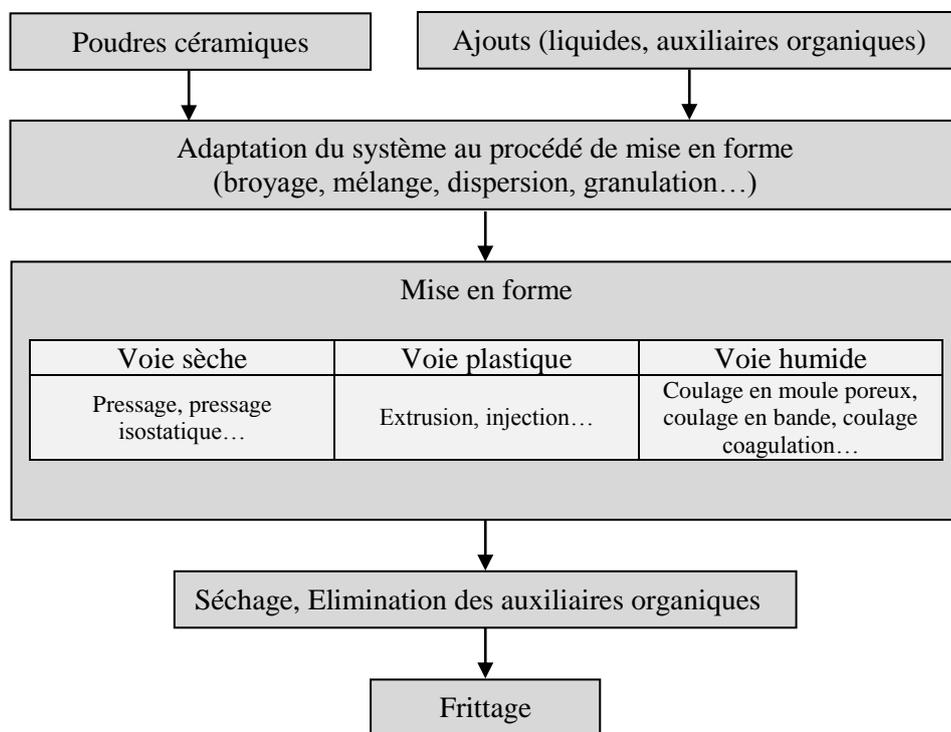


Figure 2-21. Organigramme général de fabrication d'une pièce céramique [Fantozzi et al., 2011]

Seules les phases principales de fabrication d'un produit céramique sont décrites par la suite, à savoir la mise en forme, le séchage et le frittage

► **Façonnage ou mise en forme**

Selon la géométrie et les caractéristiques des pièces à obtenir, les céramiques traditionnelles peuvent être mises en forme par coulage (gravitaire ou sous pression) dans un moule en utilisant une suspension aqueuse de matière minérale appelée aussi barbotine. Les pièces peuvent aussi être mises en forme par extrusion, calibrage ou injection d'une pâte plastique ou par pressage (unidirectionnel ou isostatique) de granulés faiblement liés.

A chacun des différents modes de façonnage correspond un comportement rhéologique et un domaine de composition pour le mélange de matière minérale et d'eau (figure 2-22).

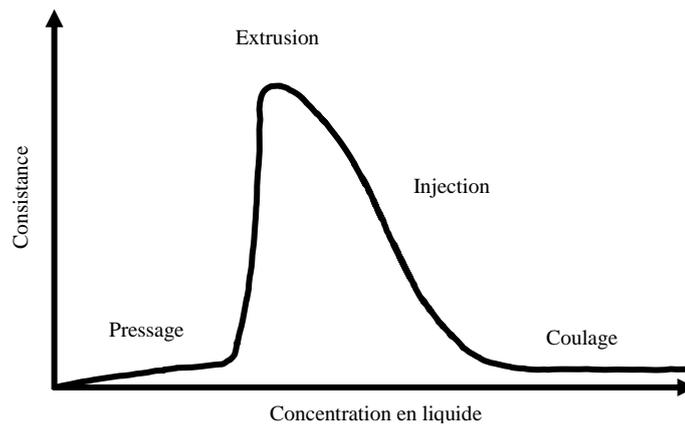


Figure 2-22. Evolution de la consistance d'un mélange de poudre minérale-eau en fonction de la quantité d'eau ajoutée [d'après Fantozzi et al., 2011]

Les principaux procédés de mise en forme pour les céramiques conventionnelles sont décrits dans le tableau 2-31.

► Séchage

Une fois les produits façonnés, la teneur en eau peut être encore importante (15 à 30 % pour les produits en terre cuite). Il est nécessaire, avant de les soumettre à la cuisson, d'éliminer la plus grande partie de cette eau : c'est l'opération de séchage.

Par le passé, la plupart des objets en argile séchaient de façon « naturelle », à l'air libre et à température ambiante. Dans de nombreuses régions d'Europe, cette opération n'était efficace qu'en été. Dans l'industrie de la brique et de la tuile, on employait de simples claies de séchage qui permettaient de faire durcir des rangées superposées d'objets sous une simple couverture de bois léger qui les protégeait contre la pluie.

Dans l'industrie céramique moderne, il est nécessaire d'optimiser le séchage en termes de vitesse, de rendement thermique et de réduction des rejets. A l'exception des procédés de séchage lents et contrôlés, il faut maintenir un contrôle strict des vitesses de chauffage, de la circulation de l'air, de la température et de l'humidité. Aujourd'hui, la chaleur de l'air de séchage est principalement fournie par des brûleurs à gaz et par l'air chaud récupéré de la zone de refroidissement des fours.

Les matières premières céramiques ont des sensibilités diverses au séchage, mais la plupart bénéficient d'une période d'échauffement initial dans des conditions de forte humidité (et peu ou pas d'évacuation de l'humidité), suivie de l'étape principale de séchage où les produits rencontrent un air plus chaud et plus sec. Ce sont les toutes dernières fractions d'eau qui sont les plus difficiles à évacuer, et il leur faut de l'air le plus chaud et le plus sec possible. Les différentes formes de séchoirs ont évolué pour satisfaire aux besoins des différents secteurs de l'industrie, dans lesquels la nature et les dimensions des composants céramiques sont très variées.

Après leur passage dans le séchoir, les produits ne contiennent plus que 1 à 2 % d'eau résiduelle. Le séchage est une phase délicate et importante de la fabrication qui doit être menée judicieusement si l'on veut obtenir des produits de qualité. Le paramètre le plus limitatif du séchage étant la formation de fissures quand le séchage est trop rapide.

Le retrait de séchage moyen des pâtes céramiques varie de 2 % à 8 % environ. Il peut être plus élevé dans le cas d'utilisation d'argiles très plastiques comme la montmorillonite. L'adjonction de dégraissants (chamotte, silice...) diminue le retrait mais diminue aussi la plasticité

Pour évaluer l'aptitude au séchage, on utilise la courbe de Bigot. Elle est obtenue à l'aide d'un barélatographe qui va mesurer les pertes de masse en fonction du retrait. Un exemple de courbe est montré à la figure 2-23.

Tableau 2-31. Procédés de mise en forme des céramiques

	Procédé	Description
<i>Voie sèche</i>	<i>Pressage uniaxial</i>	<i>La poudre est compactée par matrice rigide à l'aide d'un piston. Le moule de pressage est métallique et les parties en contact avec la poudre peuvent être traitées pour résister à l'abrasion et à la corrosion. Cette technique conduit à la réalisation de pièces de forme simple (joints, bagues...).</i>
	<i>Pressage isostatique</i>	<i>La poudre est compactée dans un sac flexible maintenu par un moule support rigide. L'application de la pression se fait par l'intermédiaire d'un fluide à base d'huile et d'eau. Cette technique conduit à la réalisation de pièces de forme complexe (tubes, bougies d'allumage...).</i>
<i>Voie plastique</i>	<i>Extrusion</i>	<i>La pâte préalablement plastifiée et désaérée, est poussée à travers une filière de géométrie donnée à l'aide d'une vis. Après extrusion, les pièces sont coupées à la longueur désirée, puis subissent les traitements appropriés. Cette technique conduit à la réalisation de pièces de grandes dimensions.</i>
	<i>Injection</i>	<i>Le mélange fluidifié est introduit dans un moule ayant la forme de la pièce à fabriquer. Le mélange thermofusible – qui a la propriété de devenir fluide sous l'effet de la chaleur – est chauffé dans une enceinte puis forcé à travers une buse dans le moule dont la température est inférieure au point de fusion du mélange. Après solidification, par abaissement de la température, la pièce est éjectée du moule. Cette technique conduit à la réalisation de pièces de forme simple ou complexe en série dont l'épaisseur maximale est de 1 cm.</i>
<i>Voie humide</i>	<i>Coulage en moule poreux</i>	<i>Le mélange est versé dans un moule ayant la forme de la pièce à fabriquer. La pièce est laissée pour se solidifier. Cette technique conduit à la réalisation de pièces volumineuses par exemple de type sanitaire.</i>
	<i>Sous pression</i>	<i>Une pression est appliquée à la suspension de coulage dans un moule poreux. Le gradient de pression force le fluide à travers le moule poreux et à travers la couche en formation, ce qui permet de diminuer le temps de prise de la suspension par rapport au coulage classique. Cette technique, particulièrement utilisée dans le domaine des céramiques traditionnelles conduit à la réalisation de pièces volumineuses. La productivité peut être élevée.</i>

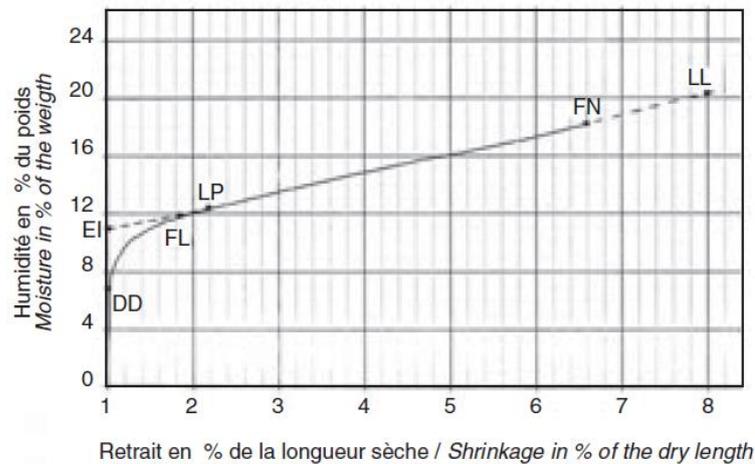


Figure 2-23. Courbe de Bigot typique d'une argile à tuiles (humidité et retrait exprimés par rapport au matériau sec) [Kornmann, 2006]

► Cuisson / frittage

A la sortie du séchoir, il est nécessaire de cuire les produits pour leur permettre d'acquérir un certain nombre de propriétés importantes du produit fini. Il s'agit notamment de la résistance mécanique, la résistance à l'abrasion, la stabilité dimensionnelle, la résistance à l'eau et aux produits chimiques, et la tenue au feu. Par conséquent, la cuisson est un processus clé de la fabrication des produits céramiques.

La cuisson ou frittage est un traitement thermique qui permet de passer d'un système de particules individuelles vers un état solide de compacité plus ou moins abouti. D'une manière générale, au cours du frittage, deux phénomènes sont en compétition : la densification et la croissance des grains. Trois stades sont généralement distingués au cours du frittage :

- le stade initial : il y a formation de ponts entre les particules qui gardent leur identité,
- le stade intermédiaire : la microstructure change d'aspect ; les grains deviennent de forme polyédrique, s'accolent les uns aux autres et une porosité ouverte s'organise sous forme de canaux cylindriques,
- le stade final : la porosité se ferme et un grossissement des grains est souvent observé.

Les paramètres importants qui contrôlent le processus du frittage sont : la composition des poudres, la température et la vitesse de chauffe, le temps, la taille des particules et éventuellement la pression appliquée.

La chaleur provoque des modifications du mélange argileux : déshydratation, décomposition et recombinaison qui font évoluer les propriétés (masse volumique, porosité, dureté, dimensions) comme indiquées dans le tableau 2-32.

Tableau 2-32. Principales réactions durant la cuisson [Kornman, 2009]

<i>Gamme de température</i>	<i>Actions sur les argiles</i>	<i>Actions sur les autres composants</i>
< 200°C	<i>Dégagement de l'eau résiduelle d'interposition, de l'eau adsorbée et de l'eau zéolitique des smectites</i>	
200 à 450°C		<i>Oxydation des matières organiques. Les hydroxydes de fer se transforment en oxydes</i>
400°C à 680°C	<i>Départ de l'eau de constitution, destruction des argiles, constitution de métakaolin</i>	<i>Le quartz change de forme cristallographique à 570°C</i>
750°C à 850°C		<i>Décomposition du calcaire, dégagement de CO₂ et apparition de la chaux. Oxydation des sulfures en sulfates</i>
> 800°C	<i>Début de grésage des eutectiques à bas points de fusion dans les systèmes Al₂O₃/SiO₂/Na₂O ou K₂O Formation de spinelle MgAlO₄</i>	<i>Décomposition des fluorures et des chlorures</i>
1060°C à 1200°C	<i>Fusion localisée progressive et frittage liquide, qui produit une baisse de la porosité et un retrait. Formation de mullite. Formation d'aluminosilicates de calcium dans les argiles calcaires</i>	<i>Décomposition de certains sulfates. Transformation de la chaux</i>

Cette étape du procédé de fabrication est souvent révélatrice des défauts introduits lors des étapes précédentes. Par exemple, la granularité des poudres intervient directement sur la densification et la croissance granulaire, donc sur la réussite du traitement des poudres qui est en fait validée par les performances de la pièce frittée.

4.1.3. Les différents produits

Sur la base de critères prenant principalement en compte la porosité ouverte et/ou la coloration du tesson, il est d'usage de distinguer, parmi les céramiques silicatées [Boch, 2001] :

- les produits de terre cuite,
- les faïences,
- les grès,
- les vitreous,
- et les porcelaines.

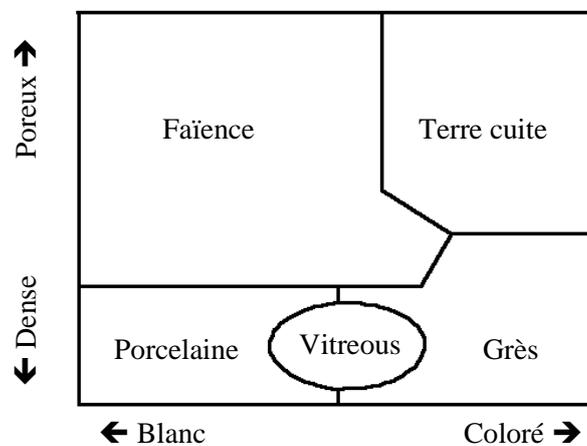


Figure 2-24. Représentation des différentes familles de céramiques conventionnelles [Bonnet dans Fantozzi et al., 2011]

La représentation sous forme de cadran adoptée sur la figure 2-24 permet de situer chacune des familles. Les produits de terre cuite et les faïences sont caractérisés par un tesson poreux. La forte coloration dans la masse des produits de terre cuite vaut à certains d'entre eux l'appellation de produits rouges. Ces céramiques poreuses peuvent être utilisées telles quelles (briques et tuiles) ou recouvertes d'un émail (faïences). Parmi les produits denses, le tesson des grès est plus coloré que celui des porcelaines. Les vitreous constituent un groupe intermédiaire entre ces deux dernières familles.

► *Les produits de terre cuite*

Il s'agit de poteries ou de produits pour le bâtiment tels que des tuiles, briques, conduits de fumées, tuyaux de drainage ou carreaux de dallage.

Les matières premières additionnées d'eau constituent une pâte plastique dont la rhéologie doit être adaptée au procédé de mise en forme (extrusion éventuellement complétée par un pressage). Le séchage des pièces crues est réalisé en cellule ventilée ou en séchoir tunnel. La température de cuisson est comprise entre 900 et 1160°C, [Bonnet et Gaillard dans Boch, 2001].

► *Les faïences*

On appelle faïence, tout produit constitué d'un tesson poreux recouvert d'une glaçure [Boch, 2001]. Cet émail permet de masquer l'aspect du tesson et de remédier à la forte perméabilité due à l'existence d'une porosité ouverte comprise entre 5 et 20 %. Bien que présentes sous forme d'objets de fantaisie et de vaisselle, les faïences sont surtout utilisées comme carreaux de revêtement mural.

Il existe plusieurs grands types de faïences. Les caractéristiques vont évoluer selon les matières premières, leurs proportions dans le mélange et la température de frittage. Il est possible de citer les faïences communes (poteries vernissées et faïences stannifères), les faïences fines – caractérisées par un tesson blanc ou faiblement coloré – et faïences feldspathiques.

► *Les grès céramiques*

Les grès céramiques présentent un tesson vitrifié, opaque, coloré et pratiquement imperméable (0 à 3 % de porosité ouverte). Ils sont obtenus à partir d'un mélange d'argiles grésantes (riches en silice) et de fondant, parfois complété par du sable ou de la chamotte. La température de cuisson est généralement comprise entre 1120 et 1300°C [Boch, 2001].

Les grès sont connus pour leur inaltérabilité, leurs excellentes performances mécaniques et leur résistance à l'érosion et aux agents chimiques.

Selon les « ingrédients » du mélange et les procédés céramiques utilisés, quatre principales familles existent, à savoir : les grès naturels, les grès fins, les grès cérames et les grès chamottés.

► *Les porcelaines*

Du fait de la pureté des matières premières utilisées, les tessons de porcelaine sont blancs et translucides sous faible épaisseur. Ils sont dépourvus de porosité ouverte (< 0,5 %).

La porcelaine n'est pas issue d'une argile naturelle. Elle est principalement composée d'un mélange de kaolin, de quartz et de feldspath. Pour les porcelaines dures, intégrant quasi-exclusivement ces trois composants sans autre ajout, le frittage est réalisé à une température comprise entre 1 350 °C et 1 430 °C.

D'autres éléments peuvent être ajoutés, notamment dans le cas des porcelaines alumineuses dont l'objectif est d'obtenir une pâte avec un ajout maximal de 50 % d'Al₂O₃ ou dans le cas de la porcelaine de type « China bone » où est additionnée une part importante de cendres d'os allant de 22 à 32 %.

► *Les vitreous*

Le terme vitreous désigne des matériaux denses obtenus à partir de pâtes proches de celles utilisées pour préparer les faïences feldspathiques. Pour ce type de matériaux, la teneur en feldspath des pâtes est augmentée afin de produire au cours de la cuisson une quantité de liquide suffisante pour éliminer la porosité ouverte. Les pièces peuvent être vitrifiées et émaillées au cours d'une même cuisson (entre 1200°C et 1280°C), [Boch, 2001].

Les vitreous sont situés à la transition entre les faïences feldspathiques, les grès à pâte blanche et les porcelaines. Ils sont surtout utilisés pour fabriquer des articles sanitaires et de la vaisselle très robuste.

4.2. SPECIFICATIONS

Parmi la large gamme de céramiques fabriquées, les produits de terre cuite sont les matériaux produits en très grande quantité en France. Les espèces argileuses et, plus généralement, les espèces minérales utilisées pour fabriquer ces matériaux sont assez proches de celles que contiennent les sédiments fins des retenues hydroélectriques.

Du fait de cette similarité, les spécifications techniques données dans cette partie concernent essentiellement les matières premières utilisées pour la fabrication de produits céramiques de type « terre cuite ».

4.2.1. La composition chimique et minéralogique des matières premières

La nature des argiles utilisées dans la fabrication des briques et tuiles dans l'industrie européenne de la céramique est extrêmement variée, et ceci en raison de la géologie. En effet, les argiles employées pour la fabrication de produits en terre cuite se retrouvent dans de nombreux étages géologiques. Le spectre stratigraphique est étendu et va du Cambrien à nos jours.

La plupart des argiles pour briques et tuiles sont d'origine sédimentaire. Elles ont été déposées sous des milieux sédimentaires très divers : sédiments sous-marins, alluviaux, fluviaux ou fluvio-glaciaires. Ces milieux sédimentaires variés influent sur la qualité minéralogique et sur la composition chimique des argiles. La composition minéralogique et chimique des argiles nécessaire à l'industrie céramique diffère considérablement entre les différents pays européens. Par ailleurs, au sein d'un même pays, des compositions très diverses peuvent être employées. Le

tableau 2-33 recense la variété des différentes compositions chimiques et minéralogiques des matières premières argileuses pour l'industrie européenne de la brique et de la tuile.

Tableau 2-33. Gammes des compositions chimiques et minéralogiques des matières premières argileuses utilisées dans l'industrie de la brique et de la tuile dans différents pays européens [Commission Européenne, 2007]

Pays	Autriche		France		Pays-Bas		Hongrie		Italie		Grèce		Danemark		Belgique		Royaume-Uni		Suisse		Allemagne		Gamme européenne dans 11 pays	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
<i>Comp. Chimique (% massique)</i>																								
S	0	1,3	0	0,5	<0,01	1,5	0,01	0,75	0,01	0,62	-	-	0,03	0,7	0,01	2,05	0,01	2	<0,01	0,5	0,01	2	0	2,05
F	0,05	0,1	0	0,15	0,02	0,1	0,02	0,1	0,04	0,13	-	-	0,03	0,08	0,02	0,07	0,02	0,09	0	0,08	0,03	0,16	0	0,16
CO ₂	-	-	0	14	<0,01	10	-	-	-	-	-	-	0	16	0,2	3,6	-	-	-	-	-	-	-	-
SiO ₂	50,3	70,8	35	80	53,2	80,6	42,2	63	33,1	74,4	6,85	75,42	49,5	66,3	62,6	74	40,5	74,5	35	77	50	70	33,05	80,6
Al ₂ O ₃ +TiO ₂	9,6	18,8	-	-	-	-	8,6	17,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	-	-	8	30	7,3	18,1	-	-	8,1	21	5,85	20,22	11,7	17,9	5,5	14	9	24,5	7	29	7	20	5,47	30
Fe ₂ O ₃	4,2	8,2	2	10	2	8,4	2,9	7,6	2,7	7,6	2,19	39,03	4,8	7,2	2,8	4,3	3,9	11,5	2,4	10	1	8	1	11,5
MgO	0,2	3,6	0	5	0,5	2,7	1,4	4,5	0,7	7,2	0,24	12,9	1,3	2,5	0,9	1,5	0,2	6,6	<1	5,2	0,5	3	0	7,21
CaO	0,6	15	0	18	0	8,7	2,1	15,2	0,2	26	0,91	25,2	0,3	12,9	0,3	5,6	0,2	17,5	3	23	0,5	15	0	26
Na ₂ O	0,4	1,7	0,1	1,5	0,2	1	0,2	1,2	0,2	14,1	0,37	3,06	0,8	0,8	0,4	1	0,2	0,6	0,2	1,5	0,3	1,2	0,1	14,13
K ₂ O	1,7	3	0,1	4,5	1,3	2,3	0,6	1,3	1,4	4,3	0,11	3,19	2,9	2,9	1,5	3	1,6	5,9	1	2,7	1	4	0,1	5,9
TiO ₂	-	-	0,3	2	0,5	1,3	-	-	0,5	1,1	0,2	1,22	0,6	0,8	0,5	0,8	0,6	1,6	0,3	1,5	0,5	2	0,3	2
CaCO ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,63	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MgCO ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5	31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MnO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,01	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Composition minéralogique (% massique)</i>																								
Quartz	21	49	0	70	39,5	71	16	32	16	54	-	-	35	50	34	65	10	55	13	55	15	60	0	71
Feldspath	5	15	rare		1	12	3	14	1	24	-	-	10	20	10	15	0	25	<1	33	1	25	0	33
Calcite	<2	26	0	30	-	-	0	14	1	41	-	-	<1	25	0	8	0	17	<1	37	1	25	0	41
Calcite+Dolomite	-	-	rare		0	20,5	0	24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pyrite	<2	<2	-	-	<0,01	2,8	0	2	-	-	-	-	0	-	0	2	0	7	0	0,7	0	2	0	7
Kaolinite	<3	10	en faible qté		5	21,5	2	13	1	26	-	-	5	15	1	5	0	40	5	26	3	40	0	40
Illite	25	60	dominante		7	20	4	21	5	42	-	-	10	20	3	15	0	40	2	40	10	50	0	60
Montmorillonite	2	25	en faible qté		3	29,5	3	18	2	34	-	-	5	20	5	43	0	10			10	50	0	50
Vermiculite	-	-	absente		7	20	2	4	-	-	-	-	-	-	-	-	0	15	2	16	-	-	0	20

Les compositions chimiques et minéralogiques du mélange argileux sont essentielles. Ces compositions influencent directement les propriétés de la pâte ainsi que bon nombre des propriétés du produit élaboré.

Le diagramme d'Augustinik (figure 2-25) représente le rapport des teneurs massiques en Al_2O_3 sur SiO_2 en fonction de la somme des teneurs $R_2O + RO + Fe_2O_3$ avec R_2O correspondant à $K_2O + Na_2O$ et RO correspondant à $CaO + MgO + MnO$.

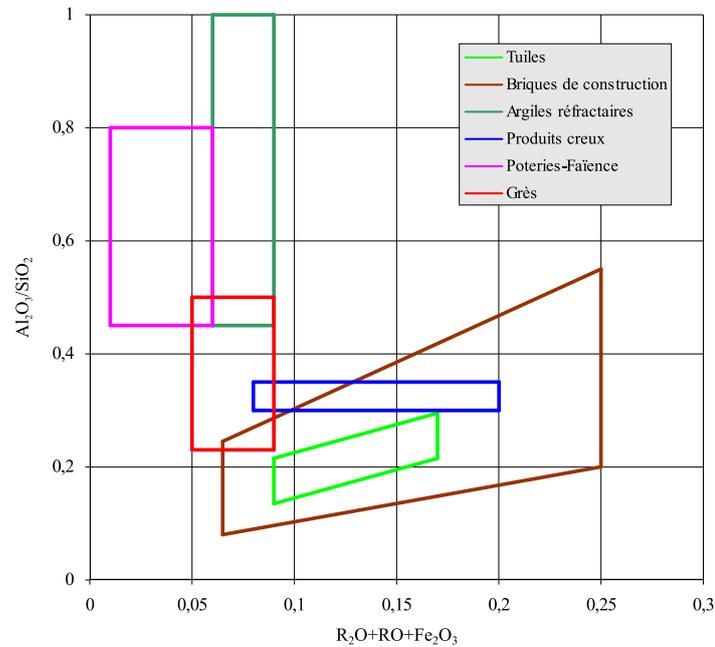


Figure 2-25. Diagramme d'Augustinik (CTMNC)

Le tableau 2-34 informe du rôle ou de l'influence que peuvent avoir les éléments chimiques du mélange argileux durant le procédé de fabrication ou sur les produits finaux.

Par ailleurs, la composition du mélange argileux va également avoir un effet sur l'aspect esthétique du produit final. Notamment sur la coloration des tessons qui peut varier du blanc jaunâtre au brun foncé pour la terre cuite. La variété de tonalité des tuiles présentes sur les toits illustre l'étendue de la palette disponible. Pour les fabricants, la maîtrise des couleurs est un enjeu commercial. Afin d'anticiper la couleur des tessons, des ratios sont utilisés. Ils prennent notamment en compte les rapports des teneurs en fer, calcium et aluminium.

Tableau 2-34. Influence des éléments chimiques du mélange argileux, d'après Kornmann [2009]

<i>Eléments</i>	<i>Origine et actions</i>
<i>Carbone</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Provient des matières organiques du sol - A un effet porosant - Réduit l'énergie à fournir pour la cuisson, - Produit une perte au feu, - Favorise le « cœur noir »
<i>Silice</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Provient des argiles et du quartz des dégraissants - Peut entraîner l'apparition de casses (fêles) au refroidissement si présent sous forme de quartz - Constitue l'élément principal du mélange
<i>Alumine</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Provient des argiles - Procure une bonne plasticité - Indique un taux de kaolinite important
<i>Oxydes et hydroxydes de fer</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Donnent la couleur rougeâtre après cuisson - Agissent comme un fondant grésant
<i>Chaux CaO et Magnésie MgO</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Proviennent majoritairement du calcaire - Pâlissent la couleur (du rouge, le tesson passe au jaune) - Améliorent les propriétés mécaniques - Produisent une forte perte au feu - Fournissent une forte porosité fine - Peuvent provoquer des éclatements localisés (point de chaux) si le calcaire est sous forme de grains de granulométrie grossière (>1mm)
<i>Oxydes alcalins (K₂O et Na₂O)</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Viennent des argiles et des dégraissants - Fondent à basse température - Agissent comme un fondant grésant
<i>Sulfates (gypse, anhydrite) et sulfures (pyrite, marcassite)</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Provoquent du SO₂ corrosif dans les fumées et des efflorescences dans les produits

4.2.2. Distribution granulométrique et plasticité

La distribution des granulométries des mélanges a une grande importance sur leurs propriétés. Les propriétés de bonne plasticité et de forte absorption d'eau sont liées à la fraction de granulométrie inférieure à 2 µm, qui représente la fraction quasi-exclusivement composée de minéraux argileux.

Une forte teneur en éléments inférieurs à 2 µm donnera une plasticité importante avec en contrepartie, une forte humidité de façonnage et des problèmes au séchage dus au fort retrait. Une faible proportion d'éléments inférieurs à 2 µm, amène au contraire une faible plasticité, une faible humidité de façonnage et un faible retrait.

Pour évaluer la plasticité d'une pâte, la détermination des limites d'Atterberg peut être réalisée. Il est ensuite possible de placer les caractéristiques de la pâte dans des diagrammes. Pour une utilisation comme matière première pour la terre cuite, Gippini [1969] définit un abaque afin d'obtenir un mélange avec les meilleures propriétés de moulage et de séchage, voir figure 2-26.

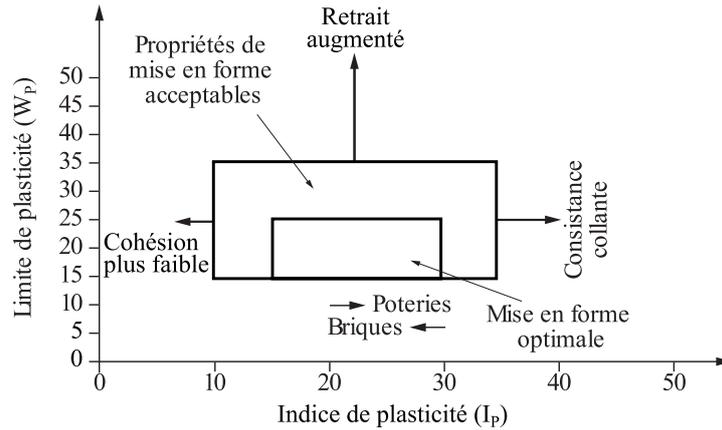


Figure 2-26. Classification des mélanges argileux d'après Gippini [1969]

Bien que le mélange argileux soit composé, pour majorité, de particules fines ($< 40 \mu\text{m}$), les particules plus grossières vont également avoir un intérêt technique puisqu'elles vont jouer le rôle de dégraissant. La fabrication de briques demande des granulométries plus grossières que les tuiles.

L'utilisation de sable de granulométrie 0,2 à 1 mm est commune pour jouer le rôle de dégraissant. Il faut cependant s'assurer que les sables soient constitués de silice quartzreuse avec éventuellement des feldspaths et micas. En effet, la présence de grains carbonatés supérieurs à $200 \mu\text{m}$ peut provoquer des points de chaux. Dans cette dernière situation, lorsqu'il s'agit d'un sable carbonaté, il convient de prévoir une étape de broyage en vue d'obtenir une granulométrie $< 200 \mu\text{m}$, et ainsi d'éviter le risque de point de chaux.

Le calcaire finement broyé est un ajout intéressant auquel on peut attribuer certains rôles [Kormann *et al.*, 2005] :

- il favorise la cristallisation de composés calciques à partir de phases amorphes,
- il modifie le retrait à la cuisson et permet en général d'augmenter les paliers de cuisson,
- il diminue la dilatation à l'humidité,
- il permet d'augmenter la porosité du tesson,
- et il en éclaircit la couleur.

4.2.3. Synthèse des caractéristiques des matières premières

Dans cette filière de valorisation, les spécifications ne concernent que les produits finis. Il n'apparaît que peu de recommandations sur les matières premières à utiliser. Les exigences proviennent principalement des usines de fabrication et des procédés qu'elles utilisent. Elles relèvent aussi du savoir-faire et des secrets de fabrication.

Pour avoir des éléments de comparaison, le tableau 2-35 présente des exemples de mélanges argileux utilisés dans des usines de terre cuite en France. On observe que les compositions des mélanges sont assez différentes selon l'approvisionnement en ressources minérales locales et selon les produits fabriqués.

Tableau 2-35. Exemples de compositions de mélanges argileux français d'après Kornmann et al. [2005]

Origine	Bourgogne	Marseille	Schiste Lyon	Sud de Paris	Loess Alsace	Lehm Nord	
Produit fabriqué	Tuile	Tuile	Boisseau	Brique apparente perforée	Brique perforée	Brique pleine	
Perte au feu (en %)	7	15	11	8	16	3	
SiO ₂ (en %)	61,5	42,6	51,5	58,9	50,9	77,8	
Al ₂ O ₃ (en %)	18,7	17,5	20,7	24	7,3	9,3	
TiO ₂ (en %)	0,9	0,7	1	1,3	0,5	0,8	
Fe ₂ O ₃ (en %)	8	6	6,2	5,4	2,9	4	
CaO (en %)	1	12	5	0,7	17	1,3	
MgO (en %)	1	2,6	1,9	0,4	2,6	0,8	
Na ₂ O (en %)	0,4	0,4	0,7	0,1	0,9	0,9	
K ₂ O (en %)	2	2,5	2,1	0,9	0,9	2	
Minéralogie	Illite, Mica, Quartz	Illite, Calcaire, Quartz	Illite, Quartz	Kaolinite, Quartz	Calcite, Illite	Quartz, Illite	
Répartition granulométrique (en %)	<2,5 μm	44	17	8	57	3	12
	2,5-10 μm	32	57	36	27	14	26
	10-40 μm	13	24	43	9	72	29
	>40 μm	11	1	13	7	10	33
Humidité de façonnage (en %)	25	26	25	27	20	24	
Porosité après cuisson à 950°C (%)	4,6	18,5	18,6	12	23,4	12,6	

Le tableau 2-36 énonce les limites courantes quant à la composition chimique des mélanges pour la fabrication de terre cuite. Il est donc possible de se référer à ces valeurs pour la conception d'un mélange argileux.

Tableau 2-36. Limites courantes pour la composition des mélanges argileux pour la fabrication de terre cuite [Kornmann, 2009]

	Limites courantes (en %)	
	Minimum	Maximum
Perte au feu	3	18
SiO ₂	35	80
Al ₂ O ₃	8	30
TiO ₂	0,3	2
Fe ₂ O ₃	2	10
CaO	0,5	18
MgO	0	5
Na ₂ O	0,1	1,5
K ₂ O	0,1	4,5
S	0	0,5
F	0	0,15
Corg	0,1	2

Notons que certains paramètres, tels que le soufre (S), le fluor (F) et le chlore (Cl) ont une signification environnementale. En effet, ce sont des éléments que l'on retrouve dans les fumées. Ces éléments sont aussi potentiellement corrosifs pour les installations industrielles. Ainsi, leurs teneurs

sont limitées en vue de contrôler et maîtriser les émissions gazeuses. Il faut surtout prendre en considération les parts potentiellement émissibles à la température de cuisson de ces polluants. Les valeurs moyennes rencontrées pour les mélanges argileux pour le SO_3 émissible, le F émissible et le Cl émissible sont respectivement de 0,03 à 0,1 %, 0,02 à 0,05 % et 0,01 à 0,03 %.

En conclusion, on constate que les compositions des mélanges réalisés se font d'une part en fonction de l'abondance des matières premières locales et de leurs caractéristiques et d'autre part, dépendent des procédés de fabrication de l'usine et des produits conçus. Les recommandations qui en découlent sont variables d'une usine à l'autre. En revanche, les spécifications concernant les produits finis sont, elles, multiples et clairement définies. Elles concernent les propriétés physiques, mécaniques, thermiques, hydriques...

Un paramètre, influençant pour toutes les propriétés des matériaux fabriqués est la porosité. Selon les types de produits, différentes porosités sont recherchées : faible porosité (< 20 %) pour les tuiles et briques apparentes, très forte porosité (> 40 %) pour les briques de structure afin de réduire la conductibilité thermique.

Ainsi, les recommandations diffèrent selon des types de produits et leur utilisation. Un contexte normatif encadre les caractéristiques des produits de terre cuite.

4.3. APPLICATION AUX SEDIMENTS

Les sédiments fins sont typiquement riches en minéraux argileux. Leur grande surface spécifique ainsi que les forces électrostatiques existantes sont des facteurs favorisant la présence de contaminants. La plupart des travaux de R&D menés sur la faisabilité de la valorisation en céramique sont pour une part à mettre en relation avec les contaminants.

En effet, Schouten et Rang [1989] montrent que les températures élevées typiques des procédés céramiques permettent à la fois la destruction des polluants organiques et le piégeage des principaux métaux lourds pouvant être présents dans les sédiments, le tout en valorisant la matière minérale dans un produit commercial utile.

La figure 2-27 décrit les étapes à mettre en œuvre pour la fabrication de produits céramiques tels que les briques, les tuiles ou les granulats d'argile expansée.

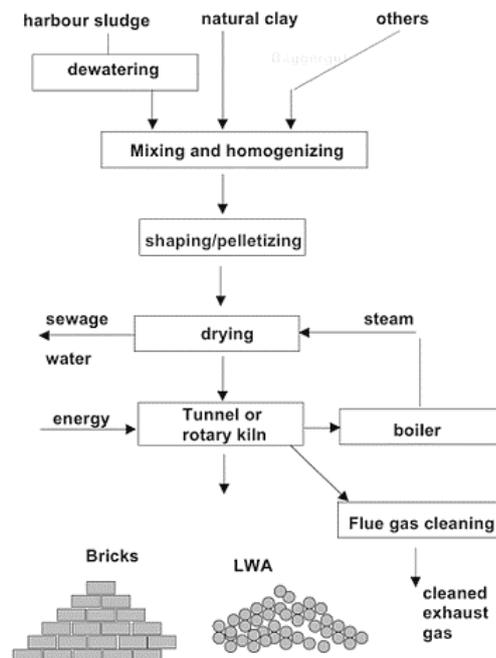


Figure 2-27. Représentation schématique de la production de briques et de granulats d'argile expansée [Hamer et Ulbricht dans Bortone et Palumbo, 2007]

4.3.1. Travaux de recherche et produits finalisés

Les sédiments, marins, estuariens, fluviaux, et même de barrages ont fait l'objet d'études pour une valorisation en matériaux céramiques. Certains de ces travaux ont abouti à des validations industrielles à taille réelle. Selon les caractéristiques des sédiments et le potentiel local d'exploitation des matériaux, cette filière de valorisation peut présager des perspectives intéressantes.

► *Fabrication de briques à partir de sédiments : l'expérience allemande*

Les travaux les plus anciens mais aussi les plus avancés ont été menés en Allemagne. Grâce à plus de 10 ans de recherche et de développement sur cette problématique, l'entreprise HZG (Hanseaten-stein Ziegelei GmbH) a mis au point un procédé utilisant des déblais de dragage comme substitution d'argiles dans la fabrication de briques [Hamer et Ulbricht dans Bortone et Palumbo, 2007].

Les sédiments utilisés provenaient de la plate-forme « METHA » qui avait pour rôle de traiter les matériaux issus des dragages du port de Hambourg [Detzner *et al.*, 1998]. Il était possible de substituer 70 % de l'argile utilisée par des sédiments dans la fabrication de briques [Hamer et Ulbricht dans Bortone et Palumbo, 2007].

Une usine pilote a été construite (figure 2-28). La mise en service a eu lieu en 1996 et l'exploitation pilote a duré 4 ans. Durant cette période, 30 000 tonnes de sédiments fins issus de l'usine METHA ont été utilisés.

Des essais pilotes à l'échelle industrielle ont aussi eu lieu, avec des sédiments du port de Brème [Hamer et Karius, 2002], de Venise et d'Anvers [PIANC, 2009], dans cette même usine. Les études réalisées sur des sédiments contaminés du port de Brème ont permis de montrer que la plupart des éléments traces métalliques étaient immobilisés après cuisson, et ce, dans différentes conditions [Karius et Hamer, 2001].



Figure 2-28. Usine pilote d'Hambourg pour la fabrication de briques à partir de matériaux dragués [PIANC, 2009]

Grâce à ce pilote permettant de réduire le volume de sédiments à éliminer, plusieurs enseignements positifs ont pu être tirés :

- la qualité des produits élaborés est similaire à celle des briques « traditionnelles »,
- l'argile adaptée pour la fabrication de produits céramiques est une ressource rare en Allemagne. Alors, valoriser des matériaux issus de dragage permet de préserver cette ressource,
- les contaminants pouvant être présents dans les sédiments sont détruits ou immobilisés dans les matrices produites durant le frittage des briques.

Cependant, des aspects négatifs sont à noter. Ils concernent l'acceptabilité sociale et le coût de la production. En effet, la perception des briques confectionnées à partir de sédiments est mauvaise car les matériaux élaborés conservent une image de déchet. Quant au coût évalué pour cette usine pilote, il est plus élevé par rapport au coût d'un stockage en chambre de dépôt confinée. Ceci est en partie lié à

l'investissement important (35 millions d'euros) qui a été réalisé pour construire l'usine. Pour des projets futurs, il convient d'accompagner ces actions de valorisation par une transparence du procédé industriel et de convaincre les populations que les matériaux élaborés sont aussi sûrs que des briques traditionnelles.

► **Fabrication de briques avec des sédiments marins : autres cas d'études**

En Espagne, trois sédiments marins contaminés de la baie de Santander et de l'estuaire de Suances ont été utilisés en vue d'être valorisés en matériaux céramiques dans le domaine de la construction. L'effet de la température de cuisson sur les propriétés des tessons utilisant des sédiments a été étudié. La température de frittage optimale est de 1125°C pour deux sédiments et 1150°C pour le troisième [Romero *et al.*, 2008, 2009a]. Les évolutions des phases minéralogiques et de la microstructure ayant lieu durant la cuisson ont été caractérisées [Romero *et al.*, 2009b]. Des essais de lixiviation ont montré que la cuisson diminuait la mobilité des polluants analysés à l'exception de l'arsenic [Alonso *et al.*, 2008]. Les auteurs concluent pour l'ensemble des travaux entrepris que :

- le risque associé à l'utilisation de céramique à base de sédiments contaminés peut être considéré comme faible,
- au regard des valeurs d'absorption d'eau et des propriétés mécaniques des tessons, les sédiments marins peuvent être utilisés comme matières premières, en substitution partielle d'argile, pour la fabrication de tuiles ou de briques.

Aux États-Unis, Yeboah *et al.* [2011] réalisent une étude, à l'échelle du laboratoire, relative à la confection de briques à partir de sédiments issus du dragage du port de Savannah, dans l'état de Géorgie. L'objectif était d'évaluer le potentiel de fabrication de briques à partir de ces sédiments portuaires. Les sédiments sont utilisés comme composant unique ou comme matériau de substitution à l'argile, à hauteur de 50 %. La caractérisation physique des sédiments inclut la répartition granulométrique, les limites d'Atterberg et la masse volumique des grains. La caractérisation chimique, repose sur l'utilisation de la fluorescence des rayons X (FX) pour la détermination des oxydes dans les sédiments. Une analyse par DRX est réalisée pour les phases cristallines et enfin, les métaux sont mesurés par analyse ICP. Des briques sont cuites à des températures allant de 900°C à 1100°C. Différents mélanges sont testés avec des teneurs en eau et des températures de cuisson différentes.

Pour aller plus loin, Mezencevova *et al.* [2012] étudient les propriétés physiques et mécaniques selon la norme américaine ASTM C62 « Standard Specification for Building Brick ». Ils remarquent que les retraits linéaires de séchage et de cuisson sont supérieurs à ce que l'on peut observer habituellement car les teneurs en eau sont plus importantes (de 32 à 74 %) que la normale (~19 % d'après les auteurs dans les usines utilisant un procédé d'extrusion similaire). Les auteurs émettent l'hypothèse que les résidus organiques sont à l'origine de cette forte demande en eau.

Les briques élaborées à partir des différents mélanges ont de bonnes propriétés pour le test d'absorption d'eau. En revanche, les résistances à la compression sont faibles (de 8,3 à 11,7 MPa) par rapport à la valeur moyenne de 10,3 MPa pour les briques de classe NW (la plus faible qualité) demandée dans la norme ASTM C62. Seules les briques issues du mélange réalisé avec 50 % de sédiment et 50 % d'argile et avec une cuisson à 1000°C fournit une résistance de 29,4 MPa, dépassant alors les 20,7 MPa requis pour être dans la meilleure classe, définit dans la norme (SW : exposed to severe weathering). Dans tous les cas, une cuisson à 1000°C aboutit aux meilleurs résultats comparativement aux températures de 900 et 950°C. Quant à la durabilité, les essais de gel-dégel réalisés sur le mélange avec 50 %_{sédiment} / 50 %_{argile} sont satisfaisants.

L'utilisation des sédiments des ports marocains de Tanger et Larache comme matière première pour la fabrication de briques en terre cuite est étudiée par Frar *et al.* [2014]. Dans un premier temps, les sédiments portuaires ont été caractérisés à l'aide d'analyses chimiques, physiques, minéralogiques et environnementales. Dans un second temps, l'étude a consisté en élaboration et la caractérisation d'échantillons de briques à base de sédiments à l'échelle du laboratoire.

La confection des éprouvettes de briques de forme cylindrique (30 mm de diamètre et d'une longueur de 30 mm) a été faite pour des mélanges de sédiments et d'argile locale avec différents taux de substitution : 0%, 20%, 40% et 70% à l'aide d'une extrudeuse (voir figure 2-29). Après avoir été séchées, les éprouvettes subissent une cuisson jusqu'à une température 930 °C en four tunnel d'une briqueterie pendant 48 heures.



Figure 2-29. Extrusion de briques-échantillons avec des sédiments portuaires marocains [Frar et al., 2014]

Les briques produites à l'échelle du laboratoire sont caractérisées avec la détermination des paramètres suivants : porosité, absorption d'eau, masse volumique apparente et résistance mécanique en compression simple. En complément, des essais de lixiviation sont réalisés.

Les briques confectionnées à partir du sédiment du port de Larache à l'échelle du laboratoire présentent des performances mécaniques analogues aux briques de référence jusqu'à un taux de substitution de 40 % ce qui n'est pas le cas pour le sédiment de Tanger. Les auteurs mettent en avant la quantité relativement importante des sédiments de Tanger (7 %) qui affecterait fortement les caractéristiques du produit final.

En Turquie, les travaux de Göl [2006] s'intéressent à l'utilisation des sédiments marins de la baie d'Izmir pour la production de tuiles. Différentes configurations sont testées. Au regard des caractéristiques des tuiles produites, il apparaît au final que les mélanges composés de 20 à 50 % de sédiments marins sont adaptés pour la fabrication de tuiles. Pour ces mélanges, la température de cuisson optimum a été identifiée à 1 100 °C.

► **Fabrication de briques : utilisation de sédiments traités avec Novosol®**

En France, les principaux travaux réalisés avec des sédiments en vue d'une utilisation comme matière première pour la terre cuite ont été menés à l'Ecole Centrale de Lille. Dans les différentes études, des sédiments marins [Lafhaj et al., 2007] et fluviaux [Lafhaj et al., 2008 ; Samara, 2007 ; Samara et al., 2009] ont été utilisés. Tous les sédiments ont subi un traitement préalable avec le procédé Novosol® qui comporte deux phases : une phosphatation et une calcination.

Dans un premier temps, il a été démontré par une étude en laboratoire que des sédiments traités pouvaient être utilisés. Une caractérisation physico-chimique a d'abord été effectuée sur les sédiments avec les essais suivants : granulométrie, surface spécifique, limites d'Atterberg, valeur au bleu, examen au MEB et teneur en MO par perte au feu. Une étude de faisabilité a ensuite été réalisée à l'échelle du laboratoire. Différents mélanges ont été préparés. Ils ont fait l'objet d'essais portant sur la granulométrie, la plasticité ainsi que leur aptitude à être façonnés, séchés et cuits. Les matériaux cuits ont ensuite subi des tests de qualification ayant pour but de déterminer les paramètres suivants : porosité, absorption d'eau, masse volumique apparente, résistance à la compression, résistance au gel-dégel, efflorescence, éclatement, dilatation conventionnelle à l'humidité et tests de lixivation.



Figure 2-30. Construction d'une habitation témoin [El Fgaier *et al.*, 2013]

Ensuite, des essais ont été réalisés en partenariat avec une usine de fabrication de terre cuite, à savoir l'usine de Templeuve (Briqueteries du Nord). Des briques ont été confectionnées avec des substitutions variables en sédiments. Les sédiments entrant dans la composition provenaient de plusieurs sites. Ils étaient eux-mêmes mélangés afin d'obtenir les caractéristiques les plus proches possibles des mélanges traditionnellement utilisés et un taux de substitution le plus important possible. Les briques obtenues possèdent des performances équivalentes, voire supérieures aux briques classiques.

Environ 15 000 briques perforées (220 x 220 x 60 mm) ont été produites. Une partie de ces matériaux a servi à la construction d'une petite maison témoin de 20 m², visible sur la figure 2-30 [El Fgaier *et al.*, 2013]. L'objectif principal de cette construction était de confirmer qu'il n'y avait pas de risque d'impact sur la qualité de l'air intérieur pour une habitation bâtie avec des briques utilisant une part de sédiments contaminés comme matière première.

► **Fabrication de briques : utilisation de sédiments de barrage**

Les sédiments de la retenue de Shi-men (Taiwan) ont fait l'objet de deux études [Huang *et al.*, 2001 ; Chiang *et al.*, 2008] pour une utilisation comme matière première dans la fabrication de briques. Des mélanges utilisant une majorité de sédiments sont réalisés. Ainsi, Huang *et al.* [2001] ont mélangé les sédiments de la retenue avec des boues issues d'installations de traitement des eaux. La part de sédiment dans le mélange varie de 80 à 100 % et la part de boue de 0 à 20 %. Pour Chiang *et al.* [2008], les sédiments sont mélangés avec une argile. Dans ce second cas, la teneur en sédiment dans le mélange varie aussi entre 80 et 100 % et la part d'argile dans la composition varie entre 0 et 20 %. Les mélanges sont soumis à plusieurs températures de cuisson. Les effets des différentes températures de cuisson sont évalués en déterminant le retrait à la cuisson, la porosité, l'absorption d'eau, la masse volume apparente et la résistance à la compression des produits cuits. Des essais de lixiviation ont également été menés. Dans les deux cas, les auteurs de ces études concluent à la faisabilité et la pertinence de cette filière de valorisation pour ces sédiments.

En Algérie, les apports solides générés par l'érosion des bassins versants comblent les barrages et réduisent de manière significative et inquiétante le volume des ressources en eau mobilisées par les barrages. Pour répondre au problème d'envasement posé, des études ont été lancées en vue de fabriquer des briques en utilisant les sédiments fins des retenues comme matière première. Remini [2006] caractérise les sédiments de 11 barrages et étudie plusieurs mélanges avec une argile « jaune ». Les caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques des sédiments bruts sont déterminées. Après avoir préparé les mélanges (broyage, mélange, homogénéisation, façonnage et séchage), ceux-ci sont soumis à une cuisson à 900°C pendant 32 heures et 30 minutes. Les effets de la proportion de sédiment sur les caractéristiques des matériaux cuits sont déterminés à l'aide d'analyses dimensionnelles (retrait au séchage et à la cuisson), physiques (porosité apparente, masse volumique absolue, capacité et coefficient d'absorption d'eau) et d'essais mécaniques. L'auteur conclut que les sédiments fins des retenues peuvent être utilisés par les briqueteries.

Benkadja *et al.* [2013] conduisent une étude portant sur l'utilisation des sédiments argileux de la retenue algérienne de K'sob pour la fabrication de briques. Des briques de dimensions 6x11x22 cm ont été confectionnées à partir d'un mélange comportant 65 % de sédiments du barrage, 25 % de sable de dunes et 10 % d'eau. La cuisson a été fixée à 800 °C durant 6 heures. Les caractéristiques physiques des briques pleines fabriquées sont données dans le tableau 2-37.

Tableau 2-37. Caractéristiques physiques des briques pleines fabriquées [Benkadja, 2013]

	Masse volumique (g/cm ³)	Résistance mécanique (MPa)	Absorption d'eau (%)
Valeurs moyennes	1,4	10,47	55,17

► Utilisation de sédiments fins pour la fabrication de granulats légers expansés (LWA)

Les granulats d'argile expansée – LWA pour *Light-Weight Aggregates* en anglais – sont des produits céramiques poreux présentant une texture alvéolaire [Commission Européenne, 2007]. Ce sont des granulats légers d'origine minérale ayant une masse volumique réelle¹ maximale de 2 000 kg/m³ ou une masse volumique en vrac maximale de 1 200 kg/m³.

Ils sont le plus souvent artificiels, confectionnés à partir d'argile ayant subi un traitement industriel impliquant une transformation thermique. En effet, le principe repose sur la cuisson rapide de granules d'une pâte argileuse « gonflante ». Pendant cette cuisson, la pâte va se vitrifier partiellement en emprisonnant de nombreux pores dus à la génération de gaz.

Les granulats d'argile expansée sont utilisés pour des applications dans différents domaines. Ils peuvent substituer des granulats naturels dans les bétons et mortiers en venant alléger le matériau et modifier les propriétés thermiques et acoustiques. Une utilisation dans les remblais légers drainants est également envisageable. Les caractéristiques de ce type de matériau pour ces usages sont encadrées par les normes NF EN 13055-1 et -2. D'autres applications existent. Elles concernent le jardinage ainsi que les cultures hydroponiques.

Coungny [1990] a proposé des critères relativement empiriques qui permettent d'évaluer le potentiel gonflant à la cuisson des pâtes argileuses. Certains éléments viennent compléter les recommandations proposées par Riley [1951] sur la composition chimique que le mélange argileux doit avoir (tableau 2-38). Ces spécifications portent avant tout sur les caractéristiques chimiques des matières premières.

Tableau 2-38. Composition chimique du mélange argileux idéal gonflant à la cuisson [Riley, 1951]

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ + FeO	CaO + MgO	K ₂ O + Na ₂ O
Composition adaptée (en %)	48 - 70	8 - 28	3 - 12	1 - 12	0,5 - 7

Mais les critères chimiques ont leurs limites puisqu'ils ne traduisent que partiellement l'importance de la minéralogie du mélange de départ. Or, la présence de certains minéraux argileux spécifiques est recherchée pour leur caractère gonflant à la cuisson, à savoir les argiles de type smectite / montmorillonite.

La présence de carbonates est, elle, néfaste : la décarbonatation produit bien du gaz mais de façon trop précoce (avant la vitrification) et la présence d'oxydes de Ca et/ou Mg en quantités significatives réduit la plage de température de vitrification.

Depuis un peu plus d'une dizaine d'années, la fabrication de granulats d'argile expansée à partir des sédiments issus des dragages est étudiée.

Parmi les premiers à envisager cette possibilité de valorisation, Hamer *et al.* [2003] évaluent l'utilisation d'un mélange avec plusieurs composants dont des sédiments portuaires représentant la

¹ Rapport entre la masse de matériau et le volume réel des grains (somme des volumes élémentaires des grains y compris le volume des pores fermés)

plus grande proportion. Ce mélange fait l'objet d'un brevet [Emmel, 2002]. Dans l'étude menée, les sédiments sont issus du port de Brème. Les compositions chimiques des différents constituants sont données dans le tableau 2-39.

Tableau 2-39. Composition chimique des composants entrant dans les mélanges de matière première et des mélanges utilisés pour la production de LWA (en % massique) [Hamer et al., 2003]

Composition chimique (en %)	Sédiments portuaires	Hydroxyde d'aluminium	Boue rouge	Terre de lavage	Verre recyclé	Co-produit de fabrication de laine	Mélange n°1	Mélange n°2
SiO ₂	63	4,7	17,4	35,8	70,1	30,7	45,4	50,2
Al ₂ O ₃	11	64,1	18,6	8,63	3,1	12,7	14,1	13,0
TiO ₂	0,58	0,37	3,35	0,52	0,35	0,88	0,76	0,76
Fe ₂ O ₃	8,3	6,54	37,3	2,14	1,0	6,10	10,0	9,4
CaO	1,8	2,24	4,05	1,3	9,8	5,9	3,6	4,06
MgO	0,9	<0,1	<0,1	7,4	2,17	2,6	2,2	2,15
K ₂ O	1,9	0,08	0,13	0,38	1,2	20,6	0,82	0,82
Na ₂ O	1,6	0,26	5,5	0,08	10,3	8,7	1,15	1,15
PF	9,6	20,3	9,26	43,2	1,0	10,4	17,0	15,9

Après préparation des matières premières, un four incliné électrique d'une longueur de 3,3 m pour un diamètre de 18 cm est utilisé pour la cuisson. Les granules restent 17 minutes dans le four et subissent une température maximale de 1150°C.

Les produits obtenus sont caractérisés selon les normes de construction allemande (DIN 4226 *Aggregates for concrete and mortar*) ainsi qu'à l'aide d'essais environnementaux de type lixiviation. Les résultats des différents essais étaient en conformité avec les spécifications techniques allemandes en matière de construction.

Pour une utilisation de sédiments fins dans la fabrication de granulats légers de type argile expansée, plusieurs travaux ont été menés sur des sédiments marins et continentaux taiwanais.

En effet, Wei *et al.* [2008] ont étudié un mélange avec différents ratios d'un sédiment portuaire (Taichung Harbour, Taiwan) avec un sédiment continental provenant d'une retenue. Des cuissons sont réalisées à 1 050, 1 100 et 1 150°C. Une pression de 3 000 ou 5 000 psi (~20,7 et 34,5 MPa) a été utilisée pour former les granules avant le procédé thermique. Le traitement thermique permet de réduire les éléments traces métalliques lixiviés. Ainsi, les produits finaux ont des concentrations en métaux après lixiviation inférieures aux seuils réglementaires en vigueur à Taiwan. Les granules obtenues, après une cuisson d'une durée de 18 minutes ont une masse volumique réelle inférieure à 2 000 kg/m³. La masse volumique la plus faible obtenue est de 490 kg/m³, et ce en utilisant une pression de 34,5 MPa et une cuisson à 1150°C.

Des sédiments provenant d'autres retenues de Taiwan ont également fait l'objet d'études de faisabilité en vue de produire et d'utiliser des granulats d'argile expansée [Wang, 2009 ; Tang *et al.*, 2011]. Les caractéristiques physiques des sédiments de la retenue de Shin-Men utilisés par Tang *et al.* [2011] sont données dans le tableau 2-40. Pour évaluer l'aptitude des sédiments dans cette filière, un diagramme ternaire basé sur la composition chimique, est utilisé (figure 2-31). La représentation est basée sur les proportions relatives de silice, alumine et oxydes fondants (Na₂O, K₂O, CaO, MgO, ...) traduisant d'une part le potentiel de formation d'une phase vitreuse visqueuse par fusion partielle et d'autre part le potentiel de génération de gaz assurant l'expansion. La minéralogie des sédiments et leur aptitude à la cuisson ont été caractérisées par analyses DRX et par ATD-ATG.

Tableau 2-40. Caractéristiques physiques des sédiments de la retenue de Shin-Men

Répartition granulométrique (%)				Masse volumique des grains (g/cm ³)	Limites d'Atterberg et indice de plasticité (%)		
Gravier	Sable	Silt	Argile		W _L	W _P	IP
0	1,4	38,5	60,1	2,74	40,4	25,6	14,8

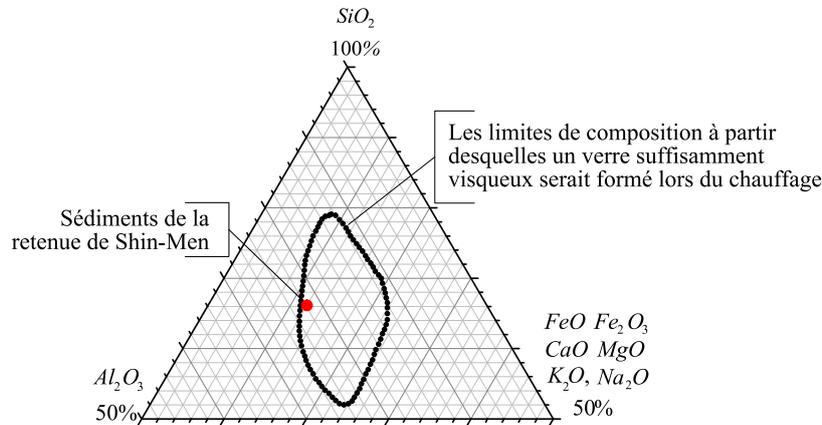


Figure 2-31. Composition chimique limite du mélange argileux gonflant à la cuisson [Tang et al., 2011]

Pour produire les granulats d'argile expansée, les sédiments subissent une décantation naturelle jusqu'à l'obtention d'une teneur en eau de l'ordre de 20-25 %. La matière première passe alors à la phase de pelletisation (ou granulation). Les granules sont ensuite envoyées vers un four pour leur cuisson. Pour ce faire, un four rotatif légèrement incliné, de 2 mètres de diamètre pour une longueur de 39 mètres, est utilisé. Trois phases vont alors avoir lieu. D'abord une phase de séchage (100-105°C) suivie d'une phase de pré-cuisson (500-700°C) et enfin une cuisson à haute température (1 100-1 200°C). Les granules subissent ensuite une trempe à l'air.

Les propriétés des granulats produits sont ensuite caractérisées selon les prescriptions techniques des normes ASTM C 330 et ASTM C 29 respectivement relatives à la masse volumique et à la demande en eau (water absorption). La résistance à l'écrasement a été réalisée selon la norme chinoise GB2842-81. L'ensemble des propriétés physiques et mécaniques obtenues sont meilleures que celles de granulats d'argile expansée commerciales.

Enfin, des bétons intégrant les granules ont été élaborés. Les caractéristiques de ces bétons ont été déterminées à l'état frais (essai d'affaissement) et à l'état durci (résistance à la compression, à la flexion, masse volumique et résistivité électrique). L'étude conclut que les sédiments fins issus des retenues peuvent constituer une bonne matière première. Les performances des granules ainsi que des matériaux les intégrant, présentent des propriétés supérieures aux spécifications techniques chinoises.

En France, un procédé a été mis au point avec pour objectif de valoriser des Matières Premières Secondaires (MPS), organiques et minérales, en granulats d'argile expansée pour des usages constructifs. Ce procédé, porté et commercialisé par la société vbc 3000, est protégé par un brevet [Straumann et al., 2005]. Un des principaux atouts du procédé est de permettre d'incorporer beaucoup de matière organique, idéalement le mélange comprend entre 10 et 50 %. Le procédé vbc 3000 présente également l'intérêt de pouvoir utiliser comme matrice argileuse des déchets et co-produits d'activités amont : limons de travaux publics, fines argileuses issues de l'extraction de ressources minérales et des sédiments issus d'opérations de dragage. De plus, les métaux lourds pouvant être présents dans les boues de STEP ou les sédiments argileux sont bloqués dans la matrice céramique.

Pour obtenir le produit final, la cuisson est réalisée en deux étapes successives. Après séchage, la première étape consiste à soumettre le granulat à une température de 500 à 750 °C avec une montée progressive en température de 3 à 6 heures. Cette étape permettant d'un part, d'éliminer les matières organiques et d'autre part, d'obtenir l'expansion en volume du granulat. La durée de cette première

étape est à adapter selon la teneur en matière organique. La seconde étape est réalisée à une température en 900°C et 1200°C selon la nature des minéraux argileux et les caractéristiques souhaitées des granulats. Cette seconde étape permet d'obtenir l'expansion finale du volume et la céramisation des granules. Après un refroidissement lent (100 à 300 °C/h), les produits obtenus peuvent être enrobés pour modifier leur couleur et/ou leur aspect esthétique.

En Belgique, le port d'Anvers a mis en service l'une des plus grandes installations de déshydratation destinée à accueillir les sédiments issus des dragages. Ce projet est appelé AMORAS pour « Antwerpse Mechanische Ontwatering, Recyclage en Applicatie van Slib ». Le site de mise en dépôt des sédiments déshydratés, pouvant recevoir 14,5 millions de tonnes de matière sèche, correspond à une exploitation sur 30 ans. Cependant, des travaux de recherche sont en cours pour valoriser les sédiments déshydratés provenant du port d'Anvers. Ce projet-fils, appelé VAMORAS, conduit des travaux de recherche sur 4 applications différentes pour valoriser les sédiments [Horckmans *et al.*, 2012]. Les pistes étudiées sont (i) la substitution d'argile pour la fabrication de granulats d'argile expansée et (ii) de briques, (iii) l'utilisation de sédiments comme filler dans les mortiers et bétons et (iv) l'emploi dans des travaux d'infrastructures (technique routière, matériau de remblayage de tranchée, ...). Pour chacune des filières, des partenariats industriels ont été créés pour développer les voies de valorisation. Dans le cas des granulats d'argile expansée, c'est la société Argex SA qui a réalisé des granulats à base de 10 % de sédiments.

Récemment, des travaux ont été menés dans le cadre du projet wallon SOLINDUS¹. Une plate-forme expérimentale à échelle semi-industrielle a été créée. Elle combine des techniques de séparation granulométrique en voie humide en vue de traiter les sédiments [Bréquel *et al.*, 2013]. La fraction la plus fine (< 15 µm) est typiquement riche en minéraux argileux et concentre l'essentiel des polluants du sédiment (organiques ou métalliques). Ainsi, grâce à la séparation granulométrique, le volume à traiter est réduit. Pour valoriser cette fraction fine produite par la plate-forme, la voie de valorisation investiguée est la filière céramique avec pour objectif la production de billes d'argile expansée [Flament *et al.*, 2013].

Les sédiments utilisés dans l'étude n'ont pas les caractéristiques d'une argile « gonflante » idéale. Les principaux défauts observés sont : la présence importante et néfaste de carbonates (calcite), peu ou pas de smectite parmi les minéraux argileux et un manque d'oxydes de fer. Ces caractéristiques sont fréquemment retrouvées dans les sédiments fins. Par ailleurs, les auteurs estiment qu'un mélange avec un $D_{60} < 10 \mu\text{m}$ aura une granulométrie appropriée.

Dans le cas qui est présenté, d'autres matériaux sont ajoutés en vue d'améliorer la composition du mélange, à savoir une fine de porphyre (diorite quartzifère) et une argile riche en lignite. Le but étant de « diluer » la calcite et d'apporter des minéraux argileux et feldspathiques. La minéralogie des constituants du mélange et des granules cuits, issue d'une analyse semi-quantitative par DRX, est donnée dans le tableau 2-41.

Après la préparation des mélanges, deux techniques de cuisson ont été comparées : la cuisson « traditionnelle » par chauffage radiatif et la cuisson par chauffage à micro-onde. De plus, plusieurs stratégies de cuisson ont été évaluées. Enfin, des essais de lixiviation ont été réalisés en adaptant la norme DIN 38414-S4 aux volumes d'échantillons disponibles.

Les travaux concluent qu'il est envisageable d'utiliser des sédiments fins. Dans ce cas, les sédiments étant d'abord triés sur la plate-forme de traitement. La cuisson par micro-ondes permet un contrôle précis de l'expansion des granules lorsque le mélange initial n'a pas une composition optimale. Par ailleurs, la cuisson micro-onde semble favoriser la mobilité des contaminants métalliques ou métalloïdes – notamment l'arsenic – alors qu'une cuisson traditionnelle permet de mieux immobiliser les éléments traces métalliques.

¹ *SOLutions INTégrées et DURables pour les Sédiments et matières assimilées*

Tableau 2-41. Analyse minéralogique des constituants du mélange et des granules cuits [Flament et al., 2013]

% massique estimé	Fines du sédiment La Praye < 15 µm	Filler porphyre < 1 mm	Argile avec lignite < 2,5 mm	Granules GR14 secs	Granules GR14 pré-cuits à 750°C	Granules GR14 Recuits à 1100°C	Granules GR14 µ-ondes 1100°C
<i>Silice</i>							
Quartz	> 30	10-20	> 30	> 30	> 30	> 30	> 30
Cristobalite	-	-	-	-	-	< 5	-
<i>Feldspaths</i>							
Albite	-	20-30	-	5-10	10-20	< 5	< 5
Microcline	-	10-20	5-10	5-10	10-20	-	-
Anorthite	-	-	-	-	-	< 5	< 5
Mullite	-	-	-	-	-	< 5	-
<i>Phyllosilicates</i>							
Muscovite	5-10	5-10	-	5-10	-	-	-
Chlorite	5-10	> 30	5-10	10-20	-	-	-
Illite	-	-	20-30	5-10	5-10	-	-
Kaolinite	-	-	10-20	< 5	-	-	-
<i>Carbonates</i>							
Calcite	10-20	-	-	< 5	-	-	-
<i>Autres</i>							
Gypse	-	-	< 5	< 5	-	-	-
Anhydrite	-	-	< 5	< 5	< 5	-	-
Butlerite	< 5	-	-	< 5	-	-	-
Rockbridgeite	< 5	-	-	< 5	-	-	-
Hématite	-	< 5	-	< 5	< 5	< 5	< 5
Carbone	-	-	< 5	< 5	-	-	-
Phase amorphe	20-30	-	-	5-10	< 5	> 30	> 30

4.3.2. Intérêts de la filière et des sédiments

Il vient d'être établi que les sédiments fins peuvent techniquement être intégrés et utilisés dans la filière céramique. Ces matériaux comme cette filière, présentent des avantages et des inconvénients.

Le secteur de la fabrication de briques et de tuiles en terre cuite est dominé par quatre groupes industriels d'envergure : Imerys, Terreal, Monier Group et Wienerberger. Ces industriels disposent d'ailleurs de positions fortes sur le marché international, à l'instar de Terreal, leader mondial sur le segment des tuiles plates ou de l'industriel Allemand Wienerberger, numéro un mondial de la brique en terre cuite.

Néanmoins, le marché des briques et des tuiles en terre cuite demeure également composé d'acteurs indépendants avec des sociétés comme les Briqueteries du Nord ou encore les Terres cuites de Bourgogne. Pour la plupart, ces intervenants disposent d'un rayon d'action géographiquement limité, les régions françaises se distinguant notamment par des styles de tuiles différents (taille, couleur, forme, inclinaison, etc.).

► Intérêts de la filière

En premier lieu, l'intérêt de la filière est d'utiliser un mélange de matière première avec une composition proche de celle des sédiments. Les sédiments des retenues hydroélectriques peuvent alors constituer une matière première alternative. Les sédiments fins provenant des dragages peuvent contribuer à l'élaboration de produits pouvant par exemple être utilisés comme matériau de construction et ainsi avoir une valeur économique importante.

De plus, selon les produits fabriqués, la teneur en eau importante des sédiments n'est pas un obstacle majeur. En effet, les procédés utilisés pour la fabrication de matériaux en terre cuite utilisent des pâtes plastiques.

Par ailleurs, l'industrie de la terre cuite est assez difficilement délocalisable dans le temps, et un nombre conséquent d'usines est présent sur le territoire français. Sur la figure 2-32, sont localisées les principales usines de fabrication de matériaux en terre cuite ainsi que les ouvrages hydroélectriques exploités par EDF.

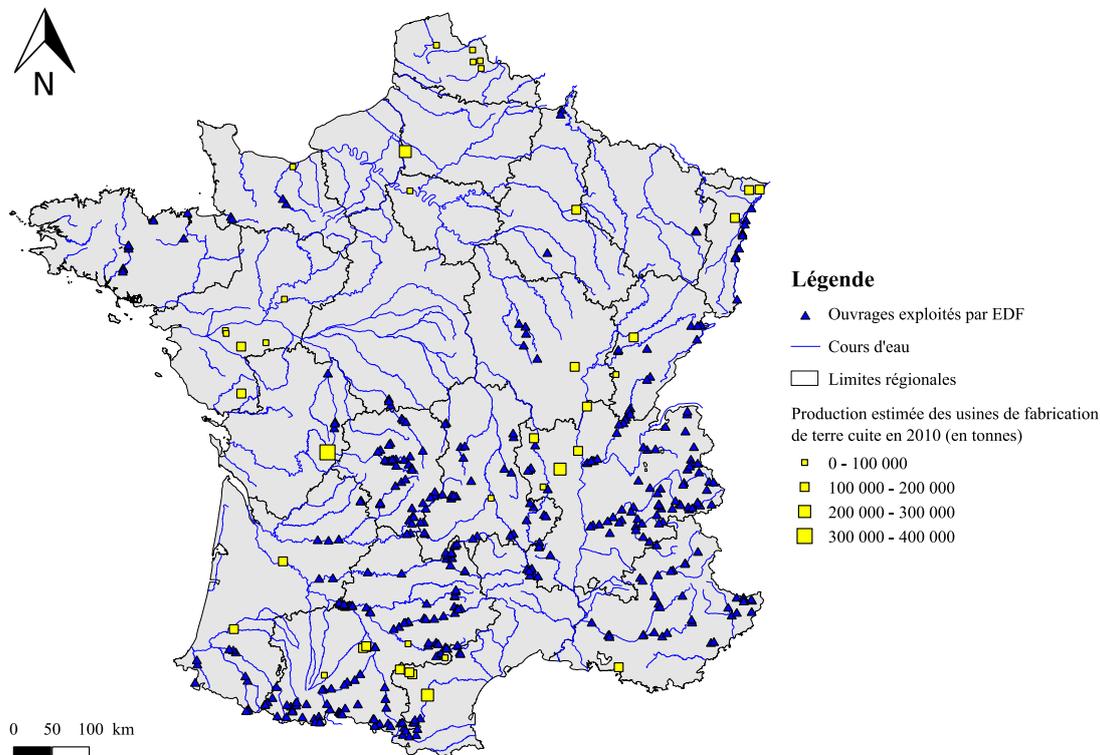


Figure 2-32. Localisation comparée des principaux sites industriels de production de terre cuite et des ouvrages hydroélectriques exploités par EDF (données : CTMNC ; EDF)

Les différentes usines possèdent toutes des carrières à proximité de leur site de production. Comme pour le cas des cimenteries, il est envisageable d'utiliser une partie de la carrière pour déposer les sédiments issus de dragage en vue de constituer un stock tampon qui peut ensuite être utilisé au cours du temps.

Un autre point important concerne le procédé thermique. Il peut constituer une action de traitement de la pollution éventuellement présente dans certains sédiments. La température de cuisson aura pour effet d'éliminer les composés traces organiques ou d'inertiser les éléments traces métalliques pouvant être présents. Mais le coût du procédé thermique est un inconvénient à cette filière.

Enfin, dans la fabrication de produits de type terre cuite, trois éléments du processus sont dépendants, à savoir : (i) les caractéristiques des matières premières, (ii) le procédé de fabrication et (iii) les caractéristiques du produit final. Si un de ces éléments varie, le second devra varier également si l'on ne souhaite pas modifier le troisième.

Par exemple, avec des matières premières de caractéristiques identiques, on peut faire évoluer le procédé de fabrication en vue d'obtenir un produit final avec des caractéristiques différentes. Les usines sont donc équipées de sorte à avoir un procédé adapté aux matières premières locales et à un ou plusieurs cahiers des charges précisant les caractéristiques des produits finis.

Dans le cas d'une utilisation de sédiments, les caractéristiques des matières premières seront modifiées. Il faudra s'assurer qu'il est possible d'adapter le processus de fabrication de manière à obtenir des matériaux avec des caractéristiques similaires à ceux traditionnellement produits par l'usine (aspect, résistances mécaniques, etc). Si ce n'est pas le cas, il est possible d'innover et concevoir un « nouveau produit » qui devra se trouver une place sur le marché.

► *Intérêts des sédiments*

Le premier point d'intérêt des sédiments fins, argilo-limoneux, est leur composition minéralogique. Les sédiments fins des retenues hydroélectriques sont pourvus des mêmes minéraux que ceux qui composent les pâtes des céramiques silicatées. En effet, on peut retrouver plusieurs espèces argileuses, base de la matière première, en quantité importante. Il y a également des proportions significatives en feldspaths qui apportent des oxydes fondants, de la silice sous forme de quartz qui joue le rôle de dégraissant, et des carbonates sous la forme de calcaire fin qui ont aussi une influence forte sur le comportement des pâtes céramiques (effet dégraissant, action sur la couleur, retrait à la cuisson, augmentation de la porosité). Ainsi, il peut être possible de trouver des sédiments fins de certains barrages qui possèdent toutes les caractéristiques d'une matière première utilisée dans l'industrie de la terre cuite ou tout du moins, qui s'en approchent fortement.

Un deuxième avantage est lié à l'aspect continu de la sédimentation. En effet, la sédimentation dans les retenues est, bien que maîtrisée, un phénomène inéluctable. Tous les barrages la subissent plus ou moins. Cet apport régulier de matière confère aux sédiments un caractère de gisement renouvelable. Cette source de matière première peut être considérée comme pérenne pour son utilisation dans le temps. Concevoir des mélanges intégrant des matériaux de ce gisement alternatif permet de limiter l'extraction de matières premières traditionnelles. Dans ce cas, il pourrait y avoir une double économie : environnementale et financière. L'économie environnementale est liée au fait que les matériaux issus de carrières seraient utilisés en moins grande quantité au profit de matériaux alternatifs. L'augmentation de la superficie de la carrière en serait alors tout aussi limitée, ainsi que les impacts inhérents à cette activité d'extraction. De plus, cette action profiterait d'autant plus à l'environnement en permettant la valorisation d'un matériau ayant le statut de déchets. Il peut être considéré que les sédiments soient mis gratuitement à disposition de l'usine de terre cuite, une économie financière liée à la diminution de l'exploitation de la carrière serait réalisée.

Cependant, des réticences peuvent être émises. Elles viennent avant tout de la méconnaissance des acteurs de cette filière vis-à-vis de cette ressource potentielle de matière première. En effet, son aptitude à être utilisée peut être mise en doute. Ensuite, la question de l'homogénéité se pose : est-ce que le gisement va présenter les mêmes caractéristiques dans le temps ? Enfin, les déblais de dragage souffrent encore d'une image négative.

Il est donc essentiel de bien caractériser les sédiments pour une valorisation matière en terre cuite et surtout qualifier la source renouvelable de matière première et permettre des retours d'expériences sur les essais pilotes pour rendre pérenne les fabrications.

4.4. CONCLUSION

L'industrie céramique est très consommatrice d'argiles qui constituent sa matière première. Ainsi, la fraction argileuse présente dans les sédiments fins lui procure de réelles opportunités de valorisation en terre cuite. De plus, le contexte actuel étant très contraignant pour étendre les carrières, les matières premières argileuses deviendront de plus en plus difficilement accessibles. Les sédiments fins peuvent constituer une ressource naturelle alternative et renouvelable à condition d'assurer une quantité d'approvisionnement suffisante et une qualité constante dans le temps.

Dans cette filière, les spécifications techniques portent sur les produits finis. Les exigences sur les matières premières pourraient provenir des usines de fabrication. Chaque usine ayant un savoir-faire et des secrets de fabrication. Les recommandations seraient notamment dépendantes (i) des caractéristiques des matières premières locales traditionnellement utilisées, (ii) des procédés de fabrication mis en œuvre et (iii) des cahiers des charges des produits élaborés.

Pour évaluer la faisabilité de valorisation des sédiments fins comme matière première pour la fabrication de produits en terre cuite, il faut porter un intérêt à la nature des minéraux de ces sédiments. La composition chimique en découle. De plus, rappelons que chacun des minéraux principaux de la matière première pour la fabrication de terre cuite – argile, feldspaths, silice – va avoir une influence spécifique sur la rhéologie de la pâte, le développement de microstructures et la formation de phases pendant le traitement thermique. D'où, l'importance d'une bonne connaissance de la minéralogie des sédiments pouvant être gérés à terre.

S'agissant au final de mélanges, il est difficile de fixer des limites sur les grandeurs de ces différents paramètres caractérisant les sédiments bruts. Les différentes propriétés pouvant être modifiées avec l'ajout d'autres matières premières. Au regard de la phase de caractérisation, pour qu'une utilisation de sédiments soit envisageable, il faut garder à l'esprit qu'une étude plus importante est nécessaire. Cette étude technique devra notamment caractériser les produits cuits. Ces derniers étant pour la plupart encadrés par des normes, les caractéristiques techniques requises sont facilement identifiables.

Enfin, l'étude bibliographique montre qu'il est possible de mettre au point des produits céramiques intégrant des sédiments. Les valorisations les plus investiguées jusqu'à présent sont les produits de terre cuite de type brique ou encore de type granulat d'argile expansée. Au regard de ces études, une utilisation de sédiments fins est donc techniquement réalisable.

5. LA FILIERE « AGRONOMIQUE »

Sous réserve des principes d'innocuité et d'efficacité agronomique, certains déchets agricoles, urbains ou industriels sont valorisés en agriculture. Ils peuvent en effet améliorer la qualité des sols appauvris par l'exploitation agricole. Ils peuvent également présenter un intérêt en reconstruction de sols : aménagement routier, aménagement paysager urbain, réhabilitation de friche industrielle.

Deux principes fondamentaux régissent la valorisation agronomique et plus généralement l'utilisation des matières fertilisantes et des supports de culture :

- les matières valorisées doivent présenter un intérêt agronomique,
- les matières valorisées doivent être inoffensives pour l'homme, les végétaux, les animaux et l'environnement, dans les conditions d'emploi prescrites et normales.

A ces deux principes s'ajoute aussi la capacité du sol à recevoir cet apport de matières fertilisantes : l'apport doit répondre à un besoin du sol et respecter des limites d'assimilation permettant d'éviter ou limiter les impacts, sur les eaux souterraines en particulier.

5.1. DESCRIPTION

Les déchets sont valorisables en agriculture, sous certaines conditions :

- soient ils sont « transformés » à l'aide d'un traitement (comme le compostage) ou directement utilisés en matières fertilisantes tout en satisfaisant une norme ou une homologation qui définit des critères de qualité et d'innocuité. Dans ce cas, ils sortent du cadre des déchets et accèdent au statut de produits : compost, engrais ou amendements organiques. D'un point de vue réglementaire, c'est l'utilisateur qui est responsable de l'emploi du produit.
- soient ils conservent un statut de déchet. Ils sont alors autorisés à être utilisés au cas par cas. Sous réserve d'innocuité et d'efficacité agronomique, leur épandage est soumis à autorisation ou déclaration ce qui nécessite un plan d'épandage et un suivi agronomique annuel. Les critères d'innocuité sont repris dans les textes réglementaires.

5.1.1. Propriétés du sol et des matières fertilisantes

► *Fertilité et fonctions du sol*

Le sol est un milieu complexe. Il a de multiples fonctions et peut être observé de multiples façons, en fonction des objectifs qu'on lui donne.

La définition de la « fertilité du sol » a évolué dans le temps, passant d'une notion de valeur à une notion d'état, en prenant en compte la complexité du sol et ses fonctions multiples : production alimentaire, production de biomasse, stockage de carbone, réservoir d'eau, réservoir de biodiversité, filtre pour la qualité de l'eau, ... [Stengel *et al.*, 2009].

La fertilité d'un sol dépend d'un nombre conséquent de paramètres qui sont interdépendants. Cette fertilité est définie par trois composantes essentielles: physique, chimique et biologique. C'est un équilibre optimal des composantes du sol qui permet un jugement global de valeur sur la qualité d'un milieu.

D'un point de vue agronomique, un sol doit permettre l'ancrage du système racinaire de la plante et jouer aussi le rôle de support. Siège du développement des racines, il doit présenter des caractéristiques favorables à leur activité métabolique. Enfin, le sol est à la base de l'alimentation hydrique et minérale des plantes.

Les principales fonctions du sol et les caractéristiques agronomiques associées sont présentées dans le tableau 2-42.

Tableau 2-42. Fonctions du sol et paramètres agronomiques associés [Théry et al., 2013]

Fonctions du sol	Paramètres du sol associés
Ancrage des racines	Densité apparente, résistance à la pénétration,
Circulation de l'air et de l'eau	Porosité, capacité de rétention en eau,
Eléments nutritifs pour la plante	Teneurs en : N, P, K, Ca, Mg, oligo-éléments,
Ne pas présenter de phytotoxicité	CEC et MO (réserves en éléments nutritifs), Teneurs en ETM et CTO, conductivité, pH.

► Description des principaux paramètres de caractérisation agronomique

Pour caractériser un produit, un déchet, un sol ou toute autre matière fertilisante et en évaluer ses intérêts et inconvénients au regard d'un usage agronomique, plusieurs caractéristiques sont à déterminer. Selon le type d'usage, certains paramètres vont avoir une importance variable. Les principaux paramètres à prendre en compte et leur rôle sont décrits ci-après.

- La composition granulométrique

Les particules peuvent être classées selon leur taille. En agronomie, on parlera également de texture. La classification des textures est usuellement représentée à l'aide d'un triangle, dit « triangle des textures » (figure 2-33), selon le pourcentage respectif de sable, de limon et d'argile.

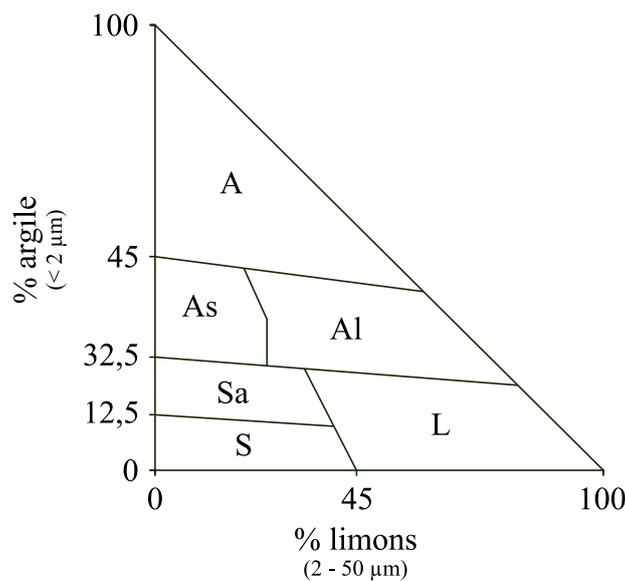


Figure 2-33. Diagramme simplifié des textures du GEPPA¹ (1963)[NF U44-551 - AFNOR, 2002]

Groupes de classes de texture : A : Argileuses – Al : Argilo-limoneuses – As : Argilo-sableuses – L : Limoneuses – Sa : Sablo-argileuses – S : Sableuses

La texture informe sur le potentiel de fertilité d'un sol, d'un point de vue physique. D'autres propriétés physiques vont fortement dépendre de la texture : porosité, aération, perméabilité, rétention en eau... Ces propriétés étant également influencées par la structure que va adopter le sol. La texture participe aussi au calcul de certains indices (stabilité structurale, battance, ...)

- La Matière Organique (MO)

Le terme matière organique regroupe une somme importante et hétérogène de substances et composés carbonés d'origine végétale et animale : des débris en cours de décomposition issus de la

¹ GEPPA : Groupe d'Etude des Problèmes de Pédologie Appliquée

végétation (feuilles, racines, herbe) qui constituent la litière du sol, jusqu'à l'humus stable solidement fixé aux particules d'argile qui garantit la pérennité structurale.

La MO a un rôle primordial dans le comportement global du sol. Vis-à-vis de la qualité physique du sol, elle est le liant des particules minérales (argiles, limons et sables) à travers le complexe argilo-humique, et de ce fait, participe à la qualité de la structure du sol et à sa stabilité au regard des agressions extérieures (pluie, compaction entraînée par le passage d'engins agricoles...). La MO assure aussi le stockage et la mise à disposition pour la plante, par minéralisation, des éléments dont elle a besoin. Enfin, la MO du sol stimule l'activité biologique de celui-ci.

Pour les sols, il est admis que 58% de la matière organique est composée de carbone organique. La relation suivante est utilisée pour passer de la concentration en carbone organique (Corg) à la teneur en MO :

$$MO = 1,72 \times Corg \quad \text{Eq. 12}$$

Le premier indicateur de la qualité biologique du sol est le rapport C/N. Il s'agit d'un indicateur simple qui peut être complété par des indices plus complexes, comme l'Indice de Stabilité Biochimique (ISB) et l'Indice d'Activité Biologique (IAB) qui sont notamment utilisés pour caractériser des amendements organiques ou des composts.

- *Le complexe argilo-humique*

Le complexe argilo-humique est ainsi un véritable réservoir d'éléments nutritifs pour la culture. Parmi les différents éléments minéraux en présence, les argiles s'associent à la matière organique du sol pour former, sous l'action stabilisatrice du calcium, le complexe argilo-humique. La structure en feuillet des argiles confère au complexe une puissante charge négative. Une certaine quantité de cations libres de la solution du sol peut alors s'y fixer (Ca^{2+} , K^+ , H^+ , Na^{2+} etc.).

Pour apprécier la taille de ce réservoir, la Capacité d'Echange Cationique est déterminée. La CEC varie en fonction des espèces argileuses en présence et leur quantité, ainsi que de la teneur et de la qualité de la MO.

- *Le calcaire*

Le calcaire est une particule minérale naturelle du sol constituée presque exclusivement de carbonate de calcium ($CaCO_3$), qui provient du matériau parental (roche). Il peut aussi être apporté par l'homme sous forme d'amendements minéraux basiques.

Le calcaire est un composant basique qui intervient sur l'ensemble des propriétés physiques (structure), chimiques (biodisponibilité des éléments minéraux) et biologiques (fonctionnement de la biomasse microbienne) des sols. Il libère ses ions calcium (Ca^{2+}) qui interviennent sur certaines propriétés physiques comme la floculation des argiles favorisant la stabilité des agrégats. L'activité du calcaire est conditionnée par sa solubilité, elle-même dépendante de la dureté et de la grosseur de ses particules. Ces propriétés peuvent être déterminées par analyse du calcaire total et actif.

- *Le potentiel nutritif*

Pour apprécier le potentiel nutritif des sols et des matières fertilisantes, les éléments minéraux sont analysés. Ces éléments, nécessaires aux plantes, sont fixés plus ou moins fortement sur le complexe argilo-humique ou sont présents dans la solution du sol. Les éléments majeurs, dont les besoins des plantes sont élevés, sont : N, P_2O_5 , K_2O , CaO, MgO, SO_3 . Les trois premiers étant les principaux éléments fertilisants en agriculture.

Des éléments mineurs, appelés oligo-éléments, sont aussi essentiels au développement des plantes mais en quantité très faible. En effet, un manque d'un de ces éléments peut entraîner des troubles végétatifs, tandis qu'un excès peut être nocif, voire toxique. Les oligo-éléments couramment analysés sont : Fe, Cu, Mn, Mo, B, Zn.

► *Caractéristiques des matières fertilisantes*

Une matière fertilisante est un produit dont l'emploi est destiné à assurer ou à améliorer la nutrition des végétaux, ainsi que les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols.

L'épandage sur les sols agricoles concerne plusieurs centaines de millions de tonnes de matières fertilisantes diverses. Ces matières entretiennent la fertilité des sols quand elles sont correctement

caractérisées et appliquées, ce qui diminue les besoins d'engrais commerciaux. Leur apport repose sur des bases scientifiques et techniques assez bien connues.

Les produits traditionnellement épandus en agriculture sont les déjections animales (sous forme de fumiers, de lisiers, de fientes, etc), les sous-produits et déchets provenant d'industriels (*i.e.* les boues de papeterie) ou issus des collectivités et des ménages tels que les boues d'épuration municipales ou différents types de composts.

Le tableau 2-43, le tableau 2-44, et le tableau 2-45 informent des caractéristiques que possèdent typiquement les produits et déchets couramment utilisés.

Tableau 2-43. Composition et caractéristiques des fumiers et fientes [ADEME, 2001]

Paramètres	MS	MO	pH	Rapport C/N	N_{total}	P₂O₅	K₂O	Chaux CaO	MgO
Unité	% du produit brut	% de la MS				kg/t de MS			
Vaches laitières	25	72	7,8	14	22	14	32	20	8
Porcs	21	76,2	6,0	18	31	31	34	29	12
Poules pondeuses	44	81,8	7	4	57	50	30	67	18,6

Tableau 2-44. Composition et caractéristiques des boues d'origine urbaine [ADEME, 2001]

Paramètres	MS	MO	pH	Rapport C/N	N_{total}	P₂O₅	K₂O	Chaux CaO	MgO
Unité	% du produit brut	% de la MS				kg/t brute			
Boue liquide	2 - 7	65 - 70	6,5 - 7	4 - 5	2 - 4	2 - 3	0,9	1 - 3	0,5
Boue pâteuse	16 - 22	50 - 70	7 - 8	5 - 6	8 - 12	6 - 9	0,8	5 - 15	1 - 2
Boue sèche	90 - 95	50 - 70	6 - 8	4 - 6	30 - 50	50 - 70	5	40 - 60	5
Boue chaulée	25 - 40	30 - 50	9 - 12	8 - 11	6 - 9	6 - 10	1	60 - 90	1 - 2
Boue compostée	40 - 60	80 - 90	6 - 7	15 - 25	5 - 9	6 - 8	1 - 2	10 - 30	1 - 2

Tableau 2-45. Composition et caractéristiques de trois types de composts à trois mois de compostage [ADEME, 2001]

Paramètres	MS	MO	pH	Rapport C/N	N_{total}	P₂O₅	K₂O	Chaux CaO	MgO
Unité	% du produit brut	% de la MS				kg/t de MS			
Compost de déchets verts	53,5	46,9	7,99	18,01	15,4	7,3	13,6	20 - 30	4 - 5
Compost de biodéchets	-	38,7	8,13	15,01	15,5	9,4	14,9	70 - 80	4 - 5
Compost d'ordures ménagères résiduelles	58,7	42,6	7,78	18,64	12,5	6,9	6,5	60	12 - 13

Les caractéristiques diverses de ces produits et déchets leurs procurent des rôles différents. Ainsi, leur utilisation est établie en fonction des besoins des sols et des cultures.

5.1.2. Objectifs de la valorisation agronomique

En ce qui concerne un apport de matière au sol, plusieurs objectifs agronomiques peuvent être mis en avant :

- un effet dit fertilisant (ou effet engrais) par l'apport de nutriments pour les plantes cultivées, que ce soit sous forme de matières minérales (azote, phosphore, potassium, ...) ou de matières organiques dont la dégradation restitue ces éléments minéraux nécessaires aux plantes sur le plus long terme,
- un effet amendant par l'amélioration des sols ou supports de cultures par leurs propriétés physiques (cohésion, porosité, ...) et/ou chimiques (pH, capacité d'échange cationique, ...) et/ou biologiques (biomasse microbienne, azote minéralisable ...),
- une réhabilitation écologique d'espaces perturbés (anciennes friches industrielles et de déconstruction récente, terrils ou zones nouvellement aménagées) qui nécessite de reconstituer un substrat favorable à une revégétalisation.

5.1.3. Définitions

Pour une bonne compréhension des différentes dénominations utilisées par la suite, il est important de rappeler les principales définitions inhérentes à la valorisation agronomique.

Les supports de culture sont des produits destinés à servir de support physique ou substrat aux végétaux, comme par exemple, la terre végétale, les tourbes, les terreaux, les paillages et la terre de bruyère.

Les matières fertilisantes sont un terme générique recouvrant engrais et amendements.

Les engrais ont pour fonction principale [JOUE, 2003] d'apporter des substances minérales nutritives aux plantes. En fonction de l'importance des besoins en ces éléments pour les plantes, on distingue :

- des éléments « majeurs » : azote, phosphore, potassium (N-P-K),
- des éléments « secondaires » : calcium, magnésium, sodium et soufre,
- des oligo-éléments : bore, cobalt, cuivre, fer, manganèse, molybdène et zinc qui sont essentiels à la croissance des plantes, mais en faibles quantités.

Les amendements ont pour fonction principale d'améliorer les propriétés physiques, chimiques ou biologiques des sols. On distingue alors :

- les amendements basiques, comme la chaux agricole, destinés à entretenir ou corriger le pH du sol. Ils réduisent aussi la battance des sols limoneux et améliorent la structure du sol,
- les amendements organiques destinés à améliorer l'aération et la cohésion du sol ainsi que sa capacité à retenir les éléments fertilisants. Ils sont utilisés d'une part pour entretenir ou corriger la teneur du sol en matières organiques stables (humus). Et d'autre part, ils en améliorent ses propriétés biologiques, physiques et chimiques (structure, perméabilité, activité des micro-organismes, augmentation de la rétention des nutriments,...). La réglementation précise que leur teneur en azote, ou phosphore (P_2O_5), ou potassium (K_2O) ne doit pas dépasser 3 % du produit brut. Si ces teneurs sont dépassées, on parlera d'amendement enrichi ou d'engrais organique. Parmi les principaux amendements organiques, on peut citer : les fumiers, les composts, ...

Enfin, le compostage est un procédé biologique aérobie avec montée en température permettant l'hygiénisation et la stabilisation par dégradation-réorganisation de la matière organique (oxydation biologique avec dégagement de chaleur) conduisant à l'obtention d'un compost. Lorsque sa qualité satisfait à un ensemble de critères normalisés, il peut être mis sur le marché comme amendement organique. On obtient un compost-produit répondant aux normes NF U 44-051 ou NF U 44-095 selon qu'il contienne ou non des boues d'épuration. Sinon, à condition qu'il présente un intérêt agronomique, il peut être utilisé dans le cadre d'un plan d'épandage selon les termes de l'arrêté du 8 janvier 1998 [JORF, 1998a] qui définit des critères plus souples (compost-déchet).

Le tableau 2-46 récapitule les principales définitions qui sont énoncées dans les normes.

Tableau 2-46. Définitions normalisées des principales dénominations

Termes	Définitions normalisées
<i>Matières fertilisantes</i>	<i>Elles comprennent les engrais, les amendements et, d'une manière générale, tous les produits dont l'emploi est destiné à assurer ou améliorer la nutrition des végétaux ainsi que les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols (article L 255-1 du code rural).</i>
<i>Engrais</i>	<i>Matière fertilisante dont la fonction principale est d'apporter aux plantes des éléments directement utiles à leur nutrition. Des seuils minimaux sont définis pour les éléments N, P et K (NF U 42-001 - Engrais)</i>
<i>Amendement</i>	<i>Matière fertilisante apportée aux sols et dont la fonction principale est d'améliorer leurs propriétés physiques et/ou chimiques et/ou biologiques (ISO 8157).</i>
<i>Amendement minéral basique</i>	<i>Matières fertilisantes contenant des carbonates, des oxydes, des hydroxydes et/ou des silicates, généralement associées à du calcium et/ou du magnésium, et destinées principalement à maintenir ou à élever le pH du sol et à en améliorer les propriétés (NF U 44-001 « Amendements calciques et/ou magnésiens », NF U 44-203/A1 « Amendements calciques et/ou magnésiens avec engrais »).</i>
<i>Amendement organique</i>	<i>Matières fertilisantes composées principalement de combinaisons carbonées d'origine végétale ou animale et végétale en mélange, destinées à l'entretien ou à la reconstitution du stock de matière organique du sol et à l'amélioration de ses propriétés physiques et/ou chimiques et/ou biologiques (NF U 44-051 « Amendements organiques » ou NF U 44-095 « Amendements organiques contenant des MIATE »).</i>
<i>Support de culture</i>	<i>Produit destiné à servir de milieu de culture à certains végétaux. Leur mise en œuvre aboutit à la formation de milieux possédant une porosité en air et en eau qui sont ainsi capables à la fois d'ancrer les organes absorbants des plantes et de leur permettre d'être en contact avec les solutions nécessaires à leur croissance (NF U 44-551 « Supports de culture »)</i>

5.1.4. Aspect réglementaire

Le cadre législatif relatif à l'utilisation et à la mise sur le marché des matières fertilisantes et des supports de culture est défini aux articles L.255-1 à L.255-11 du code rural. Il définit deux logiques qui conditionnent l'utilisation ultérieure ainsi que la responsabilité des producteurs :

- une démarche de mise sur le marché ou « logique produits » : la responsabilité du producteur s'arrête à l'étape de mise sur le marché du produit, l'utilisation du produit est sous la responsabilité de l'utilisateur,
- une démarche orientée vers un plan d'épandage ou « logique déchets » : la responsabilité du producteur inclut le mode d'utilisation jusqu'au retour au sol.

► **La logique « produits »**

Dans le cadre de la logique « produits », la mise sur le marché peut se faire par deux voies différentes :

- soit après avoir obtenu une homologation ou une autorisation provisoire de vente ou d'importation du ministère de l'agriculture. Dans ce cas, le responsable de la mise sur le marché doit déposer auprès de l'ANSES¹ un dossier permettant, aux termes de l'article L.255-3 du code rural et de l'arrêté du 21 décembre 1998 [JORF, 1999], de vérifier l'innocuité et l'efficacité agronomique du produit dans les conditions d'emploi prescrites ou normales.

¹ Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

- soit sans autorisation préalable, s'ils sont conformes au règlement CE n°2003/2003 du 13/10/2003 relatif aux engrais [JOUE, 2003], ou à une norme française rendue d'application obligatoire par un arrêté publié au journal officiel. C'est la démarche la plus utilisée pour des produits déjà identifiés dans une norme. Pour le cas des sédiments fins de dragage, nous verrons plus loin qu'il faut porter attention aux normes NF U 44-001 et NF U 44-551 respectivement relatives aux amendements minéraux basiques et aux supports de culture.
- Le fait de passer par la logique « produit » peut être long, difficile et coûteux pour des déchets qui ne bénéficient pas de normes déjà prévues auxquelles ils pourraient se rattacher. Elle ne peut concerner que des flux spécifiques de déchets suffisamment importants (ou communs à un ensemble d'entreprises) et de qualité constante. Mais, le statut de produit permet au producteur de sortir de la réglementation sur les déchets et en particulier, il limite sa responsabilité à la mise sur le marché. Il permet aussi de renforcer l'acceptation de la valorisation par épandage agricole ou en revégétalisation qui n'est pas toujours bien perçue par les riverains. Cet intérêt peut stimuler les investissements pour obtenir l'homologation ou l'intégration d'une norme existante.

► *La logique « déchets »*

L'épandage de déchets, en tant que tel, sur les sols agricoles est possible (article L255-2 du code rural) lorsqu'il est réglementé, au cas par cas, en application du code de l'environnement et de la loi n°92-3 sur l'eau [JORF, 1992]. Concrètement, deux situations coexistent : (i) soit les déchets proviennent d'ICPE soumises à autorisation, soit (ii) il s'agit de boues urbaines issues d'installations de traitement des eaux usées.

Dans le premier cas, les prescriptions de l'arrêté du 2 février 1998 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation [JORF, 1998b] sont à appliquer. Mais, cet arrêté ne s'applique pas aux installations de transit-traitement-stockage des déchets. L'arrêté du 2 février 1998 est commenté par la circulaire du 17 décembre 1998 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement [MEDDE, 1999]. En particulier, celle-ci précise que l'épandage peut être réalisé sur des parcelles boisées. Néanmoins, l'épandage reste interdit en dehors des terres régulièrement travaillées et des prairies ou forêts exploitées.

Dans le second cas, les textes principaux qui régissent l'épandage de boues urbaines sont (i) l'arrêté du 8 janvier 1998 relatif à l'épandage de boues de STEP et (ii) les articles R211-25 à 47 du code de l'environnement qui détaillent les conditions dans lesquelles ces boues peuvent être épandues sur les sols agricoles, forestiers ou en voie de réhabilitation. Pour être applicable, un arrêté de prescription technique doit avoir été publié. Or, seul l'arrêté relatif à l'épandage sur les sols agricoles existe (Arrêté du 8 janvier 1998 [JORF, 1998a]). Des précisions à ces deux textes sont fournies par la circulaire du 16 mars 1999 et la circulaire du 18 avril 2005.

D'après l'arrêté du 30 mai 2008 relatif aux opérations d'entretien des cours d'eau [JORF, 2008], c'est ce second cas qui doit être employé pour les sédiments gérés à terre. Nous verrons plus loin que cette réglementation n'est pas adaptée et qu'il en découle des conséquences sur la valorisation des sédiments.

Quel que soit le cas à considérer, les critères d'innocuité de l'épandage restent cependant les mêmes. En effet, les dispositions techniques diffèrent très peu et les valeurs limites en éléments traces métalliques et en composés traces organiques sont exactement les mêmes dans les deux cas. Les réglementations suivent une logique similaire :

- L'épandage doit respecter les seuils et flux d'éléments traces ou pathogènes définis dans l'arrêté du 8 janvier 1998 [JORF, 1998a], prévu pour l'épandage des boues de station d'épuration, qui est utilisé par défaut comme référence pour les déchets ne se rapportant à aucune réglementation particulière ;
- L'épandage nécessite une autorisation (éventuellement déclaration) préalable à la DREAL ;
- Il ne doit pas porter atteinte, directement ou indirectement, à la santé de l'homme et des animaux, à l'état phytosanitaire des cultures, à la qualité des sols et des milieux aquatiques ;
- Il doit présenter un intérêt pour les sols ou pour la nutrition des cultures et des plantations ;

- Il est subordonné à une étude préalable définissant l'aptitude du sol à le recevoir ;
- Les producteurs doivent mettre en place un dispositif de surveillance de la qualité ;
- Un cahier d'épandage est tenu à jour.

La partie spécification synthétise les différentes caractérisations et contraintes réglementaires exigées pour la mise en œuvre de l'épandage.

5.2. SPECIFICATIONS

Ainsi les deux filières agronomiques identifiées pour les sédiments sont : (i) la reconstitution de sol, en substitution de la terre végétale, et (ii) l'épandage agricole comme amendement basique.

La reconstitution de sol intervient dans les projets de végétalisation, dans le but de créer ou restituer un couvert végétal sur un site qui en était dépourvu ou qui a été dégradé. Les sédiments interviendraient en substitut partiel ou total de la terre végétale qui est habituellement utilisée mais qui par ailleurs est de plus en plus rare et coûteuse.

Il existe de nombreux exemples d'applications de reconstitution de sol :

- Le réaménagement de sites dégradés ou perturbés : anciennes mines, carrières, installations de stockage des déchets (ISD), sites industriels,...
- Les talus routiers ou ferroviaires ;
- Les pistes de ski ;
- Les remblais paysagers.

Les amendements basiques sont employés soit en entretien des sols, avec des apports tous les 2 à 3 ans, soit en correction quand le pH du sol est très bas. Le maintien du pH des sols est essentiel pour maintenir l'équilibre chimique du sol ainsi que sa structure physique. Les sédiments contenant des quantités importantes d'oxydes de calcium et de magnésium ont un potentiel d'amendement basique. Ils pourraient être utilisés en épandage agricole, en substitution des amendements basiques habituels, comme la chaux par exemple.

La principale difficulté de la valorisation des sédiments en « filière agronomique » est le manque de textes prescriptifs relatifs à leur usage. Par conséquent, leur utilisation s'en trouve parfois injustement restreinte.

5.2.1. Cadre normatif applicable aux sédiments

Les sédiments fins entrent difficilement dans le cadre des normes. A cela, deux raisons peuvent être évoquées. D'une part, les normes où certains sédiments possèdent les spécifications techniques requises, définissent des listes exhaustives de produits où ne figurent pas les sédiments. D'autre part, les caractéristiques relatives aux sédiments ne sont pas conformes à celles des produits ciblés dans les normes.

Force est de constater l'absence des sédiments dans les normes. Mais, souhaitant les introduire dans le cadre normatif selon des propriétés bien définies, l'entrée dans la « logique produit » en faciliterait les possibilités de valorisation tout en limitant les contraintes liées au statut de déchet.

► *Les normes ne prennent pas en compte le cas des sédiments*

Même si les sédiments possèdent les caractéristiques nécessaires de base, les normes donnent des listes exhaustives de produits potentiels sans inscription des sédiments. On peut alors imaginer que les listes des produits s'élargissent et que les sédiments fluviaux y soient inscrits.

A titre d'illustration, considérons le cas de l'amendement minéral basique. Des sédiments fortement carbonatés dont les teneurs minimales en CaO et MgO peuvent atteindre celles préconisées dans la norme NF U 44-001, qui pourrait convenir. Mais, cette norme relative aux amendements basiques fait état d'une liste de produits d'origine naturelle ou industrielle. Les produits ne figurant pas dans la liste, ne peuvent prétendre au statut d'amendement basique selon cette norme.

Dans les dénominations des différents amendements calcaires simples, un sédiment est nommé, il s'agit de la tangué (sédiment de la baie du Mont-Saint-Michel). Il est précisé que la valeur neutralisant (VN) minimum est de 15 % (tableau 2-47). La définition donnée dans la norme est assez restrictive et se résume à un « produit provenant de sables carbonatés de dépôts marins ».

Tableau 2-47. Définition et spécification extrait de la norme NF U 44-001 pour les amendements calcaires simples

N°	Dénomination ou type	Mode d'obtention et composant(s) essentiel(s)	Teneur(s) minimale(s)	VN mini
1a	Amendement calcaire simple	Produit d'origine naturelle contenant comme composant essentiel du carbonate de calcium, voire de magnésium. Le magnésium contenu doit venir du matériau d'origine. <i>Parmi les amendements calcaires simples de la classe I, certains correspondent à des appellations particulières reprises dans les types 1b à 1g. La revendication d'un type particulier 1b à 1g comme amendement calcaire simple exclut le mélange avec tout autre type.</i>	35 % (CaO + MgO)	35
1b	Craie	Produit provenant de certaines formations géologiques, notamment du crétacé.	45 % (CaO + MgO)	45
1c	Faluns	Produit provenant de sables coquilliers terrestres.	25 % (CaO + MgO)	25
1d	Maërl ou merl	Produit provenant du squelette calcaire d'algues lithotamnum, prélevé en mer à proximité des côtes.	42 % CaO 2,5 % MgO	43
1e	Tangué	Produit provenant de sables carbonatés de dépôts marins.	15 % (CaO + MgO)	15
1f	Trez ou traéz	Produit provenant de sables coquilliers marins.	15 % (CaO + MgO)	15
1g	Marne	Produit provenant de l'extraction d'une formation géologique argilo-calcaire.	25 % (CaO + MgO)	25

Dans le cas des supports de culture, la norme NF U 44-551 spécifie notamment les caractéristiques de deux types de support auxquels la majorité des sédiments fins répondent. Il s'agit des dénominations « terre végétale » et « terre support ». Les spécifications portent sur la matière organique, qui doit être comprise entre 1 et 5 % de la matière sèche ou entre 3 et 15 % selon les cas et la fraction < 2 mm, qui doit être supérieure à 50 %. Mais, encore une fois, les définitions de ces deux types de supports de culture ne font pas référence aux sédiments. La définition la plus proche est celle de la « terre support » décrite comme la « terre issue d'horizons de surface humifères ou d'horizons profonds », qui renvoie au profil pédologique des sols, ce qui ne peut pas s'appliquer aux sédiments fins.

► Inadéquation entre les propriétés des sédiments et les spécifications des normes

Les caractéristiques des sédiments fins ne sont pas conformes aux spécifications techniques de certaines normes. C'est le cas des engrais et des amendements organiques. Les caractéristiques des sédiments fins ne produiraient pas l'action attendue pour ces produits.

Pour les engrais, l'objectif des produits est d'apporter aux plantes des éléments directement utiles à leur nutrition. La norme NF U 42-001 spécifie que les matières fertilisantes doivent avoir une des

teneurs en azote (N), phosphore (P₂O₅), ou potassium (K₂O) supérieures à 3 % de la matière brute et la somme des 3 éléments supérieure à 7 % de la matière brute. Ce sont des caractéristiques que les sédiments ne présentent pas. Le tableau 2-48 donne les caractéristiques générales de dix sédiments dragués puis mis en dépôt. Ce tableau renseigne ainsi sur les ordres de grandeur des concentrations que l'on peut retrouver pour des sédiments provenant de différentes régions françaises.

Tableau 2-48. Caractéristiques générales de 10 sédiments mis en dépôt [Capilla et al., 2006]

Site	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
pH eau	8,3	7,9	7	9	7,2	7,8	8,2	8,8	8,1	7,4	
Conductivité (mS/cm)	4,17	0,47	2,06	0,51	1,89	0,74	0,17	0,25	1,64	0,19	
Répartition granulométrique	Argile (%)	29,5	19,9	14,6	26,2	26,2	22,2	25,8	5,2	34,2	16,6
	Limon (%)	42,6	40,5	76,4	27,9	63,9	56,3	29,7	8,2	62,6	74,2
	Sable (%)	27,9	39,6	9	45,9	9,9	21,5	44,5	86,6	3,2	9,2
CEC (cmol+/kg)	16,4	16,6	13,8	19,4	23,6	16,6	23,1	2,6	16,3	20,9	
Ca échangeable	18,06	15,91	28,60	10,72	39,06	19,6	21,21	4,14	25,66	19,21	
Mg échangeable	7,71	1,42	0,60	4,62	0,78	0,38	0,99	0,36	3,13	0,81	
K échangeable	1,4	0,3	0,23	2,08	0,38	0,32	0,42	0,2	0,18	0,63	
Na échangeable	13,63	0,12	0,05	3,15	0,12	0,05	0,03	0,06	0,66	0,05	
Carbonate (g/kg)	346	58	177	346	120	199	514	309	329	97	
P (Olsen) (g/kg)	0,108	0,286	0,155	0,311	0,479	0,228	0,090	0,029	0,013	0,491	
Corg (g/kg)	55,2	33,3	80,9	74,4	111,6	96,2	93,4	39,6	48,8	60,5	
N (g/kg)	1,34	1,54	2,07	3,91	6,82	2,7	2,74	0,22	1,01	4,01	
C/N	41	22	39	19	16	36	34	180	48	15	

Les amendements organiques ont pour objectif d'entretenir ou de reconstituer un stock de matière organique au sol. Il est spécifié dans la norme NF U 44-051 que la teneur en matière organique doit être supérieure à 20 % de la matière brute. Or les sédiments ont rarement une teneur en matière organique supérieure à 10 %. De plus, les sédiments ne sont pas cités comme des matières premières autorisées dans la norme.

5.2.2. Caractérisations et contraintes demandées par les normes

Si l'on se réfère aux caractéristiques relatives aux sédiments, on constate que seules deux normes peuvent éventuellement être retenues : (i) la norme NFU 44-001 pour les amendements basiques, et (ii) la norme NF U 44-551 pour les supports de culture. Pour ce dernier cas, il faut bien être conscient que l'intégration des sédiments est hautement délicate mais que la caractérisation reste intéressante et assez bien adaptée aux sédiments.

Le tableau 2-49 et le tableau 2-50 donnent respectivement les paramètres spécifiés dans la norme NF U 44-001 relative aux amendements basiques et la NF U 44-551 relative aux supports de culture. Chacune de ces normes désigne plusieurs types de produits selon l'origine des matières et leurs caractéristiques. Selon le type, les valeurs de référence des paramètres sont variables.

Tableau 2-49. Caractérisations pour les amendements basiques d'après la norme NF U 44-001

Caractéristiques	Paramètres
<i>Agronomie</i>	<i>Teneur en matière sèche ; Teneur en matière organique ; CaO et état de combinaison ; MgO et état de combinaison ; Valeur neutralisante ; Effet alcalinisant (déterminé par incubation)</i>
<i>Physico-chimie</i>	<i>Distribution granulométrique ; Taux d'humidité ; pH ; Solubilité carbonique ou dureté ; Finesse de mouture</i>
<i>Innocuité</i>	<i>As, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Se, Zn</i>

Tableau 2-50. Caractérisations pour les supports de culture d'après la norme NF U 44-551

Caractéristiques	Paramètres
<i>Physiques</i>	<i>% des éléments > 10 mm ; Classe de texture ; Granulométrie de la fraction fine ($\leq 2\mu\text{m}$, 2-50μm, 50μm-2mm) ; % en masse de la fraction fine ; Nature de la fraction > 2 mm ; % d'éléments grossiers (> 10mm) ; Masse volumique apparente sèche ; Teneur en matière sèche ; Capacité de rétention</i>
<i>Chimiques</i>	<i>Teneur en matière organique (en % de matière sèche) ; pH ; Conductivité ; % de calcaire ; Capacité d'échange cationique ; N, P₂O₅ et K₂O</i>
<i>Éléments à limiter</i>	<i>Chlore ; Cadmium, chrome, cuivre, mercure, nickel, plomb, zinc (voir tableau 2-51)</i>
<i>Micro-organismes</i>	<i>Salmonelles ; Listeria monocytogènes ; Escherichia coli ; Entérocoques ; Clostridium perfringens ; Œufs d'helminthes viables</i>

Le tableau 2-51 énonce les seuils de l'annexe C de la norme NF U 44-551 relative aux supports de cultures. Remarquons que les valeurs des teneurs limites en ETM dans cette norme sont les mêmes que celles fixées par l'arrêté du 09 août 2006¹ pour le seuil S1 (voir section contexte réglementaire, tableau 1-2) et que les teneurs limites dans les sols récepteurs dans le cas d'un épandage agricole (voir tableau 2-53).

Tableau 2-51. Teneurs limites en ETM [NF U 44-551]

ETM	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
<i>Teneurs limites (mg/kg MS)</i>	<i>2</i>	<i>150</i>	<i>100</i>	<i>1</i>	<i>50</i>	<i>100</i>	<i>300</i>

5.2.3. Caractérisations et contraintes demandées par la réglementation

L'arrêté du 8 janvier 1998 [JORF, 1998a] encadre l'épandage des boues de station d'épuration et par défaut l'épandage d'autres déchets en raison de l'absence de textes réglementaires spécifiques aux différents déchets.

C'est notamment le cas des sédiments gérés à terre. L'arrêté du 30 mai 2008 relatif aux opérations d'entretien des cours d'eau [JORF, 2008], précise que les « sédiments non remis dans le cours d'eau peuvent faire l'objet [...] d'un épandage agricole, sous réserve de l'accord des propriétaires des parcelles et du respect des prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles fixées par l'arrêté du 8 janvier 1998 ».

Le tableau 2-52, le tableau 2-53 et le tableau 2-54 résument respectivement les teneurs en contaminants à prendre en compte pour les déchets, pour les sols récepteurs et les contraintes de mise en œuvre demandées par l'arrêté du 8 janvier 1998 pour l'épandage contrôlé.

¹ relatif aux niveaux à prendre en compte lors d'une analyse de rejets dans les eaux de surface ou de sédiments marins, estuariens ou extraits de cours d'eau ou canaux relevant respectivement des rubriques 2.2.3.0, 4.1.3.0 et 3.2.1.0 de la nomenclature annexée au décret n° 93-743 du 29 mars 1993

Dans cet arrêté, des éléments de caractérisation de la valeur agronomique des effluents ou déchets sont précisés. Les paramètres sont énoncés sans indication de valeurs. Les éléments de caractérisation sont les suivants [JORF, 1998a] :

- matière sèche (en %), matière organique (en %) et pH ;
- azote global; azote ammoniacal (en NH₄) ;
- rapport C/N ;
- phosphore total (en P₂O₅), potassium total (en K₂O), calcium total (en CaO) et magnésium total (en MgO) ;
- oligo-éléments (B, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn). Le cuivre, le zinc et le bore étant mesurés à la fréquence prévue pour les éléments-traces. Les autres oligo-éléments étant à analyser dans le cadre de la caractérisation initiale des déchets ou des effluents.

Tableau 2-52. Teneurs limites en éléments-traces dans les boues [JORF, 1998a]

Eléments	Valeur limite (en mg/kg de MS)		Flux maxi cumulé sur 10 ans (en g/m ²)	
	Cas général	Sur pâturage	Cas général	Sur pâturage
<i>Cadmium</i>	10	-	0,015	0,015
<i>Chrome</i>	1000	-	1,5	1,2
<i>Cuivre</i>	1000	-	1,5	1,2
<i>Mercure</i>	10	-	0,015	0,012
<i>Nickel</i>	200	-	0,3	0,3
<i>Plomb</i>	800	-	1,5	0,9
<i>Zinc</i>	3000	-	4,5	3
<i>Sélénium</i>	100	-	-	0,12
<i>Cr+Cu+Ni+Zn</i>	4000	-	6	4
<i>Total des 7 principaux PCB (*)</i>	0,8	0,8	1,2	1,2
<i>Fluoranthène</i>	5	4	7,5	6
<i>Benzo (b) fluoranthène</i>	2,5	2,5	4	4
<i>Benzo (a) pyrène</i>	2	1,5	3	2

(*) PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153 et 180

Tableau 2-53. Teneurs limites en éléments-traces métalliques dans les sols récepteurs [JORF, 1998a]

Eléments traces	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Valeur limite (mg/kg MS)	2	150	100	1	50	100	300

Tableau 2-54. *Épandage contrôlé : contraintes de mise en œuvre [JORF, 1998a]*

<i>Caractéristiques</i>	<i>Paramètres</i>	<i>Contraintes et remarques</i>
<i>Pente de la parcelle</i>	<i>Le ruissellement hors du champ d'épandage doit être évité.</i>	<i>Suivant la pente, des contraintes plus ou moins fortes sont définies.</i>
<i>Distances minimales à respecter</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Puits, forages, sources, aqueducs transitant des eaux destinées à la consommation humaine en écoulement libre, installations souterraines ou semi-enterrées utilisées pour le stockage des eaux (potables ou d'arrosage de cultures maraîchères), - Cours d'eau et plans d'eau, - Lieux de baignades, - Sites d'aquaculture, - Habitation ou local occupé par des tiers, zones de loisirs et établissements recevant du public. 	<p><i>Suivant le type de déchet (solide, fermentescible, odorant, stabilisé) et la pente du terrain (< ou > à 7 %), des distances minimales sont à respecter.</i></p> <p><i>Elles varient de 5 m à 500 m.</i></p>
<i>Délais</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Herbages ou cultures fourragères, - Cultures maraîchères ou fruitières. 	<i>Des délais minima entre l'épandage et la récolte pouvant aller jusqu'à 18 mois sont à respecter.</i>
<i>Périodes</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Sol gelé ou abondamment enneigé, - Fortes pluies ou risque d'inondation. 	<i>L'épandage est interdit.</i>
<i>Dose maximale de boues</i>	<ul style="list-style-type: none"> - 30 t MS / ha / 10 ans, - Respect des flux de contaminants. 	<i>Il existe d'autres contextes réglementaires limitant implicitement les doses de boues épandues : Directive nitrate et Recommandations phosphore.</i>

Les caractérisations suivant la logique « déchet », portent sur le déchet épandu mais aussi sur les sols récepteurs ainsi que sur la mise en œuvre pratique de l'épandage (distances, délais ...).

5.3. APPLICATION AUX SEDIMENTS

5.3.1. Travaux de recherche et applications

Dans cette section, des exemples d'études, de réalisations ou de projets de valorisation agronomique de sédiments sont exposés. Même si traditionnellement les sédiments ont à de nombreuses reprises, été utilisés comme amendement agricole, les retours d'expériences des travaux de recherche dans cette voie de valorisation sont relativement récents.

► *Valorisation agronomique des sédiments de dragage de canaux*

Suite à des pratiques informelles d'épandage agricole de sédiments de dragage observées dans différentes régions françaises et à des difficultés foncières pour les gestionnaires de cours d'eau pour stocker leurs sédiments d'une part, et à la volonté de trouver une solution durable d'autre part, le CETMEF et le CETE de Lyon ont mené une première étude en 2009 sur « La valorisation agricole des sédiments de dragage des voies navigables » [Bernes Cabanne, 2009]. Cette étude surtout bibliographique, a permis de mettre en évidence que « les sédiments de dragage peuvent avoir des propriétés voisines des sols, voire dans certains cas, de sols agricoles fertiles ».

Devant ce constat, le CETMEF et le CETE de Lyon ont alors proposé et mis en place, en 2010, une expérimentation agricole sur site pour confirmer ou non le potentiel agronomique des sédiments de canaux.

Pour ce faire, une première étape a consisté à identifier un terrain de dépôt parmi ceux utilisés par VNF pour stocker à terre des sédiments issus d'opérations de dragage. Les sédiments stockés devaient être non contaminés en éléments traces métalliques et organiques.

Deux critères ont été utilisés afin d'avoir une première estimation de la qualité des sédiments :

- les seuils de qualité S1 définis par l'arrêté du 09 août 2006 [JORF, 2006] ;
- le quotient « Qsm » défini dans le guide technique de Voies Navigables de France [VNF, 2008]. Ce quotient permet d'évaluer le risque environnemental lié à la présence d'une pollution dans les sédiments. Si ce quotient est inférieur à 0,1, les sédiments de dragage présentent un « risque négligeable » vis-à-vis de l'environnement. Si ce quotient est compris entre 0,1 et 0,5, alors les sédiments de dragage présentent un « risque faible » vis-à-vis de l'environnement ;

Cette première étape a permis de sélectionner un terrain de dépôt. Les sédiments échantillonnés dans le terrain de dépôt ont fait l'objet d'analyses complémentaires pour déterminer leur pouvoir agronomique, à savoir la détermination de leurs valeurs fertilisantes et restructurantes. Les paramètres agronomiques recherchés dans cette étude sont indiqués dans le tableau 2-55.

Tableau 2-55. Paramètres agronomiques recherchés dans les sédiments de dragage [Cantegrit et Nouvion-Dupray, 2011]

Paramètres agronomiques	Paramètres structuraux	Phytotoxicité
<i>MS, MO, pH, rapport C/N, NKT, P, K, NH⁴⁺, Ca, Mg, CEC.</i>	<i>Granulométrie, test de stabilité structurale, teneur en eau.</i>	<i>Protocole adapté à partir de la norme ISO 11269-2</i>

Une parcelle agricole de 2,58 hectares a été retenue pour cette expérimentation. Elle n'avait pas reçu d'apports de fumure durant les dernières années. De plus, il n'y a pas de cours d'eau à proximité et le champ est proche du terrain de dépôt où sont stockés les sédiments. Cette parcelle a été échantillonnée pour caractériser le sol et rechercher la présence éventuelle de polluants organiques et inorganiques au sein de celui-ci.

L'épaisseur de sédiment épandue a été limitée à 1,75 cm à cause des flux qui ne devaient pas dépasser les prescriptions de l'arrêté du 08 janvier 1998 [JORF, 1998a]. C'est surtout la concentration en nickel des sédiments qui a été limitante.

La parcelle agricole a été divisée en trois bandes expérimentales d'une surface quasi identique :

- une première bande « témoin » correspondant à une culture de triticale (céréale hybride entre le blé et le seigle) avec apport de fertilisants chimiques prévu initialement par l'agriculteur ;
- une deuxième bande correspondant à une culture de triticale avec apport de sédiments et d'azote pour correspondre aux besoins des cultures ;
- une troisième bande correspondant à une culture de triticale avec un apport unique de sédiments.

Les premiers résultats rapportés par Cantegrit et Nouvion-Dupray [2011], montrent une absence de contamination des sols et des plantes en éléments traces et une potentialité agronomique des sédiments pour une restructuration d'un sol squelettique. Cependant, les auteurs rappellent qu'ils sont limités par la réglementation sur l'épaisseur d'épandage.

Toujours pour lever les verrous de la valorisation agronomique des sédiments, une étude complémentaire a été lancée en 2011 [Cantegrit et Eisenlohr, 2012]. Elle concerne la potentialité de relargage en éléments inorganiques d'un complexe sol agricole-sédiments de dragage de canaux non contaminés.

Partant du constat que le contexte réglementaire est mal adapté pour la valorisation agricole des sédiments de dragage, ces travaux passent par l'élaboration d'un protocole expérimental (en laboratoire) pour déterminer les risques environnementaux liés à l'épandage agricole de sédiments de canaux non contaminés. Les objectifs sont de déterminer les flux de relargage des éléments inorganiques (As, Ba, Cd, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn, Hg, Cl⁻, SO₄²⁻) et d'identifier les risques éventuels sur les ressources en eau souterraine.

Des essais de lixiviation (NF EN 12457-2) et de percolation (NF CEN/TS 14405) ont été entrepris sur des échantillons contenant un mélange sédiments de dragage non contaminés issus de

canaux et des sols agricoles. Ces essais ont contribué à évaluer le pouvoir de relargage de ces mélanges.

Trois types de sols récepteurs ont été choisis : un sol agricole sableux de Saône-et-Loire (71), un sol limoneux-argileux de la basse vallée de l'Ain (01) et un sol témoin constitué de sable de Fontainebleau.

Ensuite, les essais ont été réalisés pour différents ratios de sédiments apportés sur chaque type de sol, à savoir :

- Ratio 2/25 : apport de 2 cm de sédiments sur 25 cm de sol cultivé ;
- Ratio 5/25 : apport de 5 cm de sédiments sur 25 cm de sol cultivé ;
- Ratio 10/25 : apport de 10 cm de sédiments sur 25 cm de sol cultivé ;
- Ratio 15/25 : apport de 15 cm de sédiments sur 25 cm de sol cultivé.

Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

- Pour un épandage de 2 cm, la potentialité de relargage est identique à celle du sol, il n'y a pas d'influence des sédiments ;
- L'augmentation du ratio sédiments/sol entraîne un potentiel de relargage des éléments inorganiques plus important ;
- Les flux en Cu, Ni, Zn, Ba, SO_4^{2-} et Cl^- ont un comportement similaire pour un même type de sol, pour chaque ratio et ils ont un même ordre de grandeur à Liquide/Solide = 10 ;
- Pas de possibilité de quantifier le potentiel de relargage pour les éléments Cd, Hg, Se et Sb, leurs teneurs étant inférieures à la limite de détection ;

Dans la continuité de ces travaux, une étude avec des casiers lysimétriques est envisagée.

► *Utilisation de sédiments pour la production de substitut de terre végétale (Manufactured topsoil)*

Sheehan *et al.*, [2010a] ont fait une analyse technique pour mettre au point un substitut de terre végétale à partir de sédiments marins du port de Waterford (Irlande). Les spécifications utilisées en Irlande pour la terre végétale proviennent de la norme BS 3882 [2007], « Specification for topsoil and requirements for use ».

Ce sont quatorze mélanges qui ont été confectionnés à partir de compost et de sédiments. Ils intègrent des sédiments désalinisés ou non provenant de deux points de prélèvement du port : « Passage East » et « Cheek Point ». Ils ont été choisis de manière à avoir, pour le premier un sédiment fin (15 % de sable) et un second sédiment plus grossier (91,2 % de sable). Du sulfate d'aluminium est ajouté pour ajuster le pH et améliorer la disponibilité des nutriments. Des analyses sur la qualité environnementale des sédiments ont été menées en quantifiant les éléments traces métalliques et organiques. Les nutriments présents dans les produits entrant dans la composition des mélanges ont été mesurés, voir tableau 2-56.

Tableau 2-56. Synthèse des analyses des nutriments [Sheehan *et al.*, 2010a]

<i>Position/Type</i>	<i>Carbonate de calcium (mg/kg)</i>	<i>Potassium (mg/l)</i>	<i>Phosphore (mg/l)</i>	<i>Azote (mg/kg)</i>	<i>Magnésium (mg/kg)</i>
<i>Passage East</i>	934	132,8	11,7	364	3429
<i>Cheek Point</i>	1137	372,1	7,6	1259	5757
<i>Substitut de terre végétale élaboré</i>	47,5	6,2	1,8	671	3044
<i>Compost</i>	675	1050,7	309,8	17,751	2093

Les sédiments étudiés étant pauvres en matière organique (0,53 et 2,5 %), du compost est ajouté. La quantité de compost est variable selon les mélanges. Elle est choisie de sorte que le mélange final atteigne 6 % de MO. Du sulfate d'aluminium ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) est ajouté afin de diminuer le pH des

mélanges jusqu'à la valeur cible optimum de 6,75. L'efficacité des mélanges a été évaluée avec des tests de germination et de croissance et, la mesure de la production de biomasse. Après analyse des résultats, le mélange ayant donné les meilleures caractéristiques contient 60 % de sédiments désalinisés provenant de « Cheek Point » (le plus grossier) et 40 % de « Passage East » (le plus fin) auxquels du compost et du sulfate d'aluminium est ajouté pour obtenir une teneur en MO de 6 % et un pH de 6,75.

Cette étude a été complétée par une analyse économique et environnementale de cette voie de valorisation pour les sédiments du port de Waterford [Sheehan *et al.*, 2010b]. Quatre scénarios sont alors élaborés prenant en compte les modes de dragage, les différents moyens de transport, le prix de vente des terres confectionnées, etc. Les coûts économiques des scénarios et les impacts environnementaux sont estimés de manière à aboutir à un classement des différents scénarios permettant la valorisation dans cette filière.

Sturgis et Lee (1999) décrivent un processus de création d'un sol artificiel en utilisant des sédiments de dragage comme composant majeur de matériaux mélangés. Des tests de criblage sont décrits pour déterminer les ratios les plus productifs de mélange de matériaux de dragage et d'autres matériaux, comme des déchets verts, des composts, de la sciure, des biosolides (boues de STEP, lisiers) et les sous-produits industriels avec de la cellulose. Ces tests nécessitent moins de 5 gallons (18,93 litres) de chaque matériau d'essai et peuvent être menés dans la plupart des serres et chambres de croissance avec des espèces végétales recommandées ou spécifiques au site. La sélection d'un mélange approprié est basée sur une réponse acceptable des végétaux pour un rapport économiquement faisable de sédiments de dragage et d'autres matériaux.

La démarche décrite pour la fabrication d'un sol productif à base de sédiments de dragage s'articule en deux étapes. L'étape 1 inclut la caractérisation physico-chimique des différents matériaux et des mélanges et des tests de germination et de croissance à l'échelle du laboratoire. Si les résultats des tests montrent que les sédiments de dragage peuvent potentiellement être utilisés pour fabriquer un sol fertile, l'étape 2 de la démarche implique la création d'un projet démonstrateur ou la commercialisation du process.

Sturgis *et al.* [2001a, 2001b, 2002] mettent en œuvre l'étape 1 de cette démarche afin de discuter du potentiel de réutilisation des sédiments des ports de Mobile (Alabama, USA), Toledo (Ohio) et New York/New Jersey (New York, USA) pour la fabrication de sols fertiles.

► *Végétalisation d'un parc à cendres volantes avec des sédiments fluviaux*

Les sédiments fluviaux peuvent être comparés à des terres « banales » où la végétation peut se développer. C'est à partir de ce constat que le centre de production thermique EDF de Blénod-lès-Pont-à-Mousson a mis en place une opération consistant à utiliser les sédiments pour végétaliser une partie de son parc à cendres. C'est sur ce principe que 5 ha correspondant à la partie sud du parc à cendres, ont été recouverts avec des sédiments provenant d'un dragage d'approfondissement de la Moselle canalisée, réalisé par VNF.

L'étude de faisabilité démontre que les sédiments ont un intérêt indéniable dans la revégétalisation du parc à cendres [ANTEA, 1999]. Dans cette étude, les travaux de caractérisation des sédiments portent sur des analyses chimiques avec la détermination des principaux ETM et CTO sur les matériaux bruts, après lixiviation simple pendant 24h, et après des tests de percolation verticaux descendant sur des colonnes de 85 mm de diamètre constituées de 0,03 m de sédiments et 1,00 m de cendres du site afin de simuler le dépôt final avec 0,30 m de sédiments et 10 m de cendres.

Des tests d'écotoxicité aiguës (vibrio fisherie, 30 mn et daphnie, 48 h) et chroniques (algues, 72 h et cérodaphnie, 7 j) sur lixiviats et sur matériaux bruts (végétaux, 14 j et vers de terre, 14 j), sont réalisés selon le protocole proposé par MATE [1997],

Enfin, la détermination du « potentiel de végétalisation » des cendres volantes et des sédiments est établie à partir d'analyses agronomiques (pH, granulométrie, COT, N_{total}, C/N, P_{assimilable}, CEC, capacité

aux champs, éléments traces extractibles) et d'essais de phytotoxicité (tests de germination et de croissance en conditions contrôlées).

Tableau 2-57. Caractéristiques agronomiques des cendres volantes et sédiments [ANTEA, 1999]

	Granulométrie %			pH	C _{org} %	MO %	N _{tot} %	C/N	P ₂ O ₅ %	CEC	Ca	Mg cmol.kg ⁻¹	K cmol.kg ⁻¹	Na	S/CEC
	A	L	S												
Cendres	1,3	46,8	51,9	8,4	5,6	9,7	0,07	83,7	0,009	3,1	1,0	1,65	0,14	0,02	0,90
Séd. A	34,4	41,8	36,8	7,5	3,2	5,5	0,29	11,0	0,278	15,4	36,6	1,49	0,54	0,92	saturé
Séd. B	24,4	21,6	54,0	7,6	1,6	2,8	0,15	10,6	0,265	9,7	29,9	1,23	0,32	0,60	saturé

Ainsi, les cendres volantes montrent globalement des fertilités physique et chimique très faibles tandis que les sédiments fins ont des caractéristiques agronomiques voisines des sols agricoles les plus fertiles (tableau 2-57).

Les sédiments ont été épandus avec une épaisseur inférieure à 40 cm. Les concentrations utilisées pour les éléments traces étaient celles fixées par l'arrêté du 8 janvier 1998 relatif à l'épandage des boues de STEP [JORF, 1998a]. L'opération de végétalisation a été réalisée en juin 2003, avec un mélange de graines composé de graminées, de légumineuses et d'arbres. Les différentes opérations ont été soumises à autorisation au titre des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement et ont fait l'objet d'un arrêté préfectoral (en date du 23 juin 2000).

Un suivi environnemental, agronomique et du développement de la végétalisation a été mis en place durant 3 ans. Il est subdivisé en trois composantes :

- inventaires floristiques,
- analyses physico-chimiques sur sol,
- analyses physico-chimiques sur végétaux.

Le suivi environnemental a permis d'établir les points suivants selon ESCOPE/ASCAL[2008] :

- Au niveau des inventaires floristiques, le dépôt des vases couplé au semis est un succès d'un point de vue du développement végétal. Celui-ci a permis une colonisation végétale importante, soit à partir des espèces semées, soit à partir d'espèces spontanées, qui ont pu s'installer sur le site grâce au dépôt de sédiments et à la création de micro-habitats favorables.
- Pour les analyses de sol, le suivi sur trois ans des sols de la station témoin ne laisse apparaître aucune évolution significative des paramètres agronomiques ou des métaux. Par contre, sur la zone végétalisée, l'épandage des matériaux de dragage a créé une fertilité aux sols.
- Quant aux analyses de végétaux, il apparaît que les concentrations relevées dans les parties aériennes des végétaux restent inférieures aux valeurs habituellement observées dans le cas d'une croissance normale, à l'exception du zinc qui présente des concentrations élevées notamment au niveau de l'espèce arbustive *Betula pendula*. Après deux années de suivi, il apparaît que les fortes concentrations en éléments métalliques dans le sol n'entraînent pas obligatoirement des taux élevés dans les plantes.

► Valorisation agronomique d'un sédiment marin

Depuis des décennies, la tange - sédiment carbonaté du golf normand-breton a été exploitée en tant que matière première pour l'amendement calci-magnésique et la fertilisation des terres agricoles, [Bourret, 1997]. Camuzard [2011] rappelle que l'utilisation de ce sédiment marin, présent dans les baies et estuaires du littoral bas-normand et nord breton, est une pratique ancienne.

L'estuaire de la Rance recèle de ce même sédiment appelé localement tange. Rappelons qu'EDF est membre actif en tant qu'usager de la Rance, de l'association COEUR¹ Emeraude depuis sa création

¹ Comité Opérationnel des Elus et Usagers de la Rance

en 1994. Dans le Contrat de Baie, EDF a notamment participé au financement et à la mise en œuvre d'un programme de travaux d'extraction de sédiments du bassin maritime, [EDF, 2011].

Une première opération a eu lieu en 1996 sur un volume supérieur à 10 000 m³ de sédiments en queue de bassin (piège du Lyvet). Elle a permis d'étudier la faisabilité technique des extractions de sédiments, l'incidence environnementale de ces extractions et l'intérêt agronomique des tangues.

La plus grande quantité a été épandue sur des parcelles de deux exploitations agricoles. Le reste du volume, a permis d'examiner quelles étaient les conditions adéquates pour utiliser les sédiments en couches épaisses afin de réhabiliter des sols dégradés : carrières, sites industriels, bordures de routes. L'objectif est de vérifier le comportement des gazons, mais aussi une variété de plantes annuelles et arbustes couramment utilisée dans la création d'espaces verts. Cette expérimentation qui a été menée par l'entreprise 4 Vaulx-Jardin [1998] comportait deux volets : (i) la création de massifs et talus, et (ii) la mise en place d'expériences sur le compostage avec des sédiments.

Les conclusions sur le développement des plantes sur le massif montrent que le comportement des végétaux est tout à fait satisfaisant pour leur majorité.

En ce qui concerne l'intégration des sédiments en compostage, l'étude a porté sur la fabrication de deux mélanges. Le premier mélange (M1) était préparé à partir de 3 composants, à savoir des sédiments, de l'écorce de peuplier et du lisier. Le second mélange (M2) était seulement composé de sédiments et d'écorce de peuplier. Les caractéristiques de ces deux mélanges sont données dans le tableau 2-58. Notons que le sédiment brut provient d'un prélèvement de sédiments constituant le massif à 9 mois. L'étude conclut que les sédiments pourraient être intégrés en mélange dans des gammes de compost.

Tableau 2-58. Analyses des mélanges compostés (résultats exprimés sur la matière brute) [4Vaulx-Jardin, 1998]

<i>Paramètres analysés sur brut</i>	<i>Sédiment brut</i>	<i>M1 (écorce + sédiments + lisier)</i>	<i>M2 (écorce + sédiments)</i>	<i>Témoin : Fumier de bovin</i>
<i>Matière sèche (%)</i>	70,97	82,82	80,97	20,00
<i>Matière organique totale (% MB)</i>	5,78	27,05	23,90	15,00
<i>Carbone organique (% MB)</i>	1,06	10,86	9,26	-
<i>Azote total (% MB)</i>	0,11	0,77	0,63	0,42
<i>C/N</i>	9,38	14,10	14,67	-
<i>Phosphore total P₂O₅ (% MB)</i>	0,10	0,88	0,60	0,26
<i>Potassium total K₂O (% MB)</i>	0,76	1,68	0,97	0,52
<i>Calcium total CaO (% MB)</i>	10,93	7,48	9,11	0,59
<i>Magnésium total MgO (% MB)</i>	1,08	1,27	1,19	0,10
<i>CEC (mEq/100 g)</i>	-	26,50	24,30	-
<i>pH</i>	8,43	7,95	7,80	7,90

En 2000/2001, une seconde campagne de dragage de la Rance est réalisée. Elle porte sur 92 000 m³ de sédiments qui ont été extraits du piège de Lyvet. Ils ont servi d'amendement agricole.

Ferreira [2003], réalise un bilan des deux opérations, accomplies en 1996 et en 2000. Ces travaux sont réalisés dans le cadre d'un stage de fin d'études de l'ENSAR (Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Rennes) pour le compte de COEUR Emeraude.

Cette étude a pour objectif d'évaluer les risques potentiels pour les sols et les cultures, notamment liés aux traces métalliques, à la salinité et à la présence de soufre.

Des analyses agronomiques ont été réalisées en laboratoire sur les sols ayant reçu des sédiments. Des profils pédologiques ont été effectués dans les parcelles. L'analyse de ces profils montre des développements de racines au niveau des sédiments (figure 2-34). Il n'a pas été constaté de phénomènes de toxicité ou de carences sur les cultures de rente.

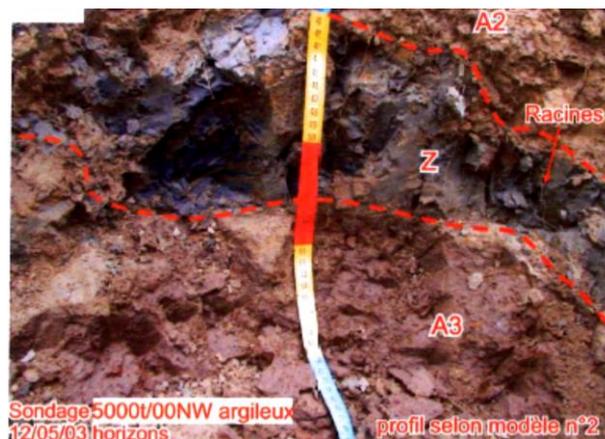


Figure 2-34. Aspect de l'horizon Z (anthropique) constitué de sédiments argileux en mai 2003, [Ferreira, 2003]

L'étude semble montrer l'absence de toxicité sur les cultures développées par des sédiments marins provenant de la Rance. La salinité de départ ne présente pas un handicap dans la mise en culture des sols récepteurs à condition de respecter un délai après l'extraction des sédiments qui est variable selon les conditions d'épandage.

Sur la période 2003/2004, une troisième campagne de dragage a été réalisée sur la zone de Mordreuc. Une séparation granulométrique par centrifugation est opérée sur un volume de 91 000 m³ de sédiments de dragage extraits de la Rance. Le volume de sédiments sableux a été utilisé pour reconstituer des plages sur le bord de Rance tandis que les 30 000 m³ de sédiments fins ont été destinés à l'amendement des terrains agricoles.

Fort de ces expériences, EDF et l'association COEUR Emeraude poursuivent à ce jour cette démarche consistant à valoriser les sédiments fins de la Rance sur des terres agricoles. La volonté est de transformer le piège de Lyvet en un dispositif pérenne et mettre en place un système robuste pour cette voie de valorisation.

5.3.2. Intérêts et contraintes de la filière agronomique et des sédiments

► Intérêts de la filière de valorisation agronomique

Tout d'abord, cette filière est intéressante par le faible nombre de moyens à mettre en œuvre pour valoriser les sédiments. En effet, il n'y a pas d'importants procédés de traitement appliqués aux sédiments avant de les mettre en œuvre, seule une phase de décantation pour augmenter la siccité des sédiments est nécessaire. Le coût de l'opération est donc modéré.

Si les parcelles agricoles à proximité du site d'extraction sont suffisamment étendues, il est possible d'installer un bassin de lagunage près de celles-ci.

La probabilité de disposer de parcelles agricoles à proximité d'un site à curer est élevée. Plus le site retenu sera proche, plus les coûts et les nuisances liés au transport seront minimisés.

► Intérêts des sédiments

Les crues apportant des argiles et des limons toujours favorables à l'agriculture, il paraît légitime de penser que des apports de sédiments provenant de dépôts naturels dans les retenues puissent venir en amendement voire, améliorer le rendement des cultures.

Même quand les sédiments ne possèdent pas de qualité exceptionnelle, ils correspondent le plus souvent à une terre « banale », du point de vue des caractéristiques physico-chimiques, montrant des intérêts quant à leur utilisation.

Pour des besoins précis, les caractéristiques minéralogiques des sédiments sont recherchées. C'est le cas des sédiments carbonatés du golf normand-breton – appelé tangué – qui sont très appréciés pour tamponner l'acidité des terres. En effet, le contexte géologique de la région est à l'origine d'un pH bas

du sol. Cette pratique d'amendement calci-magnésien est très ancienne dans la région [Camuzard, 2011].

Aussi, grâce à la forte proportion en argile dans les sédiments fins, l'effet structurant des phyllosilicates va présenter un intérêt. En effet, il peut être à l'origine de l'amélioration de l'équilibre textural du sol.

L'utilisation des sédiments peut permettre de végétaliser des zones urbaines comme dans le cas de création d'espaces et d'ouvrages paysagers assimilés. Ainsi, pour le maître d'ouvrage, le coût du projet est moindre car les sédiments viennent se substituer à la terre végétale. De plus, l'impact environnemental sera d'autant diminué par le fait qu'il n'est pas nécessaire de décaper des parcelles agricoles de leur terre arable. Ce type de valorisation s'adresse à des sédiments qui sont proches des villes car les besoins se trouvent essentiellement en zone urbaine ou encore dans les régions où l'on trouve des carrières ou des sites industriels à réhabiliter. L'utilisation de sédiments est intéressante pour reconstituer un sol.

► *Contraintes et difficultés d'une valorisation agricole*

Un certain nombre de contraintes sont rencontrées pour mettre en place des opérations de valorisation agronomique de sédiments. Ces contraintes sont souvent fortement liées entre elles.

L'absence d'une législation spécifique aux sédiments entraîne des lourdeurs administratives quant à leur gestion et peut décourager la valorisation. A défaut de règles dédiées, on se reporte sur la législation spécifique aux boues de station d'épuration (Arrêté du 8 janvier 1998).

En effet, le cadre réglementaire cité comme référence pour les sédiments est celui de l'épandage de boues de STEP. Mais en réalité, il s'agit de produits résiduaires de composition bien différente : les boues de STEP contiennent entre 50 et 80 % de MO et sont très fertilisantes notamment en éléments N, P, K, voire peut-être trop, surtout en azote. Les sédiments issus des curages contiennent rarement plus de 10% de MO et relativement peu d'éléments nutritifs. Dans le cas des boues de STEP, la valorisation agricole se justifie par un retour au sol de la matière organique (cycle de la MO rompu dans le cas des sols agricoles). Dans le cas des sédiments de dragage, on peut la justifier certes par un retour au sol de matière organique (les sédiments en possèdent tout de même une quantité non négligeable), mais plutôt par un retour au champ de « terre arable » qui a pu être emportée par l'érosion des sols. Ainsi, on peut attribuer aux sédiments des qualités recherchées en reconstruction de sol.

De plus, l'arrêté du 8 janvier 1998 a été élaboré pour des déchets étant épandus au fur et à mesure, régulièrement, sur des parcelles agricoles. Ce raisonnement en flux n'est pas applicable dans le cas d'une opération unique, par exemple dans le cas d'une reconstruction de sol.

Par ailleurs, on pourrait penser qu'il y ait une concurrence avec les boues de STEP en raison de l'offre proposée par les stations d'épuration, dépassant la demande, et les sédiments qui sont aussi en quantité très importante. Or, les sédiments et boues de STEP n'ont pas les mêmes propriétés, il y a *a priori* pas de rivalité à avoir, sauf dans le cas des boues chaulées.

De par la réglementation applicable, les sédiments sont alors assimilés à des « boues », ce qui leur confère une image péjorative. L'acceptation sociétale est un élément important qui peut engendrer une difficulté pour trouver et convaincre les agriculteurs ayant des parcelles suffisamment proches du site de dragage. Les « boues » bénéficient d'une assez mauvaise image auprès des populations – suspicion de pollution pouvant contaminer les cultures – qu'il ne faut pas reporter sur les terres agricoles. L'industrie agro-alimentaire, est parfois réticente à la valorisation des boues de STEP et aux composts d'OMR. Par exemple, la charte d'approvisionnement des légumes Bonduelle [Bonduelle, 2007] encadre très fortement l'utilisation des boues. Selon les cas, un délai de plusieurs années est nécessaire avant la mise en culture de la parcelle ou, leur utilisation est simplement interdite.

Cette résistance des différents acteurs est renforcée par une certaine méconnaissance de la valeur agronomique des sédiments par rapport à d'autres déchets faisant l'objet d'une valorisation agronomique, et les risques de phytotoxicité ou de bioaccumulation de micropolluants dans les cultures. Le peu d'études scientifiques, le faible retour d'expériences et le nombre réduit de données à l'échelle nationale va, de plus, rendre l'acceptation sociétale plus difficile.

A cela, des difficultés supplémentaires viennent s'ajouter. La teneur en eau assez élevée nécessite un stockage provisoire des matériaux plus ou moins long, ou l'utilisation d'un pré-traitement accélérant la déshydratation, avant d'envisager de les réutiliser en agriculture. Ce stockage avant utilisation renforce le problème de disponibilité foncière et ajoute un coût à la valorisation dû à l'immobilisation d'un terrain proche du site d'extraction ou au processus de pré-traitement permettant de déshydrater les sédiments. En cas de non disponibilité de terrain à proximité, l'éloignement va être à l'origine de l'augmentation du coût. En effet, le coût du transport va très vite être prohibitif si les sites d'épandage ou de dépôt sont trop éloignés.

Enfin, le volume de sédiments à épandre, renforce la difficulté à trouver assez de parcelles agricoles suffisamment proches des sites de dragage, sachant que l'épandage se fait avec un faible volume de sédiments par hectare. Il faut trouver un nombre suffisant d'exploitations agricoles capables d'absorber en amendement des sédiments au fil du temps, ou s'orienter vers les chantiers de réhabilitation de site, qui eux demandent des volumes bien supérieurs.

5.4. CONCLUSION

Le sol a de multiples fonctions. Pour la production agricole ou simplement le développement de plantes, les fonctions principales qui sont attendues d'un sol sont relatives au développement du système racinaire et à la disponibilité d'éléments nutritifs pour la croissance des végétaux.

L'apport de matériaux aux sols, qu'ils soient d'origine naturelle ou d'origine artificielle, doit satisfaire un ensemble d'exigences techniques, environnementales et sanitaires. Toutes ces informations, données dans les normes et textes réglementaires, permettent de caractériser au mieux les matériaux-déchets, afin de les employer suivant l'usage le plus adapté.

L'utilisation des déchets comme matériaux en agronomie reste cependant relativement complexe. Il y a de nombreux paramètres à prendre en compte, et ceux-ci ne se restreignent pas au déchet lui-même mais aussi au sol pouvant les recevoir.

La valorisation agronomique des sédiments est principalement contrainte par la réglementation et le contexte normatif qui ne prend pas en compte ces derniers. Ainsi, les possibilités de valorisation des sédiments s'en trouvent aujourd'hui réduites. De plus, une image péjorative colle aux sédiments fins issus de dragage, le sédiment étant notamment assimilé au terme de « boue », ce qui rend l'acceptation sociétale plus compliquée.

La méconnaissance de la valeur agronomique des sédiments par rapport à d'autres déchets faisant l'objet d'une valorisation agronomique et les risques de phytotoxicité ou de bioaccumulation de micropolluants dans les cultures est un frein. Le peu d'études scientifiques, le faible retour d'expériences et le nombre réduit de données à l'échelle nationale va, de plus, rendre l'acceptation sociétale plus difficile.

L'avancée des connaissances dans cette filière ainsi que les retours d'expériences utilisant des sédiments pourront permettre des actions de communication en vue de faire évoluer le contexte réglementaire et normatif ainsi que l'image des sédiments auprès des populations.

La caractérisation agronomique des sédiments renseigne sur leurs potentialités et faiblesses. En reconstitution de sol, elle permettra aussi de déterminer d'éventuels matériaux à leur ajouter, comme du compost, pour obtenir un substrat fertile. Il faut aussi garder à l'esprit que dans le cas d'un usage agricole, la caractérisation des sols recevant les sédiments est tout aussi importante. La faisabilité de l'opération sera fortement liée aux propriétés du sol récepteur et aux cultures qui sont envisagées.

Les premiers retours d'expériences sont d'ores et déjà encourageants pour le développement de cette filière, en particulier la valorisation en reconstitution de sol, pour des opérations de végétalisation ou d'aménagements paysagers ou urbains. En effet, la majorité des sédiments étant comparable, d'un point de vue agronomique, à des « terres banales », beaucoup d'applications seraient potentiellement réalisables. Il reste donc à poursuivre les démarches scientifiques expérimentales pour qu'une utilisation plus massive et au travers de multiples usages, soit possible.

CONCLUSION DU CHAPITRE

La connaissance des filières est la base pour envisager une valorisation. Un certain nombre de recommandations et exigences existe pour chacune d'entre elles. Cependant, ces spécifications concernent principalement les propriétés des produits finaux et assez peu la matière première. Certaines règles et théories, la plupart du temps issues de recherches scientifiques ou de retours d'expériences, énoncent quelques principes quant aux choix des matières premières adaptées lorsqu'elles ne sont pas définies dans des normes ou guides techniques. Ce savoir-faire, consistant à sélectionner des matières premières avec des caractéristiques adaptées ou adaptables, est le plus souvent détenu par des groupes industriels.

Afin d'aboutir à des critères d'évaluation des caractéristiques des sédiments fins de barrage au regard des critères d'entrée dans les filières de valorisation, il fallait s'attacher à identifier les caractéristiques des matières couramment utilisées dans chacun des domaines et les différentes contraintes liées aux voies de valorisation.

Parmi les contraintes, la non prise en considération des sédiments dans la réglementation ou dans les normes est un véritable obstacle. En effet, alors même que des sédiments de dragage pourraient présenter les propriétés adaptées, le simple fait qu'ils ne soient pas cités dans certains documents de référence est un frein à l'utilisation. C'est une situation que l'on retrouve couramment. Par exemple dans le cas d'une utilisation dans un béton, il existe une liste exhaustive des additions pouvant rentrer dans la composition du béton pour qu'il soit normalisé selon la norme NF EN 206-1. Cependant, une utilisation des sédiments reste possible dans des produits n'ayant pas besoin d'un béton normalisé. Presque 1/5^{ème} du béton produit en France est utilisé pour des éléments non-structurants (le mobilier urbain, par exemple) dans lesquels des sédiments pourraient être incorporés.

Il en est de même si l'on envisage une valorisation agronomique dans le cadre de la « logique produit », où des listes exhaustives existent. Même si des sédiments possèdent des caractéristiques définies dans la norme, et qu'ils auraient donc les mêmes effets que les produits normalisés, les dénominations ne les désignent pas clairement. Il est donc délicat de pouvoir attribuer le statut de produit aux sédiments extraits dans le cadre normatif actuel. Pour une utilisation agricole, il faut donc suivre la logique « déchet ». Si un épandage est envisagé, la réglementation à suivre est celle des boues de STEP. Or, ces déchets ne présentent pas les mêmes caractéristiques que les sédiments. Ils sont très fortement organiques et riches en éléments nutritifs. En appliquant cette réglementation mal adaptée aux sédiments, car ayant plus de minéraux, les volumes valorisables s'en trouvent fortement limités. Dans tous les cas, il serait intéressant de voir évoluer le cadre normatif et/ou réglementaire avec simplement une prise en compte des sédiments issus des dragages lorsqu'ils possèdent les caractéristiques requises.

Toujours dans le cadre d'un usage agronomique, une solution qui semble prometteuse est la valorisation des sédiments comme terre végétale. Les besoins sont en effet importants dans les zones urbaines dans le cadre de projets d'aménagement. Le mode d'approvisionnement classique, consistant à décaper des terres agricoles en périphérie des villes est de plus en plus discuté. De plus, pour certaines grandes aires urbaines, il faut aller chercher de la terre de plus en plus loin. La terre végétale devient alors un produit onéreux qui pourrait être substitué par des sédiments. Ceux-ci semblent en effet posséder des propriétés chimiques similaires à celles des terres « classiques ». Des incertitudes existent cependant quant à leur capacité à se restructurer. Des mélanges avec des composts seraient alors une solution pour pallier ce problème potentiel.

Dans les voies utilisant un procédé thermique, c'est-à-dire les filières de valorisation « ciment » et « céramique », un intérêt spécifique est porté à la composition chimique en éléments majeurs. Celle-ci est liée à la nature du cortège minéral des sédiments. Les caractéristiques des sédiments fins sont, logiquement, assez similaires à celles des matériaux naturels issus des carrières : argile et/ou calcaire.

Les études menées ont montré de bonnes aptitudes des sédiments fins pour être employés comme substitution partielle des matières premières. Ces filières étaient investiguées car elles permettent un traitement thermique qui a pour conséquence d'inertiser ou détruire les contaminants anthropiques (ETM et/ou CTO) que renferment parfois les sédiments fins.

Pour ces deux filières, des carrières sont proches des usines de fabrication. On peut envisager d'utiliser une partie de la carrière comme aire de décantation si les sédiments arrivent avec une teneur en eau élevée et de constituer un stock tampon en vue d'une utilisation dans le temps.

Les cimenteries bénéficient d'un très important retour d'expériences en ce qui concerne l'utilisation de matières alternatives, souvent des déchets. Il faut que les grands groupes prennent en considération les sédiments comme une véritable ressource minérale, qui leur permet de faire des économies dans l'exploitation de leurs carrières, et non comme un banal déchet à éliminer.

Dans le cas des usines de terre cuite, l'utilisation de matériaux alternatifs dans le mélange de matière première n'est pas courante. Les exigences sur la matière première sont aussi plus importantes. Il est nécessaire d'acquérir davantage de connaissances en mettant en place des essais pilotes. En parallèle, il est nécessaire de bien caractériser les gisements de sédiments fins à proximité des usines de terre cuite afin d'assurer la qualité de la matière première et l'homogénéité de ses propriétés dans le temps.

Beaucoup de travaux de valorisation se sont tournés vers la filière « matériau routier et ouvrages assimilés ». Les études sont principalement restées à l'échelle du laboratoire mais quelques réalisations en vraie grandeur ont vu le jour. Tous ces travaux démontrent que l'utilisation de matériaux issus de dragages comme matériau routier est envisageable, après un traitement à base de liants et/ou de l'ajout d'un correcteur granulométrique. Le contexte amorce une évolution dans cette filière, et commence à reconnaître l'utilisation des sédiments. Par exemple, le guide méthodologique « chapeau » sur les matériaux alternatifs en technique routière [SETRA, 2011] prévoit une application potentielle aux déblais de dragage. De même, on retrouve les sédiments comme un gisement de matériau dans la base OFRIR2 (2013) « *Observatoire Français des Ressources pour les Infrastructures* », développée par des organismes reconnus en matière d'infrastructures routières et de gestion des déchets. Ces matériaux restent cependant dans la catégorie des matériaux naturels « hors spécifications ».

Chapitre 3

ORIGINE ET CARACTERISATIONS DES SEDIMENTS

SOMMAIRE DU CHAPITRE

Introduction.....	132
1. Origine et prélèvement des sédiments étudiés	133
1.1. Localisation des sédiments prélevés et codification	133
1.2. Le sédiment DUR	133
1.3. Le sédiment GAR	134
1.4. Le sédiment ISE.....	135
1.5. Le sédiment RHI.....	135
2. Caractérisations minérale et géotechnique des sédiments.....	137
2.1. Caractérisation physico-chimique.....	138
2.2. Caractérisation minéralogique	145
2.3. Caractérisation hydromécanique.....	153
2.4. Synthèse des principales caractéristiques des sédiments	163
3. Caractérisation agronomique.....	164
3.1. Paramètres analysés	164
3.2. Résultats de la caractérisation agronomique	164
4. Interprétation des résultats selon les filières.....	168
4.1. La filière « ciment ».....	168
4.2. La filière « bétons, mortiers, coulis »	170
4.3. La filière « matériau routier et ouvrage géotechnique »	172
4.4. La filière « matériau céramique »	174
4.5. La filière « agronomie ».....	177
Conclusion du chapitre.....	182

INTRODUCTION

La première étape, essentielle et obligatoire, dans la recherche de valorisation de matériaux est la caractérisation. Une bonne connaissance du sédiment est indispensable pour optimiser la probabilité de trouver une valorisation. Ainsi, cette phase est décisive, pour apprécier le potentiel de valorisation de chacune des voies et pré-orienter les sédiments vers les filières les plus adéquates.

Les caractérisations sont réalisées pour les cinq filières de valorisation pressenties comme étant les plus pertinentes. Rappelons qu'il s'agit de l'utilisation dans la fabrication du ciment, l'intégration dans le béton, la préparation d'un matériau routier ou assimilé, la conception d'un matériau céramique et les utilisations agronomiques. La justification de leur choix, leur principe de mise en œuvre, ainsi que leurs spécifications respectives sont décrits dans les chapitres précédents.

Les sédiments caractérisés proviennent de quatre retenues hydroélectriques. Certains paramètres sont recherchés pour tous les sédiments et d'autres pour seulement trois sédiments. Tous les essais et analyses ne sont pas systématiquement réalisés. En effet, les caractérisations sont adaptées aux filières investiguées. L'adéquation sédiments prélevés et filières a été conduite de la manière suivante. Les sédiments de deux retenues, considérées à plus forts enjeux pour EDF, font l'objet d'une étude pour chacune des cinq filières choisies. Un troisième, voire un quatrième sédiment issu d'autres retenues ont été associés aux deux précédents. Ainsi, il y a au moins trois sédiments différents qui sont étudiés dans chaque filière pressentie afin d'esquisser des typologies.

Pour mener à bien les essais de caractérisation sur les sédiments en relation avec les filières de valorisation pressenties, différents laboratoires ont été sollicités en fonction de leurs compétences. Il s'agit du LERM pour les filières ciment et béton, de SAS Laboratoire pour les filières agronomiques, de l'ENSCI pour la filière matériaux céramiques et de l'UMR CNRS 6143 « laboratoire M2C » pour les essais géotechniques relatifs à la filière technique routière et au comportement hydro-mécanique.

La première section de ce chapitre concerne la description des différentes campagnes de prélèvements, à savoir les conditions de prélèvement, les difficultés rencontrées et les observations relatives aux différents lots prélevés de sédiments. La deuxième section décrit le principe des essais et le matériel utilisé puis renseigne sur les différentes caractéristiques des sédiments étudiés. La caractérisation agronomique, à elle seule, fait l'objet d'une troisième section. Enfin, la dernière section de ce chapitre s'attache à interpréter les résultats des caractérisations selon les spécifications d'entrée des filières de valorisation pour lesquelles pourraient être employés les sédiments fins des retenues hydroélectriques.

1. ORIGINE ET PRELEVEMENT DES SEDIMENTS ETUDIES

1.1. LOCALISATION DES SEDIMENTS PRELEVES ET CODIFICATION

Ce sont quatre retenues hydroélectriques qui ont fait l'objet de prélèvements de sédiments, pour satisfaire les essais de caractérisation nécessaires aux filières de valorisation étudiées. Leur localisation apparemment dispersée sur l'ensemble du territoire est telle qu'elle correspond au schéma de répartition nationale des retenues hydroélectriques.

Le choix des retenues a été fait en concertation avec les ingénieries de l'Hydraulique d'EDF afin d'avoir des sédiments représentatifs de typologie différente. Ce sont des matériaux fins qui ont été prélevés pour les quatre sites afin de répondre à la problématique de leur valorisation.

Les sédiments étudiés, issus de quatre sites, ont été codifiés avec trois lettres : DUR, GAR, ISE et RHI. La figure 3-1 en donne la répartition géographique. Par la suite, les sédiments seront référencés avec ces mêmes lettres.

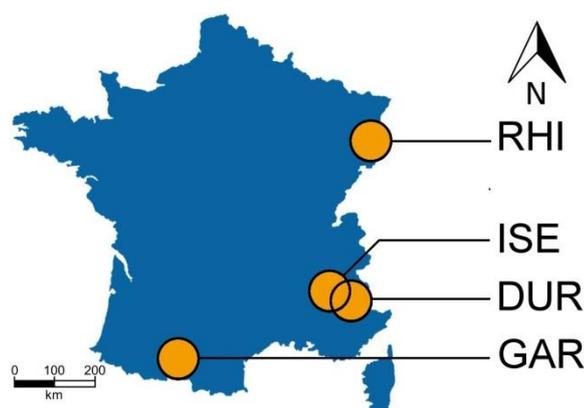


Figure 3-1. Localisation des quatre retenues hydroélectriques prélevées

1.2. LE SEDIMENT DUR

Les sédiments ont été prélevés dans le lit de la Durance, dans la retenue de Serre-Ponçon en février 2012. La zone où ont été prélevés les sédiments se trouve en queue de retenue. Cette zone a été choisie car des alluvions anciennes sont exploitées dans cette zone durant certaines périodes de l'année. Historiquement, avant la mise en eau du barrage de Serre-Ponçon, les anciennes terrasses fluviales pouvaient avoir un rôle de carrières alluvionnaires.

A présent, l'exploitation des granulats est entravée par le niveau d'eau durant les périodes de hautes eaux et par les dépôts de sédiments fins. En effet, lorsque les terrasses sont immergées, une sédimentation a lieu recouvrant les terrasses et contraignant l'exploitation de la carrière car les dépôts récents, de par leur finesse, ne sont actuellement pas exploités.

Durant les périodes d'exploitation, la première phase consiste à décapier les sédiments fins pour accéder aux sédiments anciens grossiers qui sont ensuite utilisés en tant que granulats. Ce n'est qu'après cette phase que l'exploitation peut commencer. En fin de campagne, avant la période de hautes eaux, les sédiments fins décapés sont remis en place.

C'est durant la phase de décapage des sédiments fins que ceux-ci ont été prélevés. Ils ont été extraits avec un engin de chantier terrestre, une pelle mécanique.

La zone de prélèvement émergeait avec un niveau d'eau relativement bas, établi depuis une période assez longue. De ce fait, la traficabilité des engins de chantier était possible et les matériaux étaient secs. Les sédiments sont homogènes, de couleur gris clair et apparemment dépourvus de matière organique.



Figure 3-2. (a) Extraction des sédiments fins dans la queue de retenue de Serre-Ponçon
(b) Aspect visuel et conditionnement en bidons hermétiques des sédiments DUR

1.3. LE SEDIMENT GAR

La campagne de prélèvements s'est effectuée dans la retenue de Saint-Vidian sur la Garonne. Rappelons qu'une des filières pressenties dans nos travaux s'intéresse aux ciments et que l'effet de proximité est considéré. Or, une cimenterie se trouve sur la rive gauche de la retenue. Les prélèvements se situent dans des zones d'accumulation de sédiments.

Deux sites ont donné lieu à l'ensemble des prélèvements. Un des sites se trouve à proximité d'un camping, en rive gauche, à l'amont du pont autoroutier. Le second site, distant d'un peu plus d'un kilomètre, est proche de la cimenterie Lafarge de Martres. Il est en aval du pont autoroutier et plus proche du barrage, coté amont.

Les prélèvements ont été effectués le vendredi 14 septembre 2012. L'opération a été menée à partir d'une petite embarcation motorisée. Les prélèvements ont été effectués d'une part à l'aide d'une benne de type Eckman et d'autre part à l'aide de tubes carotteurs. Les profondeurs d'eau relatives à la zone des prélèvements oscillaient entre 0,4 m et 1,0 m. Ces modes de prélèvements n'ont pas posé de problème particulier pour prélever les sédiments du cours d'eau. L'aspect des sédiments à la sortie de l'eau est visible à la figure 3-3b.



Figure 3-3. (a) Sédiment à l'intérieur du tube carotteur
(b) Aspect visuel des sédiments GAR à la sortie de l'eau

L'aspect visuel des sédiments est le même pour tous les points de prélèvement des deux zones d'échantillonnage proches du camping ou de la cimenterie. Les sédiments extraits sont gris/brun sombres avec une présence de sable fin.

1.4. LE SEDIMENT ISE

La zone de prélèvement des sédiments ISE a été sélectionnée de manière à ce que les sédiments possèdent les caractéristiques des matériaux fins entrant dans la retenue. Ce positionnement a été recommandé par les experts EDF en transport sédimentaire du LNHE comme une zone où les dépôts sont homogènes et représentatifs des matières minérales venant sédimenter dans la retenue.

Les prélèvements ont été effectués le mercredi 06 juin 2012. L'opération s'est faite à partir d'une barge équipée d'une benne preneuse hydraulique (Figure 3-4). Les sédiments ont été extraits à une profondeur de 50 m sous la surface du plan d'eau.

Les sédiments ISE sont homogènes et présentent une couleur grise relativement claire. Ils sont en apparence fins et à forte proportion minérale. Les sédiments ne semblent pas présenter de différence entre les deux prises.

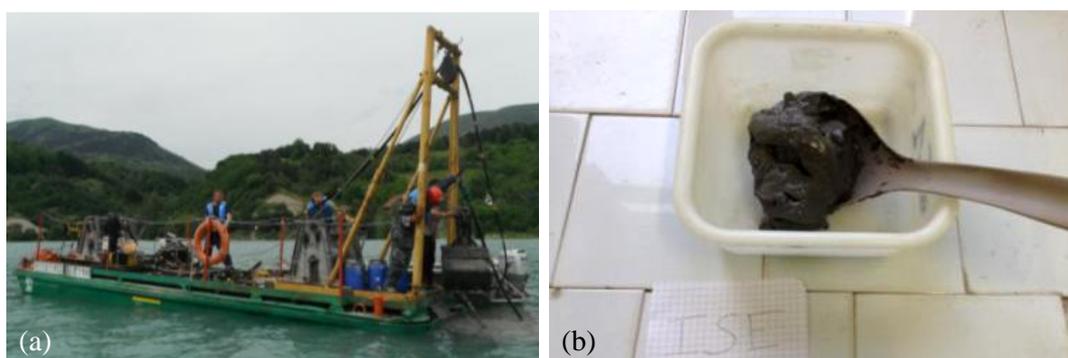


Figure 3-4. (a) Barge utilisée, équipée d'une benne preneuse hydraulique ;
(b) Aspect visuel des sédiments ISE avant essais d'identification

1.5. LE SEDIMENT RHI

La campagne de prélèvement a eu lieu à l'amont immédiat du barrage de Marckolsheim. Elle a donné lieu à différentes prises d'échantillons en plusieurs points de la zone.

Les prélèvements des sédiments RHI ont été réalisés dans une zone où la sédimentation est assez forte et contraignante. Des opérations de curage sont couramment menées et nécessaires pour assurer le bon écoulement des crues.

Les prélèvements ont eu lieu le mardi 04 septembre 2012. L'opération a été menée à partir d'une petite embarcation motorisée. Les prélèvements ont été effectués à l'aide d'une benne type Van Veen, voir figure 3-5.



Figure 3-5. Matériel utilisé pour la campagne de prélèvement des sédiments RHI
(a) Embarcation motorisée ; (b) Benne Van Veen

Il n'y a pas eu de difficultés notables pour extraire les sédiments du cours d'eau. Les sédiments ont été extraits à une profondeur comprise entre 1,3 m et 9,0 m sous la surface du plan d'eau.

Au remplissage des bidons, une analyse visuelle a permis de constater que les sédiments présentaient quelques différences avec présence ou non de matières organiques, végétales ou animales. On note en particulier la présence :

- d'algues au droit des prélèvements proches de la rive gauche,
- de débris végétaux (feuilles plus ou moins décomposées),
- de mollusques de type *Corbiculidae* en rive gauche.

2. CARACTERISATIONS MINERALE ET GEOTECHNIQUE DES SEDIMENTS

Pour mener à bien les essais de caractérisation sur les sédiments en relation avec les filières de valorisation pressenties, différents laboratoires ont été désignés en fonction de leurs compétences. Il s'agit du LERM pour les filières ciment et béton, de SAS laboratoire pour la filière agronomie, de l'ENSCI pour la filière matériaux céramiques et le laboratoire M2C pour les essais géotechniques et hydromécaniques. Au-delà des essais de caractérisation, des études spécifiques de valorisation ont parfois été demandées à ces différents laboratoires ou écoles. Ces essais de valorisation sont présentés dans le chapitre 4.

Dans la phase de caractérisation, certains paramètres sont recherchés soit pour l'ensemble des sédiments, soit limités à trois sédiments. Tous les essais et analyses se sont pas systématiquement réalisés. En effet, les caractérisations sont adaptées aux filières investiguées. L'adéquation sédiments prélevés et filières a été conduite de la manière suivante. Deux retenues sont considérées à forts enjeux pour EDF et les sédiments prélevés correspondant font l'objet d'une étude pour chacune des cinq filières choisies. Un troisième, voire un quatrième sédiment issus d'autres retenues ont été associés aux deux précédents. Ainsi, il y a au moins trois sédiments différents qui sont étudiés dans chaque filière pressentie afin d'esquisser des typologies.

Le tableau 3-1 indique les paramètres et essais de caractérisation présentés dans ce chapitre et désigne les laboratoires d'où sont issus les résultats. Il permet de lister les paramètres de caractérisation des sédiments étudiés.

Tableau 3-1. Sédiments étudiés, laboratoires et paramètres de caractérisation

<i>Caractérisation</i>	<i>Paramètres et essais</i>	<i>Laboratoire</i>	<i>Sédiments</i>			
			<i>DUR</i>	<i>GAR</i>	<i>ISE</i>	<i>RHI</i>
<i>Physico-chimique</i>	<i>Analyse granulométrique</i>	<i>M2C</i>	X	X	X	X
	<i>Surface spécifique Blaine</i>	<i>LERM</i>		X	X	X
	<i>Surface spécifique BET</i>	<i>ENSCI</i>	X		X	X
	<i>Limites d'Atterberg</i>	<i>M2C</i>	X	X	X	X
	<i>Valeur au bleu</i>	<i>M2C</i>	X	X	X	X
	<i>Teneur en matière organique</i>	<i>M2C</i>	X	X	X	X
	<i>Masse volumique des particules</i>	<i>M2C</i>	X	X	X	X
	<i>Analyse chimique des éléments majeurs</i>	<i>LERM</i>		X	X	X
	<i>Analyse chimique ETM</i>	<i>LERM</i>		X	X	X
<i>Minéralogique</i>	<i>DRX</i>	<i>LERM</i>		X	X	X
	<i>DRX sur lame orientée (argile)</i>	<i>M2C</i>	X	X	X	X
	<i>ATD-ATG</i>	<i>LERM</i>		X	X	X
	<i>Teneur en CaCO₃ (par calcimétrie)</i>	<i>M2C</i>	X	X	X	X
<i>Hydromécanique</i>	<i>M2C</i>	X	X	X	X	
<i>Agronomique</i>	<i>SAS laboratoire</i>	X	X	X	X	

2.1. CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE

2.1.1. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a pour objectif de déterminer les dimensions et la distribution des grains constituant le matériau. La technique de granulométrie est à adapter selon la taille présumée des particules. Ici, la technique utilisée est celle de la diffraction laser en voie humide.

► Principe

La granulométrie au laser repose sur la diffraction d'un faisceau laser par des particules en suspension dans un liquide et permet d'explorer une large gamme de particules. L'angle de diffraction est inversement proportionnel à la taille des particules supposées sphériques.

Le granulomètre utilisé est de type Coulter LS230 et permet l'étude d'une gamme allant de 0,04 à 2 000 μm . Ainsi, la technique d'analyse par granulométrie laser a permis d'identifier précisément la taille des particules constituant les sédiments fins.

► Résultats

Pour chaque sédiment, les courbes présentées dans la figure 3-6 sont des moyennes de plusieurs courbes. Le tableau 3-2 récapitule les valeurs caractéristiques obtenues pour chaque sédiment fin testé.

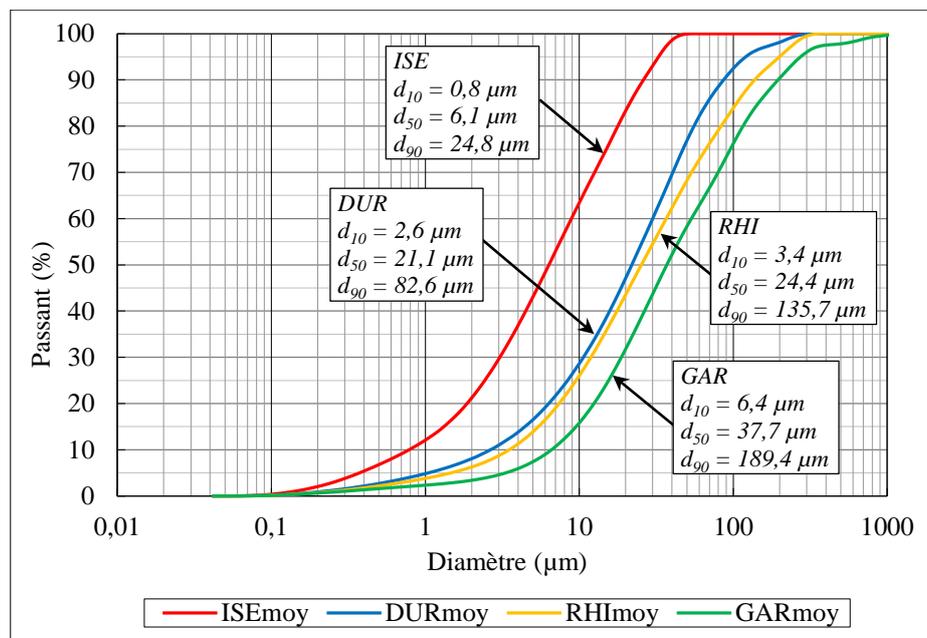


Figure 3-6. Distribution granulométrique des sédiments

Tableau 3-2. Données granulométriques des sédiments

	<i>DUR</i>	<i>GAR</i>	<i>ISE</i>	<i>RHI</i>
Fraction argileuse < 2 μm (%)	7,8	3,4	21,2	6,3
Fraction limoneuse 2 à 63 μm (%)	75,5	60,6	78,8	67,5
Fraction sableuse > 63 μm (%)	16,7	36,0	0	26,2
Passant à 80 μm	88,5	70,1	100	79,1

Les sédiments de barrages étudiés contiennent des particules fines. Les sédiments se positionnent dans un même fuseau dont la classe granulaire est 0,1 μm / 1 mm. Pour tous les sédiments, le diamètre

moyen d_{50} est inférieur à 40 μm . Le sédiment le plus fin de l'ensemble étudié est le sédiment ISE. Il est totalement dépourvu de fraction sableuse ($> 63 \mu\text{m}$). Le sédiment GAR sera le plus grossier.

2.1.2. Surface spécifique

La surface spécifique est le rapport entre la surface d'un solide et sa masse ou son volume. La valeur de la surface spécifique d'un matériau dépend de la méthode de mesure utilisée. Les surfaces spécifiques des sédiments ont été déterminées avec les deux méthodes les plus couramment employées.

► *Principe de la surface spécifique par perméabilimétrie (appareil Blaine)*

Le perméabilimètre Blaine permet de mesurer l'aire massique d'une poudre. D'ailleurs cette technique est couramment employée pour déterminer la « finesse Blaine », sous forme de surface massique, des ciments ou de certaines additions pour le béton hydraulique en appliquant la norme NF EN 196-6 relative à cet essai.

Cette mesure repose sur les lois d'écoulement d'un fluide visqueux. Elle consiste à mesurer le temps que met un volume d'air constant, à la pression atmosphérique et à température connue, à traverser un lit de poudre tassée dans des conditions bien définies. La surface spécifique mesurée représente l'aire de l'enveloppe des particules, sans tenir compte des pores fermés ou en cul-de-sac, éventuellement présents.

► *Principe de la surface spécifique par absorption d'azote (méthode BET)*

La surface spécifique peut aussi être estimée à partir de la quantité d'azote adsorbée en relation avec sa pression à la température d'ébullition de l'azote liquide et sous une pression atmosphérique normale. La méthode est basée sur la détermination de la quantité de gaz d'adsorption nécessaire pour couvrir la surface externe du solide et celle de ses pores internes accessibles par une monocouche complète d'adsorbat. Les informations sont interprétées selon le modèle de Brunauer, Emmett et Teller (méthode BET). La norme NF EN ISO 18757 détaille le matériel utilisé et le mode opératoire.

► *Résultats*

Le tableau 3-3 donne les valeurs obtenues pour les surfaces spécifiques des sédiments étudiés avec le perméabilimètre Blaine et la méthode BET.

Tableau 3-3. Finesse des sédiments étudiés

	<i>DUR</i>	<i>GAR</i>	<i>ISE</i>	<i>RHI</i>
Surface spécifique Blaine (cm^2/g)	-	4 370	$> 7\,000^*$	5 120
Surface spécifique BET (m^2/g)	6,67 – 6,82	-	11,91 – 12,15	6,87 – 6,99

*au delà de la plage de fonctionnement nominal du perméabilimètre

Les valeurs obtenues avec le perméabilimètre de Blaine vont de 4 370 cm^2/g pour le sédiment GAR à plus de 7 000 cm^2/g pour le sédiment ISE. Ces valeurs coïncident bien avec les résultats de l'analyse granulométrique puisque le sédiment GAR et le sédiment ISE sont respectivement le plus grossier et le plus fin.

Les surfaces spécifiques BET obtenues à l'aide de la méthode par adsorption d'azote sont largement supérieures à celles déduites de la mesure de perméabilité. On trouve en effet des surfaces spécifiques allant de 6,67 à 12,15 m^2/g .

Selon la méthode employée, Michel et Courard [2006] observent aussi des valeurs très différentes des surfaces spécifiques de fillers calcaires. Ils constatent que si les grains ont une morphologie de surface rugueuse ou qu'il y a une présence de minéraux argileux, la surface spécifique BET va être beaucoup plus importante que celle obtenue à l'aide du perméabilimètre Blaine.

2.1.3. Teneurs en eau caractéristiques

Les limites d'Atterberg définissent à la fois des indicateurs qualifiant la plasticité d'un sol ou d'un matériau assimilable, et renseignent également sur son comportement. Ces limites sont employées en géotechnique comme critère de classement des sols fins. Elles permettent en effet de caractériser l'argilosité des sols. Les limites de liquidité et de plasticité sont les teneurs en eau correspondant à des états particuliers d'un sol :

- Limite de liquidité (w_L) : c'est la teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre l'état liquide et plastique.
- Limite de plasticité (w_P) : c'est la teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre l'état plastique et solide.

Les caractéristiques sont complétées par l'indice de plasticité I_P qui s'exprime en %. Il est donné par la formule ci-après :

$$I_P = w_L - w_P \quad (\text{Eq. 13})$$

Ainsi, l' I_P définit en réalité l'intervalle de teneur en eau dans lequel le sol reste souple et déformable tout en conservant une certaine résistance au cisaillement. La connaissance de cet intervalle est d'une manière générale très utile dans la conception des ouvrages en terre.

Les valeurs de w_L , w_P et I_P sont notamment fonction de la proportion et de la nature des particules argileuses contenues dans les sols ou sédiments. Les limites de liquidité ont été déterminées avec la méthode de Casagrande, selon la norme NF P 94-051.

► *Principe des essais pour la détermination des limites*

L'essai consiste à déterminer la relation entre la teneur en eau et le nombre de chocs imposés à une coupelle contenant le matériau, induisant la fermeture, sur 1 cm, d'une rainure préalablement formée dans le matériau. Par définition, la limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à une fermeture sur un centimètre pour 25 chocs.

La limite de plasticité est déterminée par la méthode du rouleau. Par définition, la limite de plasticité est définie comme la teneur en eau du cylindre qui se brise en 2 ou 3 morceaux au moment où son diamètre atteint 3 mm.

► *Résultats*

Les résultats issus de ces essais pour les différents sédiments sont récapitulés dans le tableau 3-4.

Tableau 3-4. Limites d'Atterberg des sédiments étudiés

	<i>DUR</i>	<i>GAR</i>	<i>ISE</i>	<i>RHI</i>
<i>Limite de liquidité (%)</i>	39	76	46	71
<i>Limite de plasticité (%)</i>	30	50	30	46
<i>Indice de plasticité (%)</i>	9	26	16	25

A partir de la connaissance des limites d'Atterberg des sédiments, des classifications peuvent être effectuées. Le diagramme le plus utilisé en géotechnique pour classer les sols fins est celui de Casagrande. Ce diagramme a pour abscisse w_L et I_P en ordonnée. La figure 3-7 est la synthèse de l'ensemble des valeurs obtenues pour tous les sédiments. Selon les domaines et les classifications, d'autres diagrammes employant ces paramètres existent.

A partir de la classification de Casagrande utilisée dans la figure 3-7, il est possible de constater que tous les sédiments peuvent être assimilés à des sols limoneux. Cependant, la plasticité est plus prononcée pour les sédiments RHI et GAR. En effet, ces derniers sont considérés comme « très plastiques » alors que les sédiments DUR et ISE sont considérés comme ayant un caractère « peu plastique », du fait que leur limite de liquidité soit inférieure à 50 %.

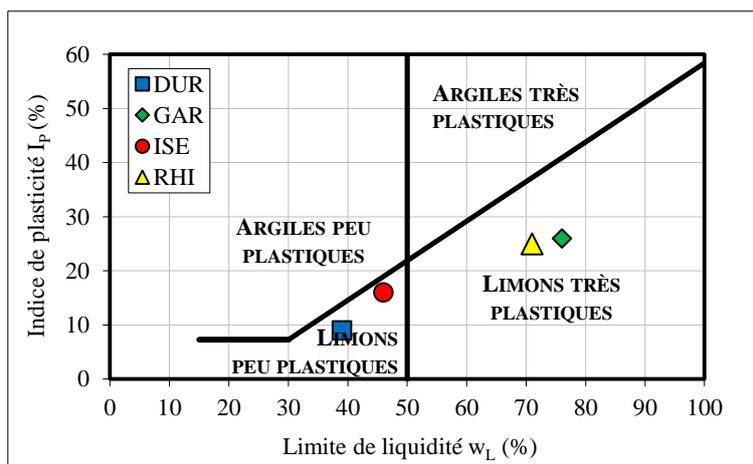


Figure 3-7. Classification des sédiments sur le diagramme de Casagrande

2.1.4. Valeur au bleu

Il s'agit aussi d'un paramètre permettant de caractériser l'argilosité d'un sol. Son application est plus récente que les limites d'Atterberg. Cet essai est également réalisé pour caractériser les fines de granulats ou certaines additions pour le béton.

En géotechnique, ce paramètre est noté VBS (valeur au bleu du sol). Il représente la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les surfaces externes et internes des particules argileuses contenues dans le sédiment étudié.

Selon Corte *et al.* [1992], bien que la valeur au bleu présente des avantages techniques et pratiques, l'utilisation du paramètre I_p est à privilégier pour les sols constitués quasi-exclusivement d'éléments inférieurs à 400 μm et pour lesquels la valeur de I_p est supérieure à 12.

Sur la figure 3-8, issue des travaux de Lautrin [1989], des correspondances de valeurs entre la VBS et I_p sont données bien qu'il n'y ait pas de correspondance étroite.

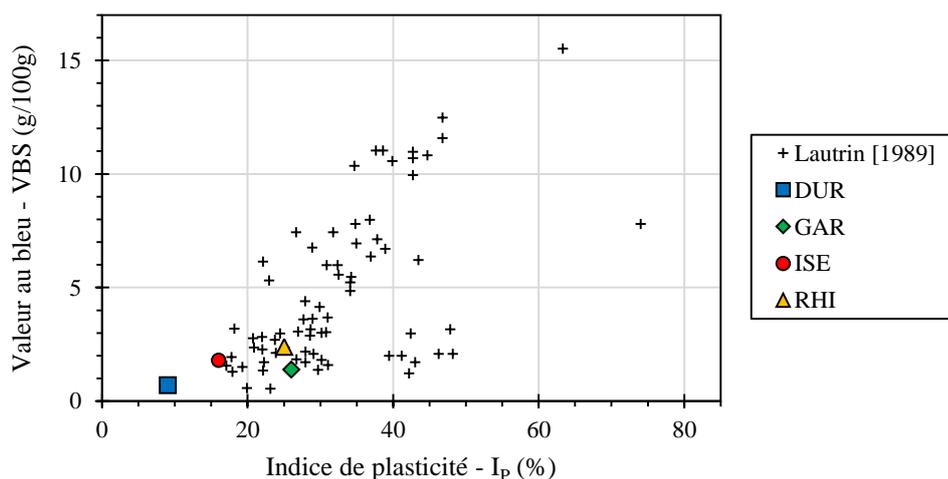


Figure 3-8. Variation de la valeur au bleu en fonction de l'indice de plasticité I_p

► Principe de l'essai

Les valeurs au bleu des sédiments ont été déterminées par l'essai au bleu de méthylène « à la tâche » selon la norme NF P 94-068. Cet essai consiste à introduire progressivement du bleu de méthylène dans une suspension de sol maintenue en agitation. On prélève périodiquement une goutte

de la suspension que l'on dépose sur un papier chromatographique. Dès qu'une auréole bleutée se développe autour de la tache ainsi formée, on peut considérer que l'adsorption du bleu de méthylène sur les particules d'argile est terminée. En effet, c'est l'excès de bleu de méthylène qui apparaît dans l'auréole.

La valeur au bleu de méthylène des sédiments est exprimée en grammes de bleu pour 100 g de sédiment.

► **Résultats**

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 3-5.

Tableau 3-5. Valeurs au bleu des sédiments étudiés

	DUR	GAR	ISE	RHI
Valeur au bleu VBS (g/100g)	0,7	1,4	1,8	2,4

En utilisant les seuils énoncés dans le GTR, il est possible de constater que tous les sédiments étudiés ont une sensibilité à l'eau (VBS > 0,2 g/100g) et un caractère limoneux. Pour les sédiments DUR et GAR, avec des VBS respectives de 0,7 et 1,4 g/100g, ils sont assimilés, selon le GTR à des sols sablo-limoneux. Les sédiments ISE et RHI, avec 1,8 et 2,4 g/100g, sont eux assimilés à des sols sablo-argileux.

2.1.1. Teneur en matière organique

Pour toutes les filières de valorisation des sédiments pressenties, la teneur en matière organique est un paramètre très influent. Pour les filières « minérales », plus la teneur est élevée, plus des caractéristiques indésirables à la valorisation sont à prévoir. La détermination de la proportion de matière organique s'avère donc importante.

► **Principe**

Les teneurs en matières organiques ont été déterminées à partir de la mesure du pourcentage pondéral de matière organique après calcination à 550°C sur une durée de 4h selon la norme NF EN 12879. Il s'agit donc d'une estimation à partir de la matière volatilisée par calcination de la matière sèche.

► **Résultats**

Pour l'ensemble des essais réalisés sur les sédiments, les teneurs en MO sont consignées dans le tableau 3-6. Il s'agit de valeurs moyennes. L'incertitude donnée dans le tableau est l'écart type calculé sur l'ensemble des valeurs pour chaque sédiment.

Tableau 3-6. Teneurs en matières organiques des sédiments étudiés

	DUR	GAR	ISE	RHI
Teneur moyenne en MO (en %)	3,0 ± 0,5	9,1 ± 0,7	3,6 ± 0,3	6,9 ± 0,4

Les teneurs en MO des sédiments étudiés vont de 3,0 à 9,1 %. Une distinction peut être faite entre les sédiments ISE et DUR, pour qui la teneur en MO est proche de 3 % et les sédiments RHI et GAR qui présentent des teneurs supérieures à 6 %.

2.1.2. Masse volumique des particules

La masse volumique des particules solides (ρ_s) – ou masse volumique absolue –, est la masse par unité de volume des sédiments, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains.

$$\rho_s = m_s / V_s \quad (\text{Eq. 14})$$

avec : m_s la masse des particules solides ; V_s le volume des particules solides

► Principe

Les masses volumiques des particules solides ont été déterminées avec la méthode du pycnomètre à eau, selon la norme NF P 94-054. Ainsi, l'échantillon est séché et pesé, puis transféré dans un pycnomètre calibré et taré. Il permet de mesurer des volumes avec une grande précision. Le volume des particules est déduit par pesée à l'aide du pycnomètre en substituant de l'eau de masse volumique connue aux particules solides.

► Résultats

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 3-7.

Tableau 3-7. Masse volumique des particules solides des sédiments étudiés

	<i>DUR</i>	<i>GAR</i>	<i>ISE</i>	<i>RHI</i>
Masse volumique des grains ρ_s (en g/cm^3)	2,74	2,65	2,71	2,59

Dans le cas de la majorité des sols, la masse volumique des grains est comprise entre 2,6 et 2,8 g/cm^3 [Schlosser, 2003]. Il est possible d'obtenir des valeurs plus faibles si le sol a une teneur en matière organique élevée. C'est le cas des sédiments étudiés, où les deux valeurs les plus faibles sont attribuées aux sédiments RHI et GAR. Ce sont également les deux sédiments qui contiennent des matières organiques en quantité significative (voir figure 3-1).

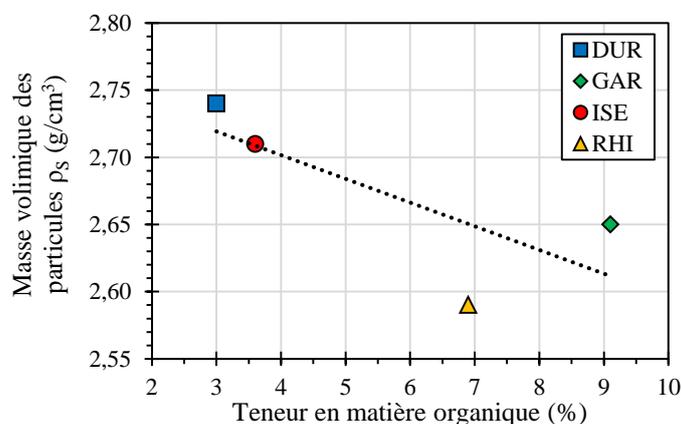


Figure 3-9. Relation entre la teneur en matière organique et la masse volumique des grains des sédiments étudiés

2.1.3. Analyse chimique des éléments majeurs

La détermination des éléments majeurs permet d'avoir une connaissance globale des sédiments étudiés. Cette analyse des éléments majeurs (Si, Al, Na, K, Ca, Mg, Fe, P, Ti, Mn, Sr) a été réalisée par spectrométrie d'émission atomique à plasma inductif (ICP-AES Varian) après fusion alcaline (métaborate de lithium). La perte au feu a été mesurée selon le principe de la norme NF EN 196-2. La teneur en sulfate (SO_3) a été déterminée par chromatographie ionique après attaque acide ménagée à l'acide chlorhydrique.

Les résultats obtenus pour l'analyse chimique des éléments majeurs, exprimés sous forme d'oxydes, sont regroupés dans le tableau 3-8.

Les éléments chimiques principaux qui constituent les sédiments étudiés sont la silice, l'alumine, le calcium et l'oxyde de fer. Parmi les trois sédiments analysés, le sédiment RHI présente la plus forte teneur en calcium (18,43 %) et les plus faibles teneurs en silice (43,12 %), alumine (7,9 %) et en oxyde de fer (3,00 %). Avec 22,8 %, la perte au feu de ce sédiment est aussi la plus élevée. Le sédiment GAR contient la plus forte teneur en silice (56,31 %) et la plus faible teneur en calcium (4,13 %). Les pertes au feu des sédiments GAR et ISE sont de l'ordre de 14 %. La perte au feu est liée à la décarbonation, à la destruction des matières organiques et la perte de l'eau de constitution des argiles (déshydroxylation des phyllosilicates).

Tableau 3-8. Résultats de l'analyse chimique des éléments majeurs des sédiments étudiés (exprimés sous forme d'oxydes en pourcentage massique)

Référence	PF	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	SrO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
DUR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GAR	13,4	56,31	14,74	5,59	4,13	1,93	0,83	0,06	0,21	0,02	0,73	1,82	0,15
ISE	14,4	47,31	14,16	4,94	13,03	2,10	0,66	0,16	0,17	0,05	0,95	2,14	0,09
RHI	22,8	43,12	7,9	3,00	18,43	2,44	0,40	0,06	0,17	0,04	0,59	1,16	0,06

La silice soluble est déterminée par mise en solution dans l'acide chlorhydrique dilué à 1/50, pendant 90 minutes, d'un échantillon broyé à 100 µm. La silice présente dans le filtrat est ensuite dosée par spectrométrie d'émission plasma. Les teneurs en silice soluble des sédiments étudiés sont données dans le tableau 3-9.

Tableau 3-9. Teneurs en silice soluble des sédiments étudiés

	DUR	GAR	ISE	RHI
Silice soluble (%)	-	12,98	12,13	10,81

Les teneurs en silice soluble sont relativement proches d'un sédiment à l'autre et correspondent à la silice pouvant potentiellement prendre part à une réaction pouzzolanique.

2.1.4. Analyse chimique élémentaire des métaux et métalloïdes

Les éléments traces métalliques (ETM) sont des éléments naturellement présents dans les sols et les sédiments. Des concentrations élevées peuvent avoir une origine naturelle, à lier au fond géochimique naturel local ou anthropique.

L'analyse chimique élémentaire des métaux et métalloïdes a été réalisée par spectrométrie d'émission plasma (As, Ba, Cd, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Zn, Se, Sb) ou par spectrométrie de fluorescence atomique (Hg) après attaque acide.

Les résultats obtenus pour l'analyse des ETM sont regroupés dans le tableau 3-10.

Tableau 3-10. Résultats de l'analyse des éléments trace métallique et métalloïde des sédiments étudiés (en mg/kg de matière sèche)

Référence	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Zn	Se	Sb	Hg
DUR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GAR	18,5	98,4	1,3	42,8	38,8	< 1	44,4	47,3	264,7	< 8	< 5	< 0,4
ISE	17,6	184,2	< 1	40,3	32,1	< 1	42,7	23,8	100,8	< 8	< 5	< 0,4
RHI	4,9	95,5	< 1	31,7	28,6	< 1	25,5	18,7	96,4	< 8	< 5	< 0,4
Seuils S1*	30	-	2	150	100	-	50	100	300	-	-	1

*décret du 9 aout 2006 [JORF, 2006]

Les sédiments étudiés contiennent des quantités variables d'éléments traces tels que le nickel, le zinc, le cadmium, l'arsenic, le plomb, le cuivre, le chrome et le baryum.

Parmi les trois sédiments analysés, le sédiment GAR présente les concentrations les plus élevées pour les éléments quantifiés excepté le baryum, où la concentration du sédiment ISE est supérieure.

D'un point de vue environnemental, toutes les concentrations en ETM sont en dessous du seuil S1 défini dans le décret du 9 aout 2006 [JORF, 2006]. Rappelons que ce seuil permet notamment d'apprécier la qualité des sédiments extraits des cours d'eau ou des canaux et leur incidence sur le milieu aquatique.

2.2. CARACTERISATION MINERALOGIQUE

2.2.1. Teneur en CaCO₃ – Méthode au calcimètre Bernard

Selon Schlosser [2003], la teneur en CaCO₃ d'un sol fin est un bon indice de sa résistance mécanique et de sa sensibilité à l'eau. Suivant la valeur de cette teneur en CaCO₃, le comportement du sol évolue depuis celui d'une argile jusqu'à celui d'une roche, la valeur de transition étant aux alentours de 60 %.

Par ailleurs, le calcaire est le composant principal du cru de cimenterie. Pour la fabrication du ciment, un intérêt évident est à porter sur les carbonates.

► Principe

La teneur en carbonates des sédiments est déterminée à partir de la méthode du calcimètre Bernard conformément à la norme NF P 94-048. Cette méthode simple consiste à mesurer le volume de CO₂ dégagé dans un tube manométrique rempli d'eau saturée en NaCl, après attaque à l'acide chlorhydrique, suivant la formule :



Une formule de correction (température-pression) permet de passer facilement du volume de CO₂ au pourcentage de CaCO₃ selon :

$$\% \text{CaCO}_3 = (V_2 - V_1) \times (K / P) \text{ avec } K = 0,4 \times [293 / (273 - t)] \times (H / 760) \quad (\text{Eq.16})$$

où V1 et V2 correspondent au volume de départ et volume après réaction, P à la masse de sédiment et K au coefficient qui varie en fonction de la température t (en °C) et de la pression atmosphérique (en mm Hg).

► Résultats

Pour l'ensemble des essais réalisés sur les sédiments, les teneurs en carbonates pour les sédiments issus des retenues hydroélectriques sont consignées dans le tableau 3-11. Il s'agit de valeurs moyennes.

Tableau 3-11. Teneur en CaCO_3 dans les sédiments étudiés

	<i>DUR</i>	<i>GAR</i>	<i>ISE</i>	<i>RHI</i>
Teneur moyenne en CaCO_3 (en %)	22,8	4,9	18,8	23,6

Les teneurs en carbonates sont proches de 20 %, excepté pour le sédiment GAR. En effet, pour les sédiments ISE, RHI et DUR, les teneurs en CaCO_3 sont respectivement de 18,8 %, 23,6 % et 22,8 % tandis que le sédiment GAR ne présente que 4,9 % de carbonates.

Le sédiment GAR se distingue des autres sédiments.

En utilisant la classification des sols fins selon leur teneur en CaCO_3 rappelée par Schlosser [2003], le terme d'argile marneuse est adapté pour qualifier les sédiments étudiés, excepté pour le sédiment GAR, avec la plus faible teneur en carbonates.

2.2.2. Analyse par diffraction des rayons X

La diffractométrie de rayons X est une méthode qui permet de déterminer les phases cristallines d'une matrice solide et donc les minéraux qui composent les sédiments. Elle permet donc de discriminer des espèces minérales de même composition chimique mais de structures cristallines différentes.

► Principe

Le principe de l'analyse diffractométrique est celui de la diffraction par un réseau de plans cristallins, d'un faisceau de rayon X, selon la loi de Bragg :

$$\lambda = 2d \cdot \sin \theta \quad (\text{Eq. 17})$$

avec λ = longueur d'onde de la source ; d = espacement entre deux plans parallèles successifs du réseau cristallin ; θ = angle entre le faisceau incident et le réseau de plans.

Un faisceau de rayons X est donc émis sur un échantillon (sous forme de poudre ou d'une tranche plate) et un détecteur mesure l'intensité des rayons diffractés dans les différentes directions. Le diagramme obtenu est caractéristique de la forme cristalline que l'on compare à une base de données. La connaissance *a priori*, ou obtenue par ailleurs des éléments contenus dans l'échantillon, aide à sélectionner les formes les plus probables.

L'analyse par diffraction des rayons X est réalisée sur les sédiments après séchage à 40°C et broyage à 40 μm . L'appareil utilisé est un BRUCKER D8 Advance équipé d'une anticathode au cuivre (raie $\text{K}\alpha$, $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$). Le diffractogramme est enregistré entre 5 et 70 ° en 2θ avec un pas de 0,02 ° en 2θ et un temps de comptage de 1s par pas. Les échantillons ont été préparés avec un ajout de 10 % (en masse) de zincite (ZnO) ayant le rôle d'étalon pour la semi-quantification.

► Résultats

L'interprétation des diffractogrammes obtenus (voir annexes 0, 0, et 0) a permis de mettre en évidence les phases cristallisées présentées dans le tableau 3-12. L'analyse semi-quantitative de ces phases a été réalisée à l'aide du logiciel TOPAS basé sur la méthode Reitveld. Les résultats et teneurs en zincite déduites, sont arrondis au pourcent près.

Tableau 3-12. Résultats de l'analyse minéralogique quantitative par diffraction des rayons X des sédiments étudiés (en % massique)

<i>Minéraux</i>	<i>Composition chimique</i>	<i>Raie principale (Å)</i>	<i>DUR</i>	<i>GAR</i>	<i>ISE</i>	<i>RHI</i>
Silice						
<i>Quartz</i>	SiO_2	3,34	-	36	24	28
Carbonates						
<i>Calcite</i>	$CaCO_3$	3,03	-	4	19	24
<i>Dolomite</i>	$CaMg(CO_3)_2$	2,88	-	2	3	7
Phyllosilicates	-	10 – 4,46	-	35	35	22
Feldspaths						
<i>Anorthite</i>	$Ca_{0,66}Na_{0,34}Al_{1,66}Si_{2,34}O_8$	3,20	-	6	4	5
<i>Albite</i>	$NaAlSi_3O_8$	3,19	-	3	3	2
Corps amorphe			-	13	12	11

Les résultats de la caractérisation minéralogique appellent les commentaires suivants :

- Les sédiments sont composés principalement de minéraux argileux, de quartz et de carbonates (calcite majoritairement et dolomite) ;
- Le sédiment GAR est relativement argileux, le plus riche en quartz et le plus pauvre en carbonates ;
- Le sédiment ISE est également argileux mais la proportion de quartz et de carbonates est relativement équilibrée ;
- Le sédiment RHI est le moins riche en argiles et le plus riche en carbonates ;
- Le corps amorphe mis en évidence par DRX englobe la matière organique ainsi que les phases mal cristallisées.

2.2.3. Détermination et quantification du cortège minéralogique argileux des sédiments

Les minéraux argileux composant les matériaux fins issus de dragage sont assez rarement déterminés. Ils représentent pourtant une part importante du matériau. Dans le cas des sédiments étudiés, les phyllosilicates représentent 22 % à 35 % des minéraux. De plus bon nombre de propriétés sont très fortement influencées par la nature des espèces argileuses présentes. Il apparaît donc essentiel de connaître cette fraction minérale abondante peu étudiée pour les sédiments issus de dragage.

La structure des minéraux argileux impose une certaine adaptation des techniques de diffraction de rayons X. En effet, les principaux critères distinctifs des grandes familles argileuses étant l'équidistance entre les feuillettes et sa variabilité, il est indispensable que les diffractogrammes fassent apparaître essentiellement ces paramètres.

Les techniques utilisées communément pour la préparation des lames orientées sont basées sur le protocole décrit par Holtzapffel [1985].

La détermination des types d'argile est relativement complexe. Pour faire l'expertise, on cherche à identifier la signature par la distance entre les plaquettes d'argile qui est connue suivant les grandes familles. Les principales distances interfoliaires étant 7, 10 et 14 Å, correspondent respectivement aux familles de kaolinites, illites, chlorites et smectites.

► Principe

Les préparations à analyser sont à réaliser suivant certains critères :

- l'échantillon analysé doit être enrichi en minéraux de petite taille, par un tri granulométrique, afin que le diffractogramme obtenu apporte un maximum d'informations sur les minéraux argileux ;
- l'échantillon soumis au faisceau de rayon X doit présenter le plus grand nombre possible de plans de densité atomique (parallèles à l'allongement des feuillets). Ceci permet d'améliorer la réponse des minéraux argileux, aux dépens de celle de la plupart des autres minéraux. La technique consiste à orienter les préparations selon une direction parallèle à celle des feuillets silicatés.
- l'échantillon, après analyse dans les conditions naturelles doit être soumis à différents traitements (la saturation à l'éthylène-glycol et le chauffage) qui mettent en évidence la variabilité de l'équidistance entre les feuillets.

Enfin, il est nécessaire d'adapter le balayage angulaire au secteur correspondant à la diffraction des plans réticulaires, et ce afin d'obtenir un maximum d'informations sur les plans (001) des différents minéraux argileux.

► *Préparation et fabrication des lames orientées*

Les lames minces orientées, pour un même échantillon, passent trois fois au diffractomètre à rayon X. La première analyse se fait sur la lame orientée séchée à l'air ambiant : le traitement sera donc défini comme étant au "naturel". Cette même lame est, ensuite, placée au contact de vapeurs d'éthylène glycol afin de modifier l'espace interfoliaire des "argiles gonflantes", puis est, à nouveau, analysée. Enfin, après évaporation de l'éthylène glycol, le dernier traitement consiste à porter cette même lame à une température constante et précise de 390 °C pendant 4 h, avant une dernière analyse au diffractomètre. La compilation et la comparaison des trois diffractogrammes permettent d'identifier les minéraux argileux de chaque échantillon.

Les caractéristiques des cortèges des minéraux argileux des sédiments issus des retenues hydroélectriques sont définies selon (i) l'identification de chaque minéral argileux à partir de son comportement lors des passages au diffractomètre (au naturel, à l'éthylène glycol et au chauffage) et (ii) la semi-quantification de chaque minéral dans le cortège.

Les enregistrements ont été réalisés sur un diffractomètre de marque Philips, modèle PW 3040/00 X'Pert MPD/MRD. Les paramètres physiques utilisés sont les suivants :

- anticathode au cobalt associée à un filtre au fer,
- puissance de l'appareil : 1 350 W (30kV, 45mA).

► *Écriture des cortèges des minéraux argileux*

Selon les auteurs, les cortèges argileux peuvent s'écrire de multiples manières. Dans ce travail, les écritures choisies sont identiques à celles utilisées par Dubrulle-Brunaud [2007], à savoir :

- pour les argiles présentes à 10 Å, l'illite est notée I ou 10,
- pour les argiles autour de 14 Å, la chlorite est notée 14C, la vermiculite est notée 14V, la smectite est notée 14Sm,
- pour les argiles à 7 Å, la kaolinite est notée K.

Les minéraux argileux interstratifiés sont écrits entre parenthèse par association de minéraux, telle que (14C-14V) ou (10-14C).

► *Résultats*

La figure 3-10 présente le diffratogramme caractéristique du cortège argileux rencontré pour chaque sédiment étudié.

Bien que les sédiments proviennent de zones géographiques éloignées, on constate que les cortèges de minéraux argileux sont le plus souvent dominés par les mêmes espèces, à savoir, les illites et les chlorites.

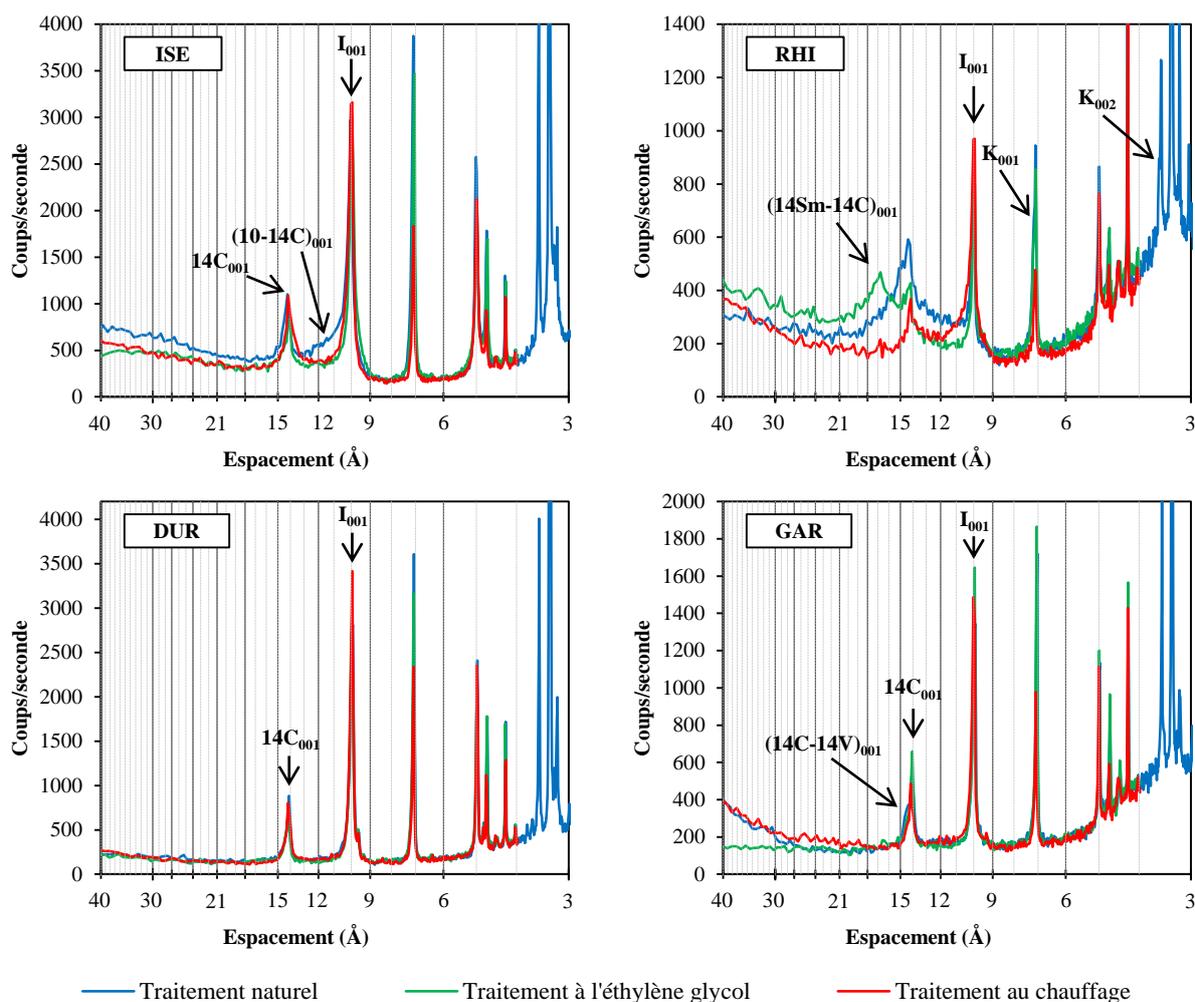


Figure 3-10. Diffractogrammes caractéristiques des cortèges argileux composant les sédiments étudiés

En effet, l'identification des cortèges argileux met en évidence deux principaux minéraux argileux dans tous les sédiments qui ont été prélevés dans les retenues hydroélectriques : l'illite (notée I ou 10) et la chlorite (notée 14C). A cela s'ajoute parfois de la kaolinite (notée K) et des minéraux interstratifiés, comme les associations illite-chlorite (10-14C), chlorite-vermiculite (14C-14V), ou enfin de la smectite-chlorite (14Sm-14C) selon les sédiments étudiés.

La semi-quantification des cortèges des minéraux argileux estime l'abondance relative des minéraux argileux dans le cortège. Pour chaque minéral argileux, elle a été déterminée en adaptant la méthode proposée par Holtzapffel [1985], par calcul de la surface de réflexion (001) de chaque minéral argileux, enregistré sur le diffractogramme. La précision de la semi-quantification pour les minéraux argileux est de l'ordre de $\pm 5\%$. L'indice de cristallinité de l'illite est celui défini par Kübler [1968]. Il correspond à la largeur à mi-hauteur du pic de l'illite. Il est exprimé en $^{\circ}2\theta$ du pic à 10 Å sur l'essai glycolé sans bruit de fond. Plus l'indice de cristallinité est petit, plus l'illite sera bien cristallisée.

Les proportions relatives des minéraux argileux résultant de la semi-quantification sont présentées sur la figure 3-11 et détaillées dans le tableau 3-13.

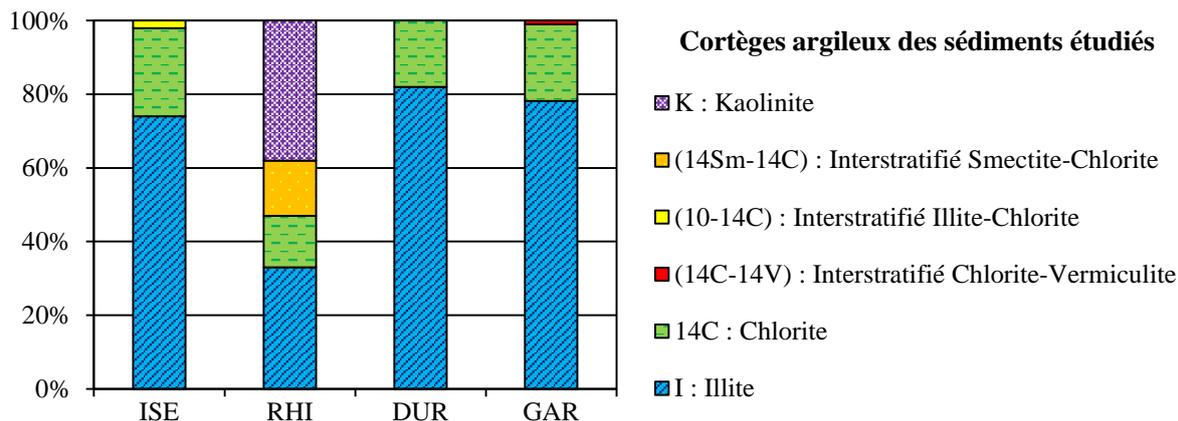


Figure 3-11. Représentation graphique de la nature du cortège argileux des sédiments étudiés

Pour les sédiments analysés, les illites sont dominantes et majoritaires à l'exception du sédiment RHI. Cependant, la proportion de cette espèce argileuse reste importante (33 %). La seconde espèce la plus abondante est la chlorite. Les proportions varient de 14 à 24 % selon les sédiments étudiés.

Le cortège argileux du sédiment RHI se distingue significativement des autres sédiments. Il présente des proportions significatives de kaolinite (38 %) et d'interstratifié Smectite-Chlorite (15 %). De plus, l'illite est plus faiblement cristallisée.

Les autres sédiments (DUR, GAR et ISE) sont, du point de vue de leurs cortèges argileux, assez similaires. Ils présentent des proportions proches d'illite et de chlorite parfois accompagnées de traces de minéraux interstratifiés, Chlorite-Vermiculite pour le sédiment GAR ou Illite-Chlorite pour ISE.

Tableau 3-13. Détermination et semi-quantification des cortèges minéralogiques argileux des sédiments des retenues hydroélectriques

Référence	Cortèges argileux	Semi-quantification					K	Indice de cristallinité de l'illite
		I	14C	(14C-14V)	(10-14C)	(14Sm-14C)		
DUR	I, 14C	82	18	-	-	-	-	0,21
GAR	I, C, (14C-14V)	79	21	< 1	-	-	-	0,21
ISE	I, C, (10-14C)	74	24	-	2	-	-	0,28
RHI	I, (14Sm-14C), K	33	14	-	-	15	38	0,41

2.2.4. Analyse Thermique Différentielle – Analyse Thermo-Gravimétrique (ATD-ATG)

► Principe

La thermogravimétrie permet de suivre l'évolution de la masse d'un échantillon maintenu dans une atmosphère déterminée et soumis à une variation de température. La thermogravimétrie (TG) et sa dérivée (DTG), quantifient les diverses pertes ou reprises de masse observées au cours de l'essai.

Le principe de l'analyse thermique différentielle (ATD) est de mesurer, en fonction du temps ou de la température, la différence de température entre un échantillon et une référence, provoquée par toute modification physique et/ ou chimique de l'échantillon. Le signal enregistré en ATD correspond

à la différence de température, pics endothermiques et exothermiques, entre l'échantillon étudié et un corps de référence (témoin).

► **Résultats**

Les thermogrammes présentés ont été enregistrés sous azote jusqu'à 1 000 °C avec un analyseur thermique de marque NETZSCH (type STA 409C). Les résultats sont illustrés sur la figure 3-12, la figure 3-13 et la figure 3-14 correspondant respectivement aux thermogrammes obtenus avec les sédiments GAR, ISE, RHI.

Le tableau 3-14 synthétise les résultats des analyses thermogravimétriques. L'exploitation de ces résultats permet d'estimer les teneurs en carbonates de calcium et de magnésium des échantillons (tableau 3-15).

Tableau 3-14. Résultats de l'analyse thermogravimétrique des sédiments étudiés

	DUR	GAR	ISE	RHI
Eau libre de 25 à 105 °C	-	0,8	0,7	0,9
Eau liée de 105 à 630 °C	-	7,0	3,9	5,5
Perte de 630 à 1 000 °C (dont CO ₂ de CaCO ₃)	-	5,5 (4,2)	9,9 (9,8)	16,5 (16,5)
Perte totale	-	13,4	14,4	22,8

Tableau 3-15. Interprétation des résultats de l'analyse thermogravimétrique des sédiments étudiés

	DUR	GAR	ISE	RHI
% CaCO ₃	-	9,5	22,3	36,8

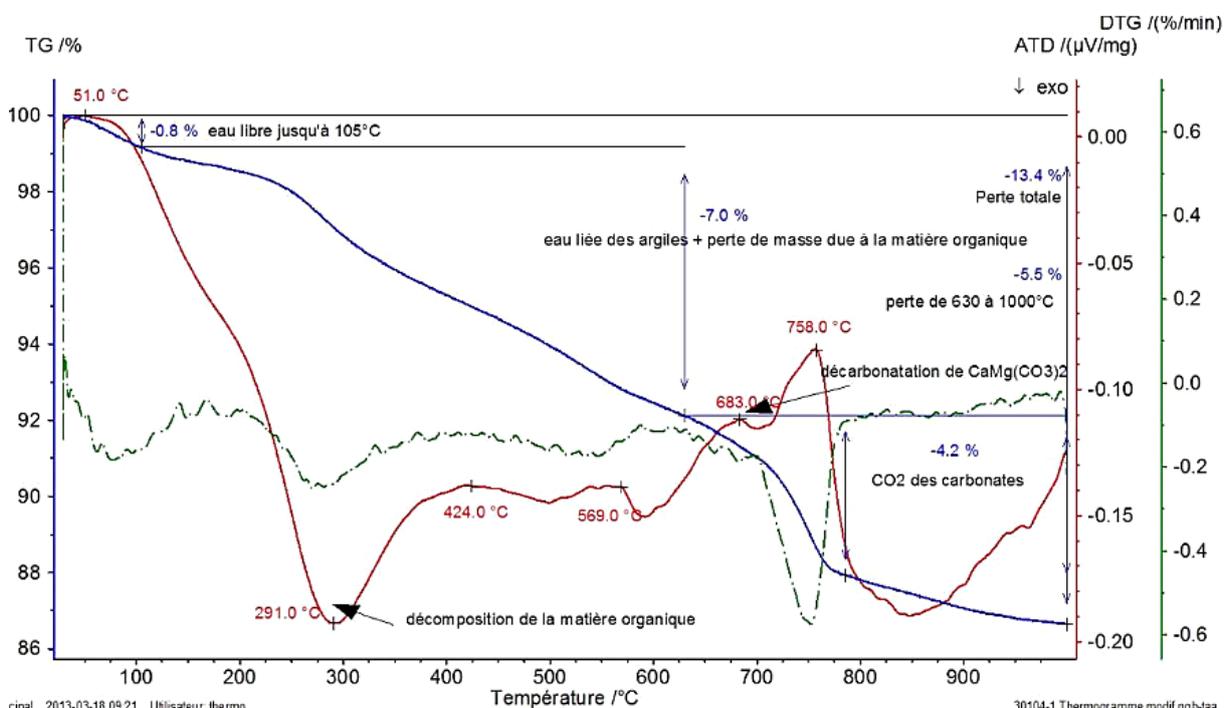


Figure 3-12. Thermogramme obtenu avec le sédiment GAR

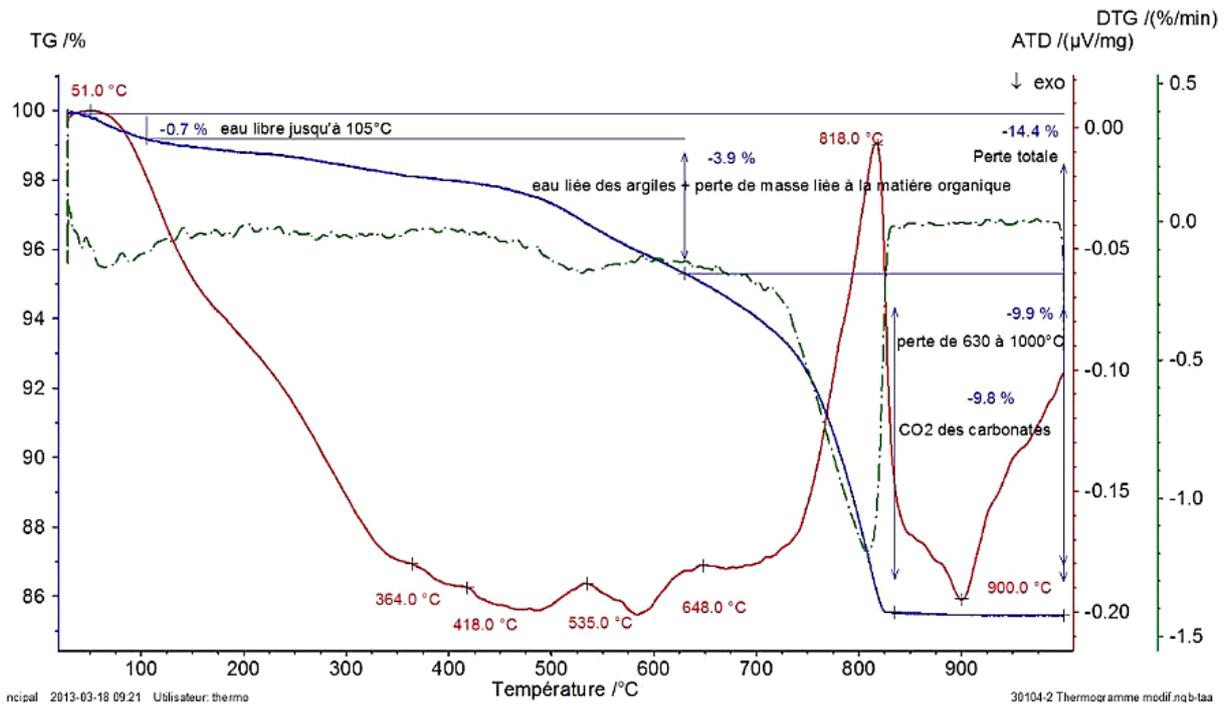


Figure 3-13. Thermogramme obtenu avec le sédiment ISE

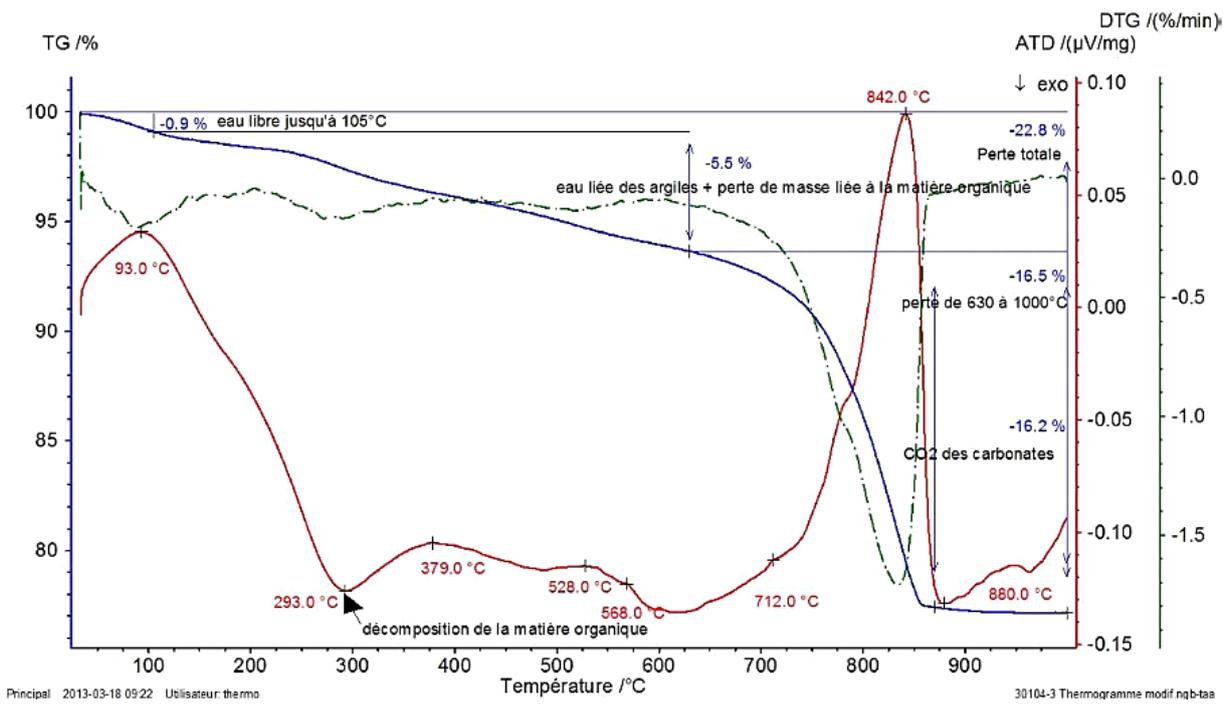


Figure 3-14. Thermogramme obtenu avec le sédiment RHI

2.3. CARACTERISATION HYDROMECHANIQUE

L'étude du comportement hydromécanique des sédiments fins de barrage, passe par la réalisation d'essais en laboratoire : essais de décantation-sédimentation, essais de consolidation œdométrique et essais de résistance au cisaillement au cours du séchage naturel.

Les essais de décantation en colonne correspondent au tassement sous poids propre du sédiment. Les essais de consolidation œdométrique correspondent au tassement de ces mêmes sédiments sous charge. Les essais de résistance au cisaillement au cours du séchage naturel constituent un indicateur de l'évolution du comportement mécanique.

Les essais réalisés dans le cadre de la caractérisation hydromécanique ont servi de support à deux stages au sein de l'UMR CNRS M2C et encadrés par la thèse. L'étude de la décantation et de la consolidation a été menée par Khadraoui [2013]. L'étude de l'évolution de la résistance au cisaillement non drainée au cours du séchage naturel des sédiments a été conduite par Sano [2012]. Les sections qui suivent présentent et synthétisent les résultats obtenus.

2.3.1. Etude de la décantation

► *Protocole des essais de décantation*

Le processus de tassement sous poids propre est étudié expérimentalement au moyen de colonnes de décantation. Le protocole expérimental comprend une série de tubes transparents. Cet essai consiste en la mise en œuvre d'un mélange de sédiment homogène de concentration initiale C_i puis à suivre la hauteur de l'interface sédiments/eau surnageante au cours du temps.

Les essais de décantation ont été réalisés à l'aide de tubes transparents de diamètre extérieur de 60 mm, épais de 3 mm et de hauteur totale de 2 m, voir figure 3-15.

Deux séries d'essais ont été menées sur les sédiments de barrages avec des concentrations initiales respectivement de 100 g/l (série A) et 250 g/l (série B).

Les concentrations sont choisies de manière à être caractéristiques des différents types de dragage. En effet, la concentration à 100 g/l représente un dragage avec un refoulement hydraulique tandis que la concentration à 250 g/l correspond à des conditions de dragage mécanique.

Après homogénéisation, les sédiments sont mis dans les tubes de décantation. Pendant le processus de décantation, l'évolution de la hauteur de la surface libre du sédiment est suivie en fonction du temps par des mesures rapprochées pour les premières heures puis plus espacées. La période d'observation a été de 10 jours.



Figure 3-15. Colonnes de décantation en cours d'utilisation

► Résultats

Les courbes de tassement relatif, pour une concentration initiale de 100 g/l et 250 g/l sont respectivement représentées sur la figure 3-16 et la figure 3-17. Le tassement relatif s'exprime par le rapport h_i/h_t dans lequel h_i représente la hauteur initiale du sédiment et h_t la hauteur mesurée au temps t .

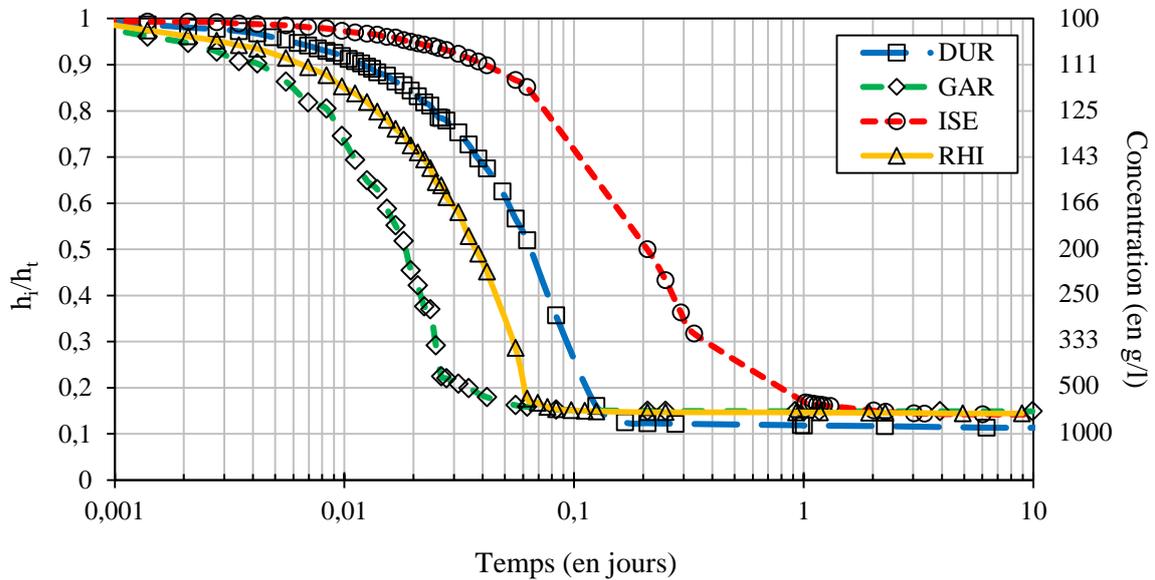


Figure 3-16. Courbes de décantation de la série A (concentration initiale = 100 g/l)

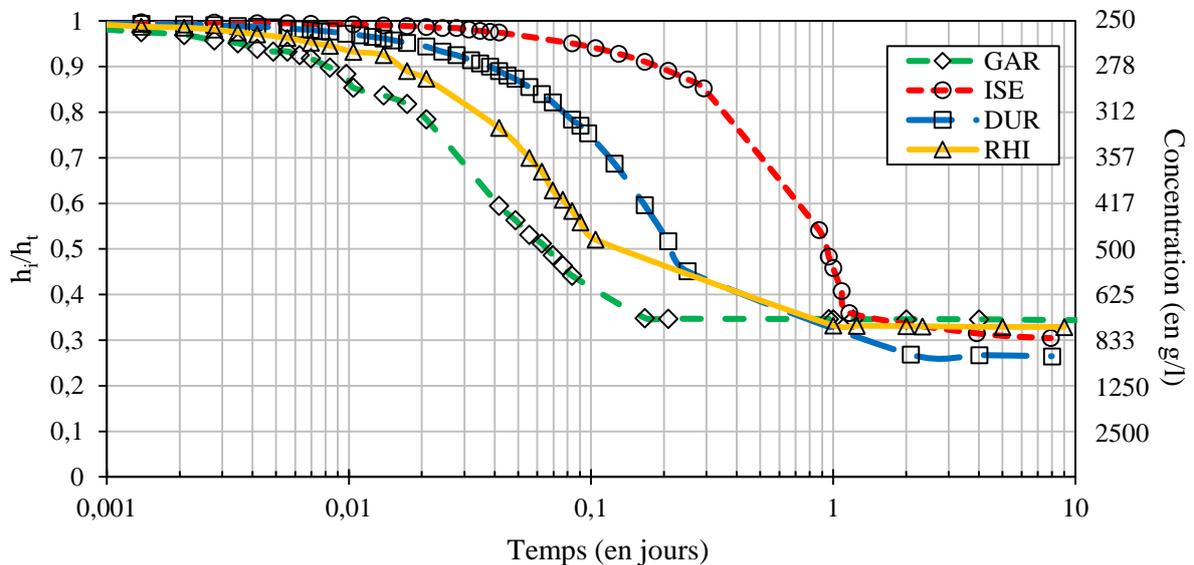


Figure 3-17. Courbes de décantation de la série B (concentration initiale = 250 g/l)

Pour les deux séries, le sédiment qui décante le plus rapidement est le sédiment GAR. S'ensuit le sédiment RHI, le sédiment DUR et le sédiment ISE. Le paramètre qui influence le plus fortement la décantation des sédiments étudiés est la taille des particules. En effet, la granulométrie des sédiments étudiés dans l'ordre décroissant en termes de teneur en fraction sableuse est comme suit : GAR, RHI, DUR et ISE.

Les sédiments étudiés atteignent leurs asymptotes de tassement après quelques heures, avec des concentrations de 670 à 880 g/l. Ce comportement des sédiments étudiés est assez ressemblant de celui des limons fluviaux décrit par Migniot [1989].

A partir des résultats des essais de décantation, il est possible de déterminer des valeurs du coefficient de perméabilité k (aussi appelé conductivité hydraulique) de façon indirecte.

Le coefficient de perméabilité ou, en abrégé, la perméabilité, est une propriété qui exprime ou définit comment l'eau circule à travers le sol ou les sédiments. Il est nécessaire de connaître la perméabilité lorsqu'on travaille à la conception d'ouvrages pour lesquels on doit tenir compte des écoulements souterrains.

La perméabilité est liée à la granulométrie du sol, mais aussi à d'autres paramètres comme la structure, la consistance, la compaction, etc. La figure 3-18 donne des ordres de grandeur selon la nature de sol en place.

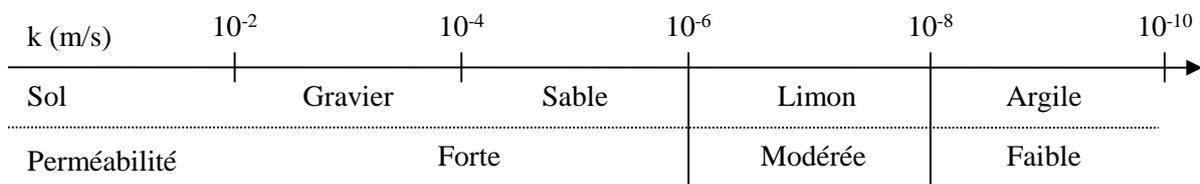


Figure 3-18. Ordre de grandeur du coefficient de perméabilité selon la nature du sol

A partir des résultats des deux séries de décantation, la figure 3-19 montre l'évolution du coefficient de perméabilité k en fonction de la concentration C . Les valeurs de perméabilité sont obtenues en utilisant la méthode graphique de Sanchez et Grovel [1993]. Les considérations générales de cette méthode sont rappelées en annexe 0.

Les coefficients de perméabilité sont de plus en plus faibles pour des concentrations élevées. En effet, l'évolution de k en fonction de la concentration est quasiment linéaire dans les échelles de la figure, et inversement proportionnelle à C . La limite inférieure du fuseau, dans lequel s'insèrent les perméabilités, concerne les sédiments les plus fins et les moins organiques (ISE et DUR) alors que la limite supérieure intéresse les deux sédiments les plus grossiers et les plus organiques (RHI et GAR).

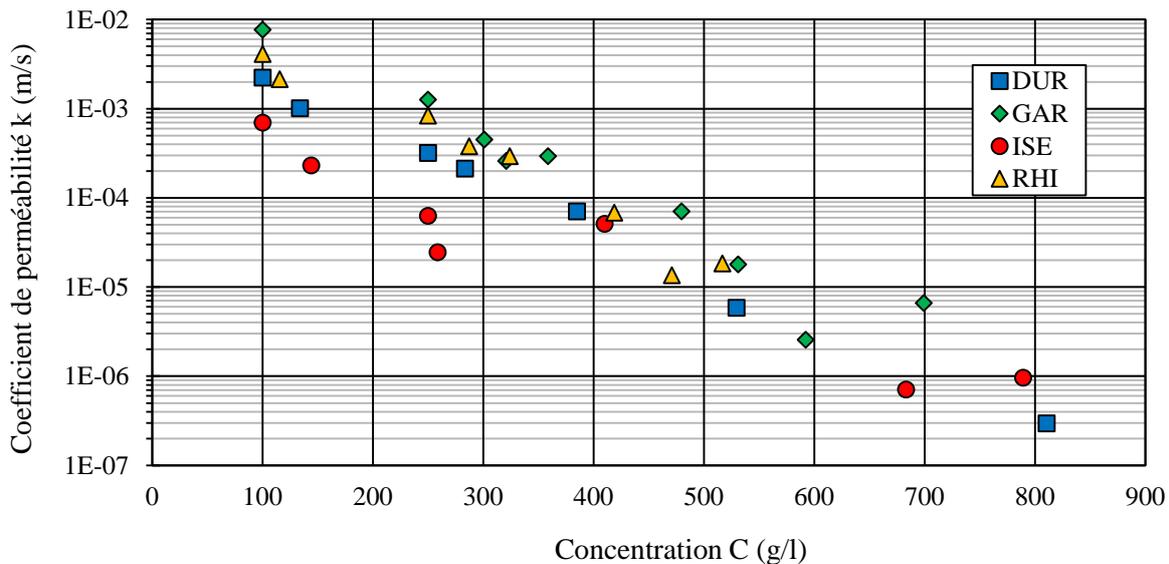


Figure 3-19. Variation du coefficient de perméabilité en fonction de la concentration

2.3.2. Etude de la consolidation

Lorsqu'un sol saturé est soumis à une charge, il se comprime. L'expulsion de l'air et de l'eau contenus dans les vides est principalement responsable de déformation. Holtz et Kovacks [1991] décrivent ce phénomène de la façon suivante : à mesure que l'eau est chassée, les grains solides subissent un réarrangement suivant une configuration plus dense et donc plus stable ; il en résulte une diminution de volume et un tassement.

Lorsque les sédiments fins subissent un chargement, leur compression est déterminée par la vitesse à laquelle l'eau est expulsée des pores. Leur faible perméabilité est liée à la quantité et à la nature de la fraction argileuse. Ainsi, la consolidation fait intervenir les effets de la contrainte et du temps dans la déformation.

Afin de reproduire en laboratoire le comportement d'un sol sous des charges verticales qui lui sont appliquées, et donc en l'absence de déplacements horizontaux, un essai est couramment employé : l'essai œdométrique. Cet essai est utilisé pour déterminer les paramètres de consolidation et de compressibilité d'un sol.

► *Principe de l'essai*

Le principe de l'essai œdométrique, tel que défini par la norme XP P 94-090-1, est le suivant : l'essai s'effectue sur une éprouvette de matériau, placée dans une enceinte cylindrique rigide (œdomètre). Un dispositif applique sur cette éprouvette un effort axial vertical, l'éprouvette étant drainée en haut et en bas et maintenue saturée pendant l'essai.

La charge est appliquée par paliers maintenus constants successivement croissants et décroissants suivant un programme défini. Les variations de hauteur de l'éprouvette sont mesurées pendant l'essai et fonction de la durée d'application de la charge.

► *Paramètres de tassement*

Les essais œdométriques ont fourni les paramètres de tassement permettant de caractériser le comportement des sédiments fins en consolidation à savoir l'indice de compression, le coefficient de consolidation et l'indice de fluage. Les coefficients de consolidation sont calculés selon la méthode de Taylor. D'après Magnan et al. [1985], l'utilisation de cette méthode est préférable dans le cas des matériaux compressibles présentant une consolidation secondaire importante. Les quatre sédiments de barrage référencés ISE, DUR, GAR et RHI, ont été étudiés à l'œdomètre. Pour chaque sédiment, deux cellules ont été mises en place pour vérifier la répétabilité des essais et assurer la représentativité des résultats. Les valeurs présentées pour les paramètres de tassement dans le tableau 3-16 sont des moyennes des deux essais.

Les résultats présentés dans cette section sont une synthèse des essais menés pour l'étude des caractéristiques géomécaniques et hydrauliques de sédiments fins. Les courbes de tassement, courbes œdométriques, et description des méthodes employées sont disponibles dans le rapport de Khadraoui [2013].

Tableau 3-16. Paramètres de tassement

	<i>DUR</i>	<i>GAR</i>	<i>ISE</i>	<i>RHI</i>
<i>Indice de compression (Cc)</i>	0,06	0,21	0,125	0,30
<i>Indice de gonflement (Cs)</i>	0,010	0,020	0,025	0,025
<i>Coefficient de consolidation (Cv)</i> <i>en 10⁻⁸m²/s</i>	35 à 3,9	43 à 12	27 à 5,7	15 à 3,9
<i>Indice de fluage (Ca)</i>	0,011	0,021	0,002	0,016

Selon le sédiment étudié, l'indice de compression (C_c) est variable. Ainsi l'amplitude du tassement sera nettement différente d'un sédiment à un autre. Ce sont les sédiments avec le plus de matière organique qui ont les valeurs de C_c les plus élevées. Pour le sédiment DUR ($C_c = 0,06$), l'indice déterminé est similaire à celui des sols peu compressibles. L'indice de compression du sédiment ISE est dans la gamme de ceux qui sont rencontrés pour les familles d'argiles les moins

compressibles comme la kaolinite. Ce sédiment peut être assimilé à un sol « moyennement compressible ». Les indices des sédiments GAR et RHI, respectivement 0,21 et 0,30, sont dans la plage des sols assez fortement compressibles. Il est courant de rencontrer ces valeurs pour ces argiles de type illite.

Les coefficients de consolidation (C_v) fluctuent beaucoup pour des niveaux de contrainte appliquée faibles. A partir d'une surcharge de 100 kPa, la vitesse de consolidation est stable pour tous les sédiments étudiés. Le coefficient de consolidation, pour une telle surcharge, est dans une plage comprise entre $1,2 \cdot 10^{-7}$ et $2,6 \cdot 10^{-7}$ m²/s. On retrouve généralement cet ordre de grandeur pour les argiles sableuses et argiles les moins actives de type kaolinite ou illite.

Ce sont les deux sédiments avec les teneurs en MO les plus importantes qui ont les indices de fluage (C_α) les plus élevés. Une relation entre %MO et C_α a déjà été constatée pour le cas de sédiments marins méditerranéens [Levacher et Sanchez, 2011]. Les résultats obtenus pour les sédiments de barrage étudiés semblent confirmer que l'augmentation de la teneur en MO tend à accroître le fluage comme on le voit sur la figure 3-20. De ce fait, la présence de matière organique à teneur élevée dans les sédiments pose problème pour la mise en remblai sans traitement.

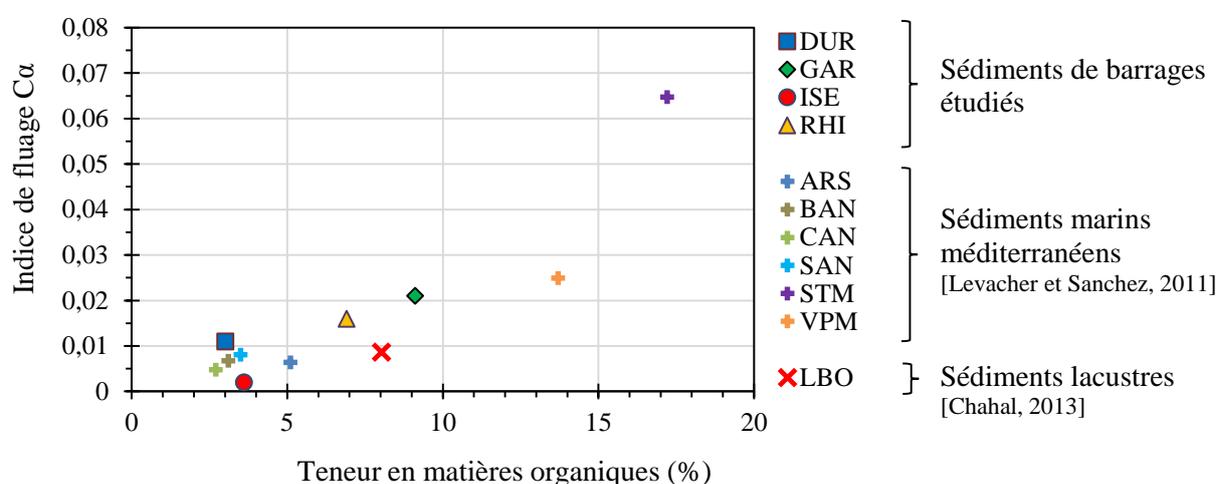


Figure 3-20. Relation indice de fluage C_α et teneur en matières organiques de sédiments fins

Le tableau 3-17 récapitule un ensemble de données relatives à la consolidation des sédiments fins. Des intervalles de valeurs communément admises [SETRA-LCPC, 2000] pour les sols compressibles voire très compressibles permettent de situer les sédiments étudiés.

Tableau 3-17. Propriétés hydrauliques et de consolidation des sédiments fins

Propriétés	Indice des vides initial e_0	Compressibilité $C_c / (1+e_0)$	Indice de fluage C_a	Coefficient de perméabilité k (m/s)	Coefficient de consolidation C_v (m^2/s)
Sédiments de barrage étudiés					
Sédiment DUR	1,505	0,024	0,183 C_c	10^{-6} - 10^{-9}	$3,5 \cdot 10^{-7}$ à $3,9 \cdot 10^{-8}$
Sédiment GAR	2,870	0,054	0,100 C_c		$1,2 \cdot 10^{-7}$ à $4,3 \cdot 10^{-7}$
Sédiment ISE	1,640	0,047	0,016 C_c		$2,7 \cdot 10^{-7}$ à $5,7 \cdot 10^{-8}$
Sédiment RHI	2,725	0,080	0,053 C_c		$1,5 \cdot 10^{-7}$ à $3,9 \cdot 10^{-8}$
Sédiments marins méditerranéens (1)					
Sédiment ARS	0,593	0,030	0,133 C_c	10^{-6} - 10^{-9}	10^{-6} - 10^{-8}
Sédiment BAN	1,113	0,117	0,027 C_c		
Sédiment CAN	0,899	0,091	0,028 C_c		
Sédiment SAN	1,102	0,082	0,046 C_c		
Sédiment STM	2,332	0,206	0,094 C_c		
Sédiment VPM	2,142	0,169	0,047 C_c		
Autres sédiments continentaux					
Sédiment LBO (2)	1,46	0,21	0,162 C_c	-	$3,33 \cdot 10^{-7}$ à $1,02 \cdot 10^{-7}$
Sédiment SMR (3)	1,84	0,088	0,032 C_c	-	$2 \cdot 10^{-6}$ à $3 \cdot 10^{-7}$
Propriétés caractéristiques des sols compressibles (4)					
Sols organiques	2 à 3	0,2 à 0,35	0,03 à 0,05 C_c	10^{-6} à 10^{-9}	10^{-6} à 10^{-8}
Vases	1,5 à 3	0,25 à 0,4		10^{-7} à 10^{-9}	10^{-7} à 10^{-8}
Argiles molles	1,2 à 2	0,15 à 0,3		10^{-9} à 10^{-11}	10^{-7} à 10^{-9}

(1) Levacher et al. [2011] – (2) Chahal [2013] – (3) Feng et al. [2001] – (4) Propriétés résumées dans le guide technique « Etude et réalisation des remblais sur sols compressibles » [SETRA-LCPC, 2000]

► Paramètres hydrauliques et de consolidation

Les essais œdométriques permettent aussi de compléter la relation k-C qui peut être proposée en fonction de la concentration. Ainsi, la figure 3-19, donnant la variation de k en fonction de C, est complétée par les valeurs déterminées de façon indirecte à partir des essais œdométriques. La figure 3-21 regroupe donc l'ensemble des valeurs de k pour l'intervalle de concentration allant de 100 g/l à 1 500 g/l. Sur une large gamme de valeurs de concentration, on observe bien une continuité de la loi reliant k à C.

Les sédiments de barrage étudiés évoluent en deux groupes distincts. Pour les sédiments les plus fins (ISE et DUR), la concentration varie entre 100 et 1 500 kg/m³. Ces concentrations correspondent à la fin des essais de consolidation réalisés sur ces sédiments. Pour les sédiments GAR et RHI, plus grossiers que les précédents, la concentration en fin d'essai va de 800 à 1 200 kg/m³.

Les sédiments de barrage étudiés s'avèrent être très peu perméables, avec des coefficients k de l'ordre de 10^{-7} et 10^{-9} m/s obtenus en fin d'essai de consolidation.

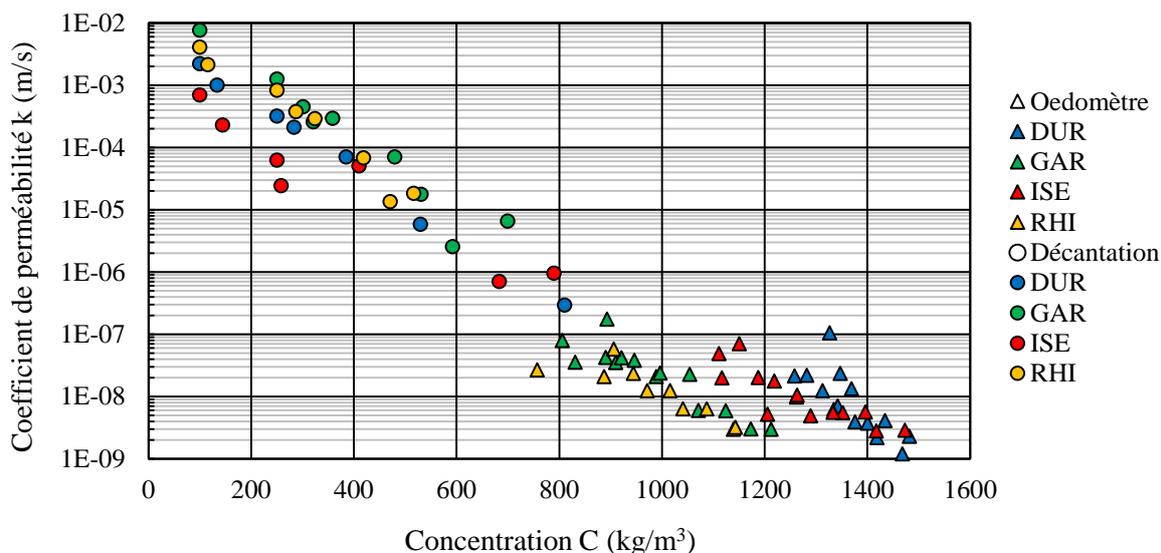


Figure 3-21. Relation k - C issue des colonnes de décantation et des œdomètres

2.3.3. Evolution de la résistance au cisaillement non drainée au cours du séchage naturel des sédiments

Parmi les verrous majoritaires à la valorisation des sédiments, la forte teneur en eau de ces matériaux à la sortie de la drague a déjà été identifiée comme le plus contraignant [Levacher et Dhervilly, 2010]. La teneur en eau élevée des sédiments va avoir essentiellement deux impacts :

- Augmentation du coût lié au transport : un grand volume d'eau sera transporté pour une faible masse de matière sèche. De plus, les opérations de chargement et déchargement d'engins de chantier terrestres vont être plus délicates voire impossibles si les sédiments ont une teneur en eau élevée au point de présenter une consistance qui ne leur permet pas d'être pelletables. Avoir un sédiment avec une teneur en eau modérée est donc nécessaire.
- Inadéquation aux filières de valorisation : selon les voies, une teneur en eau importante peut être acceptable mais une teneur en eau très élevée est rédhibitoire. La diminution de la teneur en eau est indispensable pour envisager des réalisations.

Dans l'étude du séchage naturel des sédiments, il est intéressant que le suivi de l'évolution de la teneur en eau soit accompagné de la mesure d'un indicateur du comportement mécanique. La résistance au cisaillement à teneur en eau constante (cohésion non drainée) est un indicateur mécanique adapté pour ce type de suivi. Il existe plusieurs essais de laboratoire ou de terrain, faciles à mettre en place, pour déterminer ce paramètre. Pour ces essais, on suppose un chargement suffisamment rapide pour que des conditions non drainées soient respectées. Les résultats obtenus de cette manière peuvent être mis en corrélation avec la résistance au cisaillement non drainée.

Dans cette section, des essais au scissomètre et au cône ont été réalisés pour mesurer l'évolution de la résistance au cisaillement lors du séchage des sédiments et ainsi compléter la caractérisation hydromécanique.

► Principe de l'essai au cône (Fall-cone test - FCT)

L'essai au cône, aussi appelé cône suédois [Holtz et Kovacks, 1991], consiste à laisser tomber un cône métallique placé verticalement avec son sommet juste au contact de la surface supérieure de l'échantillon, puis à mesurer la profondeur de pénétration du cône. Ainsi, les essais réalisés selon cette méthode fournissent des valeurs de profondeur de pénétration qui peuvent être utilisées pour évaluer la résistance au cisaillement non drainée.

En effet, la résistance au cisaillement non drainée est proportionnelle au carré de la pénétration. La cohésion C_u d'un échantillon à l'état intact ou remanié, peut être mise sous la forme [Hansbo, 1957] :

$$C_u = k (Q / h^2) \quad \text{Eq. 18}$$

Avec C_u , la cohésion non drainée ; Q , le poids du cône et de l'équipage mobile ; k , une valeur empirique dépendant du matériau et du cône ; h , la hauteur de pénétration du cône.

Selon Paute et Mace [1968], cet essai est tout indiqué dans les études de routine pour obtenir un certain nombre de caractéristiques géotechniques usuelles avec une assez bonne précision.

► *Principe de l'essai au scissomètre (Vane shear test - VST)*

Le scissomètre vise à la détermination de la résistance au cisaillement non drainée des sols fins cohérents.

L'essai consiste à enfoncer verticalement un moulinet dans un échantillon de matériau puis à entraîner en rotation, par rapport à un axe vertical, les pales du moulinet, et à mesurer le moment de torsion en fonction de l'angle de rotation imposé. L'essai est réalisé selon la norme NF P 94-072.

$$C_U = \frac{T_{\max}}{\pi \left[\frac{D^2 H}{2} + \frac{D^3}{6} \right]} \quad \text{Eq. 19}$$

avec : C_u , la cohésion non drainée ; T_{\max} , le moment de torsion maximum ; D , le diamètre du cercle circonscrit à la section du moulinet, H , la hauteur des pales du moulinet.

► *Dispositif expérimental de séchage des sédiments*

Afin de mesurer l'évolution de la teneur en eau et de la résistance au cisaillement, on prépare des cellules de 42 cm de diamètre et 10 cm contenant des sédiments. Elles sont munies à leur base d'un géotextile perméable permettant une évacuation de l'eau et sont laissées à l'air libre afin de permettre l'évaporation.



Figure 3-22. Cellule expérimentale pour la déshydratation naturelle [Sano, 2012]

Ce dispositif est assez proche, d'un point de vue conceptuel, de ceux réalisés par Duan [2008] et Miraoui [2010] pour l'étude du séchage naturel de sédiments marins.

Chaque point de mesure de la résistance au cisaillement du matériau fait l'objet d'une mesure de teneur en eau afin d'établir la relation entre les deux grandeurs mesurées.

► *Résultats*

Les résultats obtenus à l'aide de l'essai scissométrique et au cône pour chacun des sédiments étudiés, sont représentés et rassemblés dans la figure 3-23. Les valeurs correspondent à l'ensemble des mesures effectuées dans les cellules.

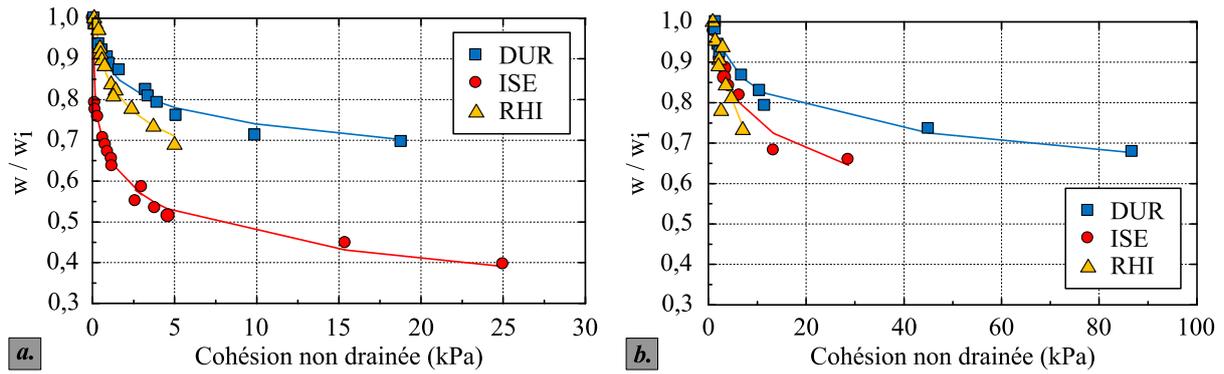


Figure 3-23. Evolution de la cohésion non drainée en fonction de la teneur en eau mesurée avec (a) l'essai au cône et (b) l'essai scissométrique

Pour tous les sédiments, la contrainte de cisaillement non drainée augmente avec la diminution de la teneur en eau. Cette tendance est la même pour les deux essais.

Pour le sédiment ISE et le sédiment DUR, l'augmentation de la contrainte de cisaillement devient beaucoup plus rapide lorsque la teneur en eau approche de 30 %. Or pour ces deux sédiments, la limite de plasticité est de 30 %.

Pour le sédiment RHI, la teneur en eau initiale était trop élevée et le séchage naturel n'a pas duré suffisamment longtemps pour atteindre la limite de plasticité de ce sédiment. L'augmentation rapide de la cohésion non drainée n'est donc pas observée sur ce sédiment.

La figure 3-24 compare les valeurs déterminées de la cohésion non drainée à l'aide de l'essai au scissomètre et l'essai au cône.

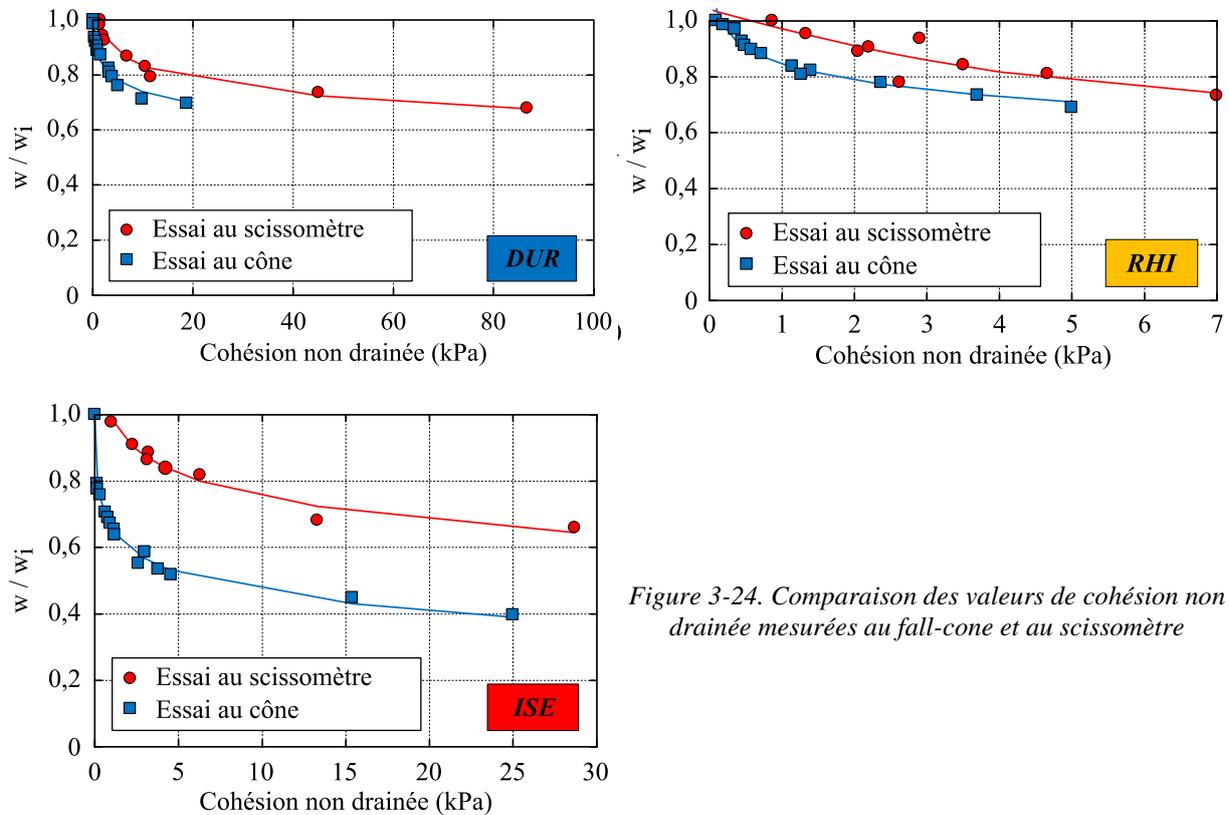


Figure 3-24. Comparaison des valeurs de cohésion non drainée mesurées au fall-cone et au scissomètre

La comparaison entre l'essai au cône et au scissomètre indique que les valeurs obtenues avec les deux techniques ont une corrélation correcte. Notons qu'une petite différence est observable entre les deux méthodes d'essai employées. Cela peut être lié à la position du point d'essai sur la cellule entre les deux essais. La cohésion mesurée à l'aide du cône est en surface alors que la cohésion déterminée au scissomètre est réalisée plus profondément dans la cellule.

2.4. SYNTHÈSE DES PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES SEDIMENTS

Le tableau 3-18 synthétise les résultats de la caractérisation « minérale et géotechnique » présentés dans les sections précédentes. Il rappelle les principaux paramètres et propriétés des sédiments étudiés ainsi que leur composition élémentaire.

Tableau 3-18. Synthèse des caractéristiques physico-chimiques et des propriétés des sédiments de barrage étudiés

Référence	DUR	GAR	ISE	RHI	
Analyse granulométrique	d_{10} (μm)	2,6	6,4	0,76	3,4
	d_{50} (μm)	21,1	37,7	6,14	24,4
	d_{90} (μm)	82,6	189,4	24,8	135,7
	Fraction argileuse <2 μm (%)	7,8	3,4	21,2	6,3
	Fraction limoneuse 2 à 63 μm (%)	75,5	60,6	78,8	67,5
	Fraction sableuse >63 μm (%)	16,7	36,0	0	26,2
	Passant à 80 μm	88,5	70,1	100	79,1
Surface spécifique	Surface spécifique Blaine (cm^2/g)	-	4 370	>7 000	5 120
	Surface spécifique BET (m^2/g)	6,8	-	12,0	6,9
Teneurs moyennes en MO (en %) – calcination à 550 °C					
	Valeurs au bleu VBS (g/100g)	0,7	1,4	1,8	2,4
Argilosité	Limite de liquidité W_L (%)	39	76	46	71
	Limite de plasticité W_P (%)	30	50	30	46
	Indice de plasticité IP	9	26	16	25
Masse volumique des grains ρ_s (en g/cm^3)					
		2,74	2,65	2,71	2,59
Indice de compression C_c					
		0,06	0,21	0,125	0,30
Teneur moyenne en CaCO_3 (en %) – calcimétrie					
		22,8	4,9	18,8	23,6
Composition minéralogique	Quartz - SiO_2	-	36	24	28
	Calcite - CaCO_3	-	4	19	24
	Dolomite - $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	-	2	3	7
	Phyllosilicates	-	35	35	22
	Anorthite - $\text{Ca}_{0,66}\text{Na}_{0,34}\text{Al}_{1,66}\text{Si}_{2,34}\text{O}_8$	-	6	4	5
	Albite - $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	-	3	3	2
	Corps amorphe	-	13	12	11
Composition du cortège argileux (nature des phyllosilicates)	Illite	82	79	74	33
	Chlorite	18	21	24	14
	Kaolinite	-	-	-	38
	Interstratifiés Smectite - Chlorite	-	-	-	15
	Illite - Chlorite	-	-	2	-
	Chlorite - Vermiculite	-	< 1	-	-
Eléments majeurs (en %)	PF	-	13,4	14,4	22,8
	SiO_2	-	56,3	47,3	43,1
	Al_2O_3	-	14,7	14,1	7,9
	Fe_2O_3	-	5,59	4,94	3,00
	CaO	-	4,13	13,03	18,43
	MgO	-	1,93	2,10	2,44
	TiO_2	-	0,83	0,66	0,40
	MnO	-	0,06	0,16	0,06
	P_2O_5	-	0,21	0,17	0,17
	SrO	-	0,02	0,05	0,04
	Na_2O	-	0,73	0,95	0,59
	K_2O	-	1,82	2,14	1,16
	SO_3	-	0,15	0,09	0,06

3. CARACTERISATION AGRONOMIQUE

La caractérisation agronomique des sédiments permet de connaître les potentialités mais aussi les faiblesses quant à leur valorisation en usage agricole ou de support de plantation. Les techniques employées pour caractériser un sédiment d'un point de vue agronomique se distinguent en partie de celles utilisées pour une caractérisation « minérale et géotechnique ». C'est pour ces raisons qu'une section à part entière est consacrée à la caractérisation agronomique.

L'adéquation des sédiments étudiés avec les filières de valorisation agronomique est uniquement basée sur l'interprétation de leurs paramètres physico-chimiques et agronomiques. Il n'y a pas d'essai de valorisation pour les filières agronomiques dans le chapitre suivant. De plus, un nombre important de paramètres est dédié aux filières de valorisation agronomique. Il est donc plus adapté de traiter la caractérisation agronomique indépendamment.

3.1. PARAMETRES ANALYSES

La caractérisation agronomique des sols et des matières fertilisantes peut être basée sur de nombreux paramètres selon le degré de connaissance que l'on cherche à atteindre. Il est nécessaire de caractériser des propriétés physiques, chimiques voire biologiques pour discuter de l'adéquation d'un matériau pour un usage agronomique. C'est un équilibre optimal des composantes du sol qui permet un jugement global de valeur sur la qualité d'un milieu. Selon l'usage qui est envisagé pour les sédiments (agricole ou reconstitution de sol), les propriétés recherchées diffèrent. Par conséquent, les paramètres peuvent être interprétés différemment.

Le tableau 3-19 rassemble les paramètres utilisés pour la caractérisation agronomique des sédiments fins. La plupart de ces paramètres sont obtenus en routine pour les analyses de sol dans les laboratoires d'agronomie. Leur interprétation peut changer selon le type de valorisation envisagé (épandage agricole ou reconstitution de sol). Pour la reconstitution de sol, la caractérisation permet de par la connaissance des paramètres à améliorer, de les ajuster et de déterminer d'éventuels apports de matériaux pour obtenir un substrat fertile.

3.2. RESULTATS DE LA CARACTERISATION AGRONOMIQUE

La caractérisation a été réalisée par SAS Laboratoire, spécialisé dans les analyses agricoles et agronomiques. Les résultats de ces analyses agronomiques sont présentés dans le tableau 3-20.

L'interprétation des caractéristiques vis-à-vis de la réglementation et des normes applicables pour les filières de valorisation agronomique est donnée dans la section 4.5 de ce chapitre.

Tableau 3-19. Signification agronomique des paramètres de caractérisation

Objectifs agronomiques	Indicateur / Paramètre	Méthode / Principe
Possibilité d'implantation et de développement du système racinaire	Texture (répartition granulométrique)	Granulométrie par sédimentométrie (NF X31-107 « méthode à la pipette ») après destruction de la MO et avec décarbonatation. Répartition selon 5 classes : $A < 2\mu\text{m} < LF < 20\mu\text{m} < LG < 50\mu\text{m} < SF < 200\mu\text{m} < SG < 2000\mu\text{m}$ Ainsi : $A + LF + LG + SF + SG + MO + CaCO_3 = 100$
Capacité à fournir des éléments nutritifs par minéralisation de la matière organique	Matière organique et carbone organique	Attaque oxydante (mélange sulfochromique), dosage par colorimétrie (NF ISO 14235)
	C/N	Calcul
Disponibilité d'éléments nutritifs pour la croissance des végétaux	N_{total}	Combustion en présence d'oxygène à 950 °C et analyse élémentaire de l'azote dans le gaz de combustion (NF ISO 13878 « méthode DUMAS »)
	Eléments nutritifs majeurs échangeables	K, Ca, Mg et Na échangeables : Extraction à l'acétate de d'ammonium, dosage par spectrométrie plasma (NF X 31-108)
	Eléments nutritifs majeurs totaux	K, Ca, Mg et Na totaux : Extraction à l'eau régale, dosage par ICP-OES (NF EN ISO 11885)
	Teneur en oligo-éléments	Cu, Fe, Mn et Zn biodisponibles : Extraction à l'EDTA (NF X 31-120), dosage par ICP Bore assimilable : Extraction eau bouillante (NF X 31-122 modifié) Mo et Co total : Extraction à l'eau régale, dosage par ICP-OES (NF EN ISO 11885)
	Capacité d'Echange Cationique (CEC)	Echange par percolation des cations fixés avec une solution aqueuse d'ammonium, dosage des ions NH_4^+ en excès. (NF X 31-130 « méthode METSON »)
Condition de milieu pour la germination et la croissance des végétaux	pH (eau et KCl)	Dilution du sédiment dans l'eau ou le chlorure de potassium (KCl) puis mesure du pH (NF ISO 10390)
	Salinité (conductivité)	Dilution à l'eau distillée et mesure au conductimètre (NF ISO 11265)
Capacité à tamponner l'acidité des terres	$CaCO_3$	Ajout d'acide chlorhydrique et mesure du dégagement de CO_2 (NF ISO 10693)
Disponibilité d'eau pour la croissance des végétaux	Capacité de rétention en eau	Mesure de propriétés physiques (NF U 44-175) à différents potentiels hydriques (NF ISO 11274)
Surveillance de la contamination chimique	ETM	Cd, Cr, Cu, Ni, Pb et Zn : Extraction à l'eau régale/micro ondes (NF ISO 11466) puis dosage par ICP-OES (NF EN ISO 11885) Hg : méthode adaptée selon NF EN 12338 « Dosage après enrichissement par amalgame »

Tableau 3-20. Caractéristiques agronomiques des sédiments étudiés

		Paramètres	Méthode	Unité	DUR	GAR	ISE	RHI		
Paramètres physiques	Répartition granulométrique (avec décarbonatation)	Argile (<2 µm)	NF X31-107	%	10,7	13,3	30,5	19,0		
		Limon fin (2 – 20 µm)	NF X31-107	%	26,9	33,7	33,9	18,9		
		Limon grossier (20 – 50 µm)	NF X31-107	%	20,4	34,0	14,6	20,5		
		Sable fin (50 – 200 µm)	NF X31-107	%	10,4	5,4	0,4	8,8		
		Sable grossier (0,2 – 2mm)	NF X31-107	%	0,1	0,3	0,0	0,1		
	Classe de texture		Triangle du GEPPA ¹		-	L	Las	Als	Las	
	Capacité de rétention en air pF 2,0		NF EN 13041		% vol	81,7	17,5	83,2	82,7	
	Masse volumique apparente sèche à pF 2,0		NF EN 13041		g/l	241,0	730,1	161,2	207,9	
	Porosité à pF 2,0		NF EN 13041		% vol	90,8	71,3	93,7	92,1	
	Capacité de rétention à pF 4,2		NF ISO 11274		% MS	8,5	16,4	15,3	19,0	
Paramètres organiques	Matière organique		NF ISO 14235		% MS	1,29	5,68	1,45	4,50	
	Carbone organique		NF ISO 14235		% MS	0,75	3,31	0,84	2,62	
	Rapport C/N		Calcul		-	15,5	10,0	10,9	11,9	
Paramètres chimiques	pH eau		NF ISO 10390		-	8,7	8,0	8,6	8,3	
	pH KCl		NF ISO 10390		-	8,5	7,8	8,2	7,8	
	Conductivité		NF ISO 11265		mS/cm	0,31	0,96	0,17	0,32	
	CaCO ₃ total		NF ISO 10693		%	30,2	7,7	19,1	28,3	
	CEC, méthode METSON		NF X 31-130		cmol ⁺ /kg	3,2	11,9	6,7	13,3	
Paramètres nutritifs	Majeurs totaux	Azote élémentaire total, méthode DUMAS		NF ISO 13878		% MS	0,048	0,329	0,077	0,219
		P ₂ O ₅ total		NF EN ISO 11885		% MS	0,13	0,18	0,17	0,19
		CaO total		NF EN ISO 11885		% MS	15,68	5,32	11,76	17,36
		K ₂ O total		NF EN ISO 11885		% MS	0,35	0,32	0,44	0,32
		MgO total		NF EN ISO 11885		% MS	3,13	1,27	1,58	2,26
		Na ₂ O total		NF EN ISO 11885		% MS	0,04	0,06	0,06	0,03
	Majeurs échangeables	Phosphore assimilable, méthode OLSEN		NF ISO 11263		mg/kg MS	7,5	39,7	11,6	76,3
		CaO échangeable, ext. acétate NH ₄		NF X 31-108		mg/kg MS	9298	12334	9137	10894
		K ₂ O échangeable, ext. acétate NH ₄		NF X 31-108		mg/kg MS	47	95	98	102
		MgO échangeable, ext. acétate NH ₄		NF X 31-108		mg/kg MS	238	221	223	416
		Na ₂ O échangeable, ext. acétate NH ₄		NF X 31-108		mg/kg MS	21	52	37	49

¹GEPPA : Groupe d'Etude pour les Problèmes de Pédologie Appliquée

Tableau 3-20. Caractéristiques agronomiques des sédiments étudiés (suite)

		<i>Paramètres</i>	<i>Méthode</i>	<i>Unité</i>	<i>DUR</i>	<i>GAR</i>	<i>ISE</i>	<i>RHI</i>
<i>Paramètres nutritifs (suite)</i>	<i>Oligo-éléments</i>	<i>Bore assimilable, ext. eau bouillante</i>	<i>NF X 31-122 modifiée</i>	<i>mg/kg MS</i>	<i>0,0851</i>	<i>0,0965</i>	<i>0,1132</i>	<i>0,1647</i>
		<i>Cuivre biodisponible, ext. EDTA</i>	<i>NF X 31-120</i>	<i>mg/kg MS</i>	<i>8,4</i>	<i>8,6</i>	<i>12,0</i>	<i>8,7</i>
		<i>Fer biodisponible, ext. EDTA</i>	<i>NF X 31-120</i>	<i>mg/kg MS</i>	<i>46,2</i>	<i>113,1</i>	<i>117,6</i>	<i>134,8</i>
		<i>Manganèse biodisponible, ext. EDTA</i>	<i>NF X 31-120</i>	<i>mg/kg MS</i>	<i>54,0</i>	<i>12,1</i>	<i>163,1</i>	<i>36,5</i>
		<i>Zinc biodisponible, ext. EDTA</i>	<i>NF X 31-120</i>	<i>mg/kg MS</i>	<i>2,6</i>	<i>44,2</i>	<i>5,0</i>	<i>14,1</i>
		<i>Cobalt total (Co)</i>	<i>NF EN ISO 11885</i>	<i>mg/kg MS</i>	<i>12,9</i>	<i>14,2</i>	<i>16,0</i>	<i>8,3</i>
		<i>Molybdène total</i>	<i>NF ISO 11466</i>	<i>mg/kg MS</i>	<i>0,6751</i>	<i>0,8817</i>	<i>0,5737</i>	<i>0,564</i>
		<i>Paramètres environnementaux (ETM)</i>	<i>Cadmium (eau régale)</i>	<i>NF ISO 11466</i>	<i>mg/kg MS</i>	<i>0,26</i>	<i>1,16</i>	<i>0,26</i>
<i>Chrome (eau régale)</i>	<i>NF ISO 11466</i>		<i>mg/kg MS</i>	<i>31,71</i>	<i>37,03</i>	<i>34,94</i>	<i>30,31</i>	
<i>Cuivre (eau régale)</i>	<i>NF ISO 11466</i>		<i>mg/kg MS</i>	<i>36,12</i>	<i>34,23</i>	<i>32,52</i>	<i>30,78</i>	
<i>Mercure élémentaire total</i>	<i>NF EN 12338 modifiée</i>		<i>mg/kg MS</i>	<i>0,062</i>	<i>0,072</i>	<i>0,041</i>	<i>0,154</i>	
<i>Nickel (extrait à l'eau régale)</i>	<i>NF ISO 11466</i>		<i>mg/kg MS</i>	<i>41,82</i>	<i>39,85</i>	<i>44,13</i>	<i>28,35</i>	
<i>Plomb (extrait à l'eau régale)</i>	<i>NF ISO 11466</i>		<i>mg/kg MS</i>	<i>30,95</i>	<i>36,94</i>	<i>23,90</i>	<i>20,43</i>	
<i>Zinc (extrait à l'eau régale)</i>	<i>NF ISO 11466</i>		<i>mg/kg MS</i>	<i>84,57</i>	<i>237,14</i>	<i>103,87</i>	<i>103,07</i>	

4. INTERPRETATION DES RESULTATS SELON LES FILIERES

Les avantages et les inconvénients des caractéristiques des sédiments fins étudiés sont discutés dans cette section. L'analyse des caractéristiques des sédiments est restituée par voie de valorisation, pour les cinq filières pressenties comme les plus pertinentes, puis une interprétation est donnée pour chaque sédiment considéré.

4.1. LA FILIERE « CIMENT »

Cette section a pour objectif de discuter de l'aptitude des sédiments fins de barrage à être utilisés comme matière pour la fabrication du constituant de base du ciment : le clinker.

Pour rappel, le clinker est obtenu par broyage et cuisson à 1 450 °C d'un mélange, appelé cru, essentiellement composé d'environ 80 % de calcaire, apportant des carbonates de calcium, et de 20 % d'argile, source de silice, d'alumine et d'oxyde de fer.

La forte teneur en minéraux argileux et/ou en calcaire des sédiments sont des paramètres favorables pour une utilisation en cru de cimenterie. L'analyse minéralogique par DRX a montré que les sédiments étudiés renferment une fraction argileuse relativement importante (22 % à 35 % de phyllosilicates). De la calcite est aussi présente en quantité significative dans les sédiments ISE et RHI (respectivement 19 % et 24 %). Le sédiment GAR présente du quartz en quantité importante (36 %). Cela peut constituer un facteur limitant la quantité théorique de sédiment dans un cru de cimenterie. De plus, si les grains de quartz sont d'une taille importante, ils peuvent être source d'une usure plus rapide des systèmes de broyage du cru.

Bien que la composition minéralogique et la composition chimique en éléments majeurs des sédiments soient liées, c'est principalement les éléments chimiques majeurs qui sont étudiés. Cette étude permet de discuter de l'adéquation technique ou faisabilité, et donc, du potentiel des sédiments à être employés comme substitut de matière première traditionnelle. En effet, l'identité minéralogique des composants est décomposée sous l'effet de la température du four pour donner des oxydes réactifs qui réagiront entre eux pour former les phases du clinker. Pour autant que l'on respecte les formules donnant accès à la stœchiométrie requise pour la formation des silicates de calcium (C₃S et C₂S) et des aluminates (C₃A et C₄AF), on peut composer un cru à partir de deux, trois ou quatre composants. La composition du cru peut donc être très variable et ajustée.

Pour former les quatre phases minéralogiques qui composent essentiellement le clinker, il faut donc porter attention aux éléments chimiques qui les composent, à savoir le silicium, le calcium, l'aluminium et le fer. Or, on retrouve ces éléments comme étant les principaux éléments chimiques des sédiments étudiés.

Tableau 3-21. Comparaison entre les compositions chimiques des sédiments étudiés et celles des matières traditionnelles

	<i>Compositions courantes des matières premières de base [CP/RAC, 2008]</i>			<i>Sédiments fins de barrage étudiés</i>			
	<i>Calcaire</i>	<i>Marne</i>	<i>Argile</i>	<i>DUR</i>	<i>GAR</i>	<i>ISE</i>	<i>RHI</i>
<i>PF</i>	40 - 44	2 - 42	1 - 20	-	13,4	14,4	22,8
<i>SiO₂</i>	0,5 - 3,0	3 - 50	37 - 78	-	56,31	47,31	43,12
<i>Al₂O₃ + TiO₂</i>	0,1 - 1,0	1 - 20	7 - 30	-	15,57	14,82	8,30
<i>Fe₂O₃ + MnO</i>	0,1 - 0,5	0,5 - 10,0	2 - 15	-	5,65	5,10	3,06
<i>CaO</i>	52 - 55	5 - 52	0,5 - 25,0	-	4,13	13,03	18,43
<i>MgO</i>	0,5 - 5,0	0,5 - 5,0	~ 5	-	1,93	2,10	2,44
<i>K₂O</i>	~ 0,3	~ 3,5	~ 0,55	-	1,82	2,14	1,16
<i>Na₂O</i>	~ 0,1	~ 0,2	0,1 - 0,3	-	0,73	0,95	0,59
<i>SO₃</i>	~ 0,1	0,1 - 4,0	~ 3	-	0,15	0,09	0,06

Le tableau 3-21 compare la composition chimique des sédiments fins de barrage étudiés avec celles des deux matières premières classiquement utilisées dans le cru pour la fabrication du clinker. Les compositions en éléments majeurs des sédiments, exprimées en oxyde, sont assez proches de celles de l'argile et de la marne (roche argilo-calcaire à calco-argileuse) présentées dans le tableau 3-21. Il est tant naturel d'en déduire que les sédiments fins pourraient théoriquement se substituer à une grande partie de l'argile et à une part de calcaire.

Le sédiment GAR est principalement composé de quartz (36 %) et de phyllosilicates (35 %). Les carbonates ne sont présents qu'en faible quantité. Le quartz est composé de silice. Or, une teneur en silice élevée peut être un frein à cette voie de valorisation : elle pourrait être le facteur limitant la proportion de sédiments dans le cru. En effet, pour les matériaux de dragage du port de New-York / New Jersey, la quantité théorique de sédiment dans le cru a été limitée par la teneur en SiO_2 [Weimer *et al.*, 2002]. En revanche la présence de phyllosilicates, sources d'alumine et d'oxyde de fer, rend favorable une valorisation en cimenterie. Ce sédiment est aussi le plus grossier ($d_{90} = 189,4 \mu\text{m}$) parmi les sédiments étudiés. Les grains les plus gros probablement de type sable siliceux au regard de la composition minéralogique, devront être broyés. Le quartz étant un minéral très dur, il peut accélérer l'usure des broyeurs. Les caractéristiques du sédiment GAR restent néanmoins intéressantes, notamment si les matériaux issus des carrières exploitées par la cimenterie sont pauvres en silice.

Le sédiment RHI a la perte au feu la plus importante (22,8 %) parmi les sédiments étudiés. Cela est dû à la présence de carbonates en quantité assez importante et en matière organique. Avec de l'argile et des carbonates, ce sédiment se rapproche de la composition d'une roche marneuse. Ainsi, ce sédiment est le plus riche en CaO et le plus pauvre en SiO_2 . En revanche, il est aussi le plus pauvre en alumine et oxyde de fer puisque moins riche en phyllosilicates.

Parmi les trois sédiments étudiés dans cette filière, le sédiment ISE présente des caractéristiques qui semblent les plus adaptées à une valorisation dans un cru de cimenterie. La granulométrie est fine ($d_{90} = 24,8 \mu\text{m}$). Il permet donc une économie d'énergie pour le broyage, et les phyllosilicates et carbonates sont en quantité importante. Par conséquent, la composition en éléments majeurs se rapproche d'une argile marneuse.

Par ailleurs, les sédiments étudiés contiennent des concentrations variables en métaux et métalloïdes tels que l'arsenic, le cadmium, le chrome, le cuivre, le plomb, le mercure et le zinc comme le montre le tableau 3-10 présenté dans la section 2.1.4 de ce chapitre. Les concentrations mesurées de ces ETM sont faibles. Elles ne constituent pas de problèmes environnementaux ni techniques pour cette filière de valorisation. Cependant, tous ces éléments mineurs, même en faible concentration, peuvent modifier légèrement la qualité des clinkers. L'influence des éléments traces dans la fabrication de clinker a précédemment été étudiée par Bhatti [1995].

Les quatre cimentiers présents en France ont signé en 2001 une charte précisant les limites d'acceptabilité à l'entrée de l'usine des déchets ajoutés directement au cru (voir chapitre 2). Ces conditions restent très générales et comportent trois points :

- une teneur minimale en éléments majeurs constitutifs du cru ;
- des restrictions sur les teneurs en métaux lourds ;
- une teneur limite en hydrocarbures totaux.

En pratique, chaque cimenterie possède ses contraintes internes spécifiques à son installation, son approvisionnement et son mode de fonctionnement. Une synthèse de des spécifications de plusieurs cimenteries est donnée dans le chapitre précédent (voir tableau 2-9). Ces spécifications portent sur des caractéristiques physiques (teneur en eau, granulométrie, ...) et chimiques. Outre les éléments traces métalliques (ETM) et les composés traces organiques (CTO), les éléments dont les teneurs sont susceptibles d'être limitées sont le chlore et autres halogénés (fluor, brome, iode), le soufre, le phosphore et les alcalins.

Une fois suffisamment déshydratés pour être pelletables et économiquement rentables, les sédiments étudiés respectent l'ensemble de ces contraintes en considérant l'absence de polluants

organiques, non analysés dans la caractérisation des sédiments. Notons que certains polluants, lors de la montée en température sont susceptibles de se transformer en composés organiques volatils.

En conclusion, au regard des caractéristiques des trois sédiments étudiés, une utilisation en cru de cimenterie pour la fabrication de clinker semble techniquement faisable. Les compositions chimiques en éléments majeurs des sédiments étudiés sont similaires à celles des matières premières usuellement employées en cimenterie. C'est le sédiment ISE qui présente les caractéristiques les plus adaptées parmi les matériaux étudiés. Néanmoins, les éléments d'interprétation donnés précédemment se basent sur des considérations générales. Une analyse plus complète doit également prendre en compte les caractéristiques des autres matières premières traditionnellement utilisées par l'usine.

4.2. LA FILIERE « BETONS, MORTIERS, COULIS »

Le béton est fabriqué en usine ou sur le chantier à partir de ciment, d'eau et de différents matériaux granulaires comme du sable, du gravier et diverses additions minérales. Chacun des différents constituants va jouer un rôle et influencer les caractéristiques des bétons, que ce soit à l'état frais ou l'état durci.

Les sédiments étudiés sont relativement fins. Leurs passants à 63 μm sont supérieurs à 70 %, excepté pour le sédiment GAR (64 %). Compte tenu de leur finesse, on peut envisager d'utiliser les sédiments afin de corriger les sables dépourvus d'éléments fins. Ils permettent de combler les vides entre les autres particules de dimensions plus importantes et fournissent une compacité plus importante du squelette granulaire. Au regard de la granulométrie, on peut penser qu'ils jouent un rôle de filler avec des effets aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

Cette finesse est confirmée par la surface spécifique importante de sédiments étudiés. Pour tous les sédiments étudiés, la surface spécifique Blaine est supérieure à 300 m^2/kg , soit une finesse supérieure aux spécifications pour les additions calcaires de type A [NF P 18-508], les plus fines.

Les sédiments étudiés sont en partie composés de minéraux argileux. Or, d'une manière générale, les argiles influencent le comportement des bétons et mortiers. Le Roux et Unikowski [1980] expliquent que les minéraux argileux agissent :

- par absorption d'eau : il existe vis-à-vis de l'eau une compétition entre l'argile et le ciment. Bien que la quantité d'eau soit globalement très largement suffisante pour hydrater la totalité du ciment, il n'est pas impossible que localement certains grains de clinker ne puissent pas s'hydrater ;
- par effet d'écran, l'argile venant s'opposer à la liaison liant-granulat ;
- par effet pouzzolanique : les argiles, suivant leur nature, peuvent être attaquées par le liant et contribuer à la création de nouveaux hydrates, ce qui peut atténuer les effets négatifs dus aux deux mécanismes précédents ;
- par action sur la compacité : l'introduction d'éléments fins dans un mélange granulaire peut se traduire par une augmentation des résistances liée à une meilleure compacité.

La valeur au bleu (MB) est utilisée pour évaluer la nocivité des particules les plus fines, majoritairement composées de minéraux argileux. Les normes relatives au métakaolin [NF P 18-513], aux additions siliceuses [NF P 18-509] et aux additions calcaires [NF P 18-508] fixent une valeur seuil de 10 g/kg . Les valeurs que présentent les sédiments étudiés sont assez variables (voir tableau 3-22). Le sédiment DUR, avec $\text{MB} = 7 \text{ g}/\text{kg}$ a la valeur la plus faible des quatre sédiments étudiés. C'est le seul sédiment qui a une valeur au bleu inférieure à 10 g/kg . Les sédiments ISE et GAR ont des valeurs un peu plus importantes. C'est le sédiment RHI, avec $\text{MB} = 24 \text{ g}/\text{kg}$, qui semble avoir les particules les plus néfastes. L'analyse minéralogique de ce sédiment montre que le cortège argileux est en partie composé d'un minéral argileux interstratifié smectite-chlorite, ce qui pourrait en partie expliquer la valeur au bleu plus importante. En effet, la smectite est une espèce argileuse qui possède des liaisons particulièrement lâches entre ses feuillets constitutifs, si bien que la quantité d'eau susceptible d'être adsorbée au cœur même des particules argileuses, peut être considérable. Cela se traduit par une grande surface spécifique et des variations importantes de volume du matériau.

Notons que dans la norme NF EN 12620 « Granulats pour béton », qui encadre aussi les fillers, il n'y a pas de limite pour la valeur au bleu. Les limites dépendent du retour d'expérience local sur l'emploi des divers granulats.

Tableau 3-22. Rappel de certaines caractéristiques physico-chimiques des sédiments étudiés

<i>Référence des sédiments</i>	<i>DUR</i>	<i>GAR</i>	<i>ISE</i>	<i>RHI</i>	
<i>Caractéristiques physiques</i>	<i>Passant à 2µm (en %)</i>	7,8	3,4	21,2	6,3
	<i>Passant à 63µm (en %)</i>	83,3	64,0	100,0	73,8
	<i>Surface spécifique Blaine (m²/kg)</i>	-	437	>700	512
	<i>Valeurs au bleu MB (g/kg)</i>	7	14	18	24
	<i>Masse volumique des grains ρ_s (en g/cm³)</i>	2,74	2,65	2,71	2,59
<i>Caractéristiques chimiques</i>	<i>Teneur en SO₃ (en %)</i>	-	0,15	0,09	0,06
	<i>Silice soluble (%)</i>	-	12,98	12,13	10,81
	<i>Teneur totale en alcalis Na₂O_{eq}* (en %)</i>	-	1,93	2,36	1,35
	<i>Teneurs moyennes en MO (en %) – calcination à 550 °C</i>	3,0	9,1	3,6	6,9

*Na₂O + 0,658 K₂O

Les sédiments étudiés présentent des teneurs en matière organique variable. Celles-ci peuvent être considérées comme des impuretés susceptibles de nuire aux qualités des bétons et des mortiers. En effet, elles peuvent avoir une influence défavorable sur la prise et le durcissement, et être à l'origine d'une chute des résistances. On peut supposer que les teneurs en MO des sédiments DUR et ISE, n'auront qu'une influence modérée sur la qualité finale du produit. En revanche, pour les sédiments RHI et GAR, les teneurs en MO pourraient avoir une influence significative sur les caractéristiques finales des produits élaborés.

Certains sels, tels que les sulfates, sont à surveiller pour les granulats et les additions minérales. Ils peuvent être à l'origine de phénomènes de gonflement ou de tâches. Ils peuvent aussi perturber la prise et les actions des adjuvants d'où la nécessité de limiter leur teneur dans le béton. Pour les additions de type métakaolin, la valeur seuil en SO₃ est fixée par la norme NF P 18-513 à 1 %. Les concentrations mesurées en SO₃ pour tous les sédiments étudiés sont en dessous de cette limite. Le sédiment avec la concentration la plus élevée (0,15 %) est le sédiment ISE.

Pour les additions minérales pour le béton, la teneur en alcalins totaux est à déclarer. Un taux trop élevé d'alcalins dans le béton est susceptible de contribuer à des conditions favorables aux phénomènes d'alcalis réaction, qui peuvent provoquer un gonflement et des fissurations du béton. La norme NF EN 450-1, relative aux cendres volantes, précise la teneur totale en alcalis, calculée sous la forme de Na₂O_{eq}, qui ne doit pas excéder 5,0 % en masse. Pour les sédiments étudiés, les teneurs en Na₂O équivalent sont comprises entre 1,35 % et 2,36 %.

En synthèse, la finesse des sédiments étudiés apparaît comme un élément favorable à leur utilisation. Les caractéristiques chimiques telles que les teneurs en sulfates ou en alcalins sont en quantité suffisamment faibles pour qu'elles n'aient pas d'influence.

En revanche, certaines caractéristiques des sédiments étudiés sont susceptibles d'être néfastes à leur emploi. Il s'agit principalement de leur teneur en matières organiques et de leur teneur en minéraux argileux. Ces paramètres pourraient affecter la qualité des mortiers et bétons.

Par ailleurs, bien que l'eau soit un composant essentiel du béton, il faut que les sédiments aient une humidité faible pour être utilisés. En effet, les installations de fabrication de béton ne sont pas adaptées pour employer des matériaux avec une teneur en eau élevée. Pour une application à une échelle industrielle, il sera primordial de considérer ce problème afin d'envisager la fabrication d'un produit final avec les techniques de fabrication traditionnelles.

Considérant les nombreuses contraintes existantes, l'emploi de sédiments fins paraît délicat, certains types de bétons spécifiques pourraient intégrer des sédiments. Il s'agit par exemple de bétons ne nécessitant pas des performances mécaniques élevées tels que les coulis de remblaiement de tranchée ou certains bétons auto-plaçant. De plus, ces matériaux nécessitent un dosage en fines plus important que pour les bétons classiques.

Parmi les sédiments étudiés, le sédiment DUR présente les caractéristiques les plus favorables à un emploi. Ce sédiment a la plus faible valeur au bleu ainsi que la plus faible teneur en MO.

Le sédiment ISE a aussi une teneur en MO relativement faible. Cependant la valeur au bleu est plus élevée que pour le sédiment DUR. Cela est à relier au fait que les minéraux argileux sont en quantité plus importante. L'emploi du sédiment ISE, au regard de ses caractéristiques, semble donc moins favorable que le sédiment DUR.

Enfin, parmi les quatre sédiments étudiés, ce sont les sédiments RHI et GAR qui présentent les caractéristiques les moins intéressantes pour un emploi dans des bétons. En effet, en plus de présenter des valeurs au bleu relativement importantes, ce sont ces deux sédiments qui contiennent le plus de matière organique. Or, nous venons de voir que ces deux paramètres sont défavorables pour cette filière de valorisation.

4.3. LA FILIERE « MATERIAU ROUTIER ET OUVRAGE GEOTECHNIQUE »

Pour une utilisation comme matériau routier et assimilé, les caractéristiques des sédiments fins auxquelles il faut porter attention sont la granulométrie, l'argilosité et la teneur en matière organique. Ces trois paramètres sont demandés pour les différentes classifications géotechniques de référence qui permettent d'identifier les sols fins pour un usage routier ou non. Ils sont notamment fondamentaux dans le classement du GTR [SETRA-LCPC, 1992], référence en France pour les applications routières. De plus, ces trois critères sont en accord avec les conclusions de Duan [2008], qui indiquent qu'une caractérisation minimale, pour toute valorisation de sédiments, comprend la répartition dimensionnelle, les teneurs en matière organique et les limites d'Atterberg.

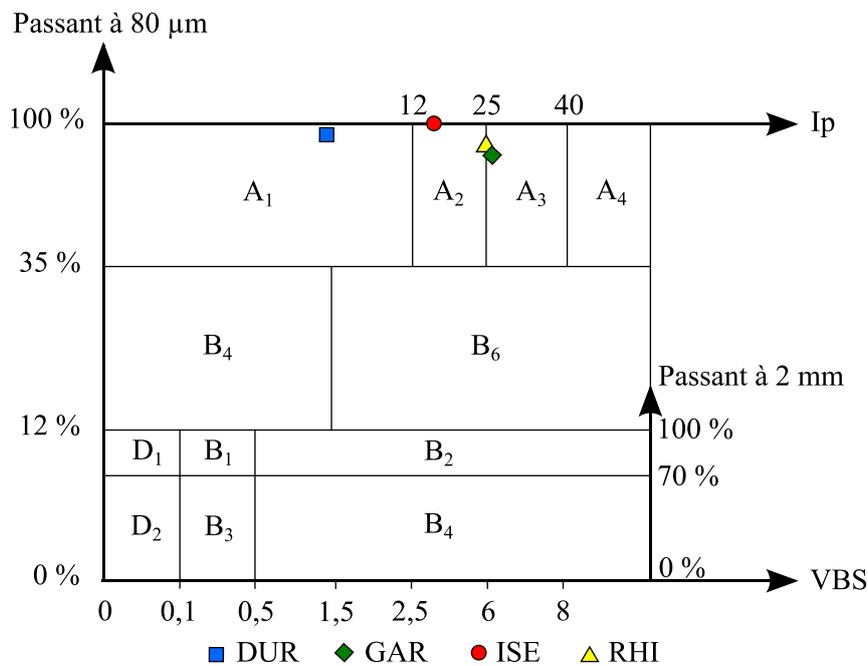


Figure 3-25. Nature des sédiments selon la classification des matériaux du GTR

La caractérisation selon ces paramètres permet de classer ces sédiments selon plusieurs standards français et internationaux, voir tableau 3-23. L'identification des sédiments étudiés selon l'*Unified Soil Classification System* (USCS) défini dans la norme ASTM D 2487 et, le système de l'*American of State Highway and Transportation Officials* défini dans la norme AASHTO M-145, est donnée à titre indicatif.

Tableau 3-23. Classification des sédiments.

Classement	Normes	DUR	GAR	ISE	RHI
GTR	GTR (SETRA-LCPC, 1992)	A1	F11-A3	F11-A2	F11-A3
USCS	ASTM D 2487	ML	OH	ML	OH
AASHTO	AASHTO M-145	A-4	A-7-5	A-7-6	A-7-5

Le passant à 80 μm est supérieur à 35 % pour tous les sédiments étudiés. Par conséquent, ils sont tous de classe A « sols fins », voir figure 3-25.

Les sédiments ISE, GAR et RHI sont identifiés comme faiblement organiques (classe F11) puisque leurs teneurs en MO sont comprises entre 3 et 10 %. Du point de vue technique, les matières organiques (MO) ont des caractéristiques indésirables pour un matériau routier. Elles subissent des changements de volume sous l'effet des charges et des variations d'humidité. De plus, elles sont à l'origine d'effets néfastes sur l'hydratation des liants lors de la phase de traitement pour une application géotechnique. Remarquons cependant que le sédiment ISE, avec 3,6 % de MO, ne dépasse que de peu le seuil de 3 % de MO distinguant les matériaux dits non organiques des matériaux faiblement organiques.

Les sédiments qui renferment le plus de matière organique présentent aussi les indices de plasticité les plus élevés. En effet, ce sont les sédiments RHI et GAR, avec respectivement des indices de plasticité de 25 et 26, qui présentent l'argilosité la plus prononcée. Pour le sédiment GAR, on peut supposer que la quantité importante de phyllosilicates (35 %) soit à l'origine d'une partie de cette plasticité. Quant au sédiment RHI, la quantité de phyllosilicates est nettement plus faible (22 %), mais la nature des minéraux argileux est aussi très différente. Ainsi, le cortège argileux du sédiment RHI est notamment composé de minéraux interstratifiés smectite-chlorite. Or la smectite est une espèce argileuse active, comme rappelé sur la figure 3-26. Ainsi, la plasticité des sédiments est à lier à la quantité et à la nature des phyllosilicates.

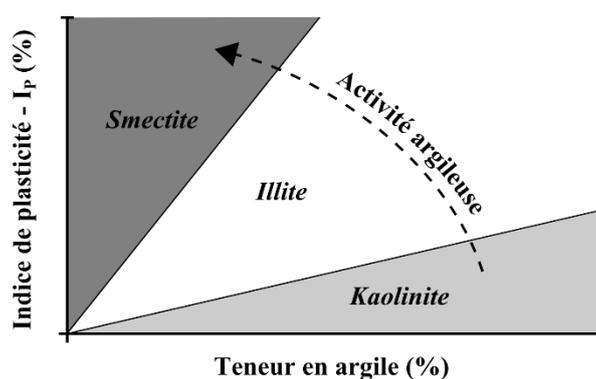


Figure 3-26. Relation entre la teneur en argile, l'indice de plasticité et la nature des minéraux argileux [d'après Sumner, 1999]

Au-delà des classifications existantes, deux familles se distinguent clairement au regard de cette caractérisation. Une première avec des sédiments, DUR et ISE, peu plastiques, une très faible voire aucune fraction sableuse, et des teneurs en matières organiques faibles, proches de 3 %. La deuxième famille, avec les sédiments RHI et GAR qui sont plus plastiques bien qu'avec une fraction sableuse plus importante et avec des teneurs en matières organiques plus significatives.

Dans le premier groupe, DUR et ISE, la faible teneur en matière organique ainsi que la faible plasticité sont des éléments favorables à leur utilisation dans cette filière. En revanche, la faible proportion en éléments grossiers sera à l'origine d'un squelette interne médiocre. Les sédiments du second groupe, GAR et RHI, qui sont à l'inverse plus sableux, présenteront une meilleure structure interne. Toutefois, la forte teneur en matière organique ainsi que la plasticité plus prononcée sont des éléments défavorables à l'efficacité du traitement et par conséquent, rendent difficile leur utilisation comme matériau routier.

Finalement, les sédiments étudiés sont assimilables à des sols fins faiblement argileux à argileux et pouvant être faiblement organiques selon les cas considérés. Ils ne peuvent être employés directement. Un traitement préalable est recommandé afin qu'ils soient utilisés comme matériau routier dans des applications de type couche de forme, piste cyclable, voie piétonne. Il faudra aussi prendre en compte le fait que les sédiments fins soient déshydratés jusqu'à une teneur en eau acceptable de l'ordre de 20 à 30 %.

4.4. LA FILIERE « MATERIAU CERAMIQUE »

Les matériaux de terre cuite sont fabriqués à partir d'argiles. Après une préparation poussée, le mélange est mis en forme, séché et finalement cuit. Les pâtes des céramiques peuvent être constituées d'une seule ou plusieurs argiles, mélangées à des modificateurs minéraux, dits « non plastiques », tels que la poudre de quartz et du feldspath qui ont un effet dégraissant.

Dans le cas des sédiments fins, les argiles sont mélangées à d'autres éléments granulaires de plus grande taille, des limons voire des sables fins, et des matières organiques. Ces éléments de plus grande taille peuvent jouer le rôle de dégraissant.

La distribution granulométrique des mélanges argileux a une grande importance sur leurs propriétés. Une certaine teneur en argiles et en limons est donc à rechercher dans les mélanges de production selon les produits.

Le diagramme de Winkler reprend des données industrielles qui relient la granulométrie optimale et l'application, pour une mise en forme par extrusion. On voit sur la figure 3-27 que les sédiments fins étudiés, au regard de leurs répartitions granulométriques, ne semblent pas acceptables pour un usage comme composant seul. Il en est généralement de même avec des matériaux traditionnels, issus de carrières, puisqu'il faut préparer un mélange de production afin d'obtenir une pâte avec des caractéristiques optimales.

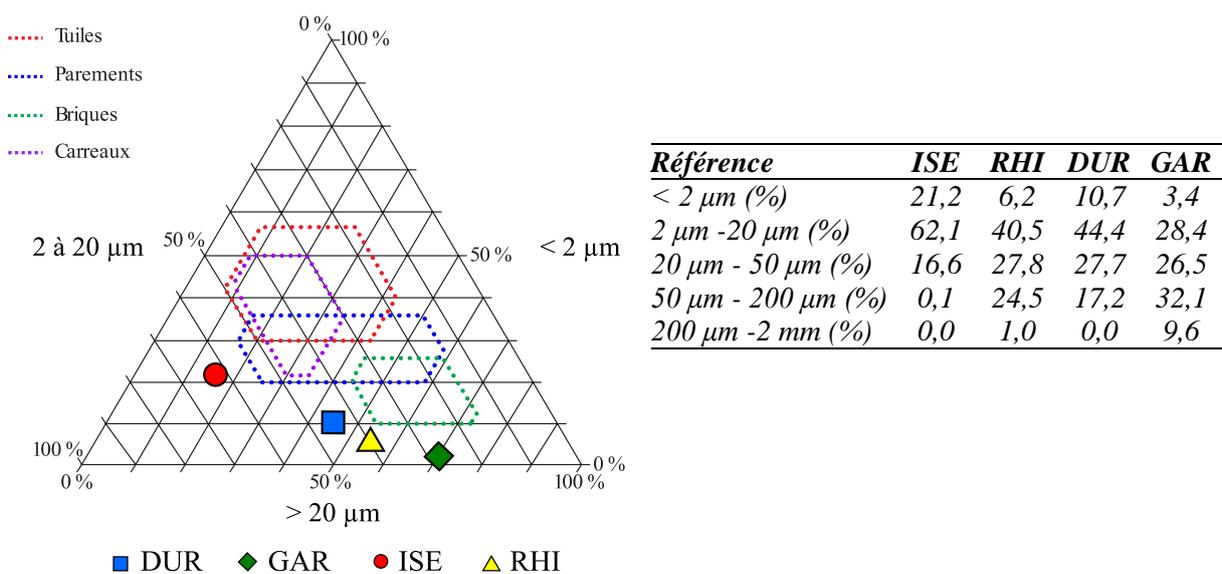


Figure 3-27. Répartition granulométrique des sédiments étudiés et diagramme de Winkler.

L'analyse chimique des sédiments ISE et GAR montre que les compositions sont proches de celles habituellement rencontrées pour les mélanges argileux (voir tableau 2-36).

Pour le sédiment RHI, la teneur en CaO est un peu supérieure aux valeurs moyennes. Cela vient du fait que ce sédiment contient le plus de carbonate parmi les sédiments étudiés. Il en résulte une perte au feu élevée, accentuée par la présence de matière organique. De plus, bien que le cortège argileux de ce sédiment soit en partie composé de kaolinite, la teneur en Al_2O_3 est plus faible que celle couramment rencontrée pour les mélanges argileux et les autres sédiments analysés.

Enfin, les teneurs en carbone organique mesurées pour les sédiments sont supérieures aux valeurs couramment observées dans les mélanges argileux. Pour le sédiment ISE, la valeur n'est que légèrement dépassée. En revanche, pour les sédiments GAR et RHI, la teneur en carbone organique est nettement supérieure aux teneurs habituellement observées.

Tableau 3-24. Composition chimique en éléments majeurs des sédiments et limites courantes des mélanges argileux pour la fabrication de terre cuite

	<i>Limites courantes pour la terre cuite [Kornmann, 2005]</i>	<i>Sédiments de barrage étudiés</i>			
		<i>DUR</i>	<i>GAR</i>	<i>ISE</i>	<i>RHI</i>
<i>Perte au feu (%)</i>	3 - 18	-	13,4	14,4	22,8
<i>SiO₂ (%)</i>	35 - 80	-	56,3	47,3	43,1
<i>Al₂O₃ (%)</i>	8 - 30	-	14,7	14,1	7,9
<i>TiO₂ (%)</i>	0,3 - 2	-	0,83	0,66	0,40
<i>Fe₂O₃ (%)</i>	2 - 10	-	5,59	4,94	3,00
<i>CaO (%)</i>	0,5 - 18	-	4,13	13,03	18,43
<i>MgO (%)</i>	0 - 5	-	1,93	2,10	2,44
<i>Na₂O (%)</i>	0,1 - 1,5	-	0,73	0,95	0,59
<i>K₂O (%)</i>	0,1 - 4,5	-	1,82	2,14	1,16
<i>Corg* (%)</i>	0,1 - 2	-	5,2	2,1	4,0

*Calculé avec la relation $Corg = MO / 1,72$

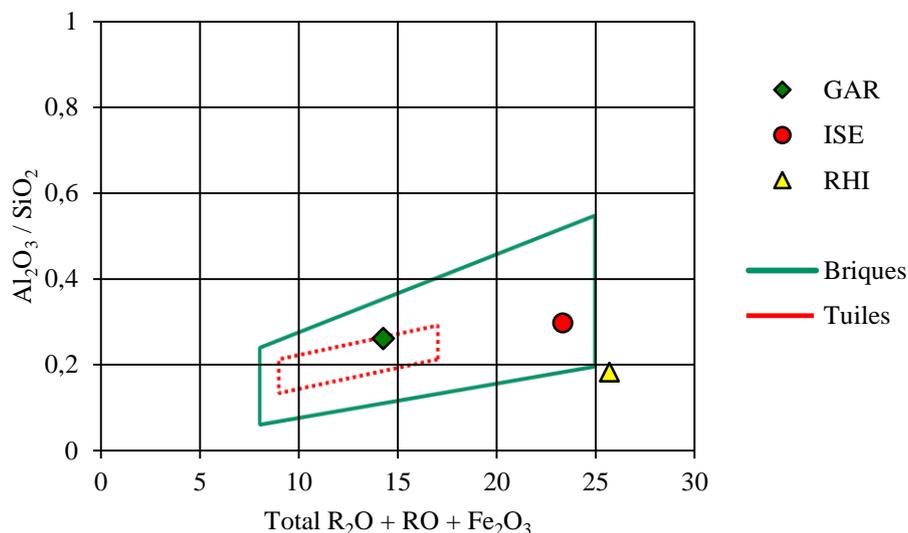


Figure 3-28. Diagramme Augustinik des compositions chimiques moyennes des terres cuites (CTMNC)

Le diagramme Augustinik (figure 3-28) représente le rapport des teneurs massiques en Al_2O_3 sur SiO_2 en fonction de la somme des teneurs $R_2O + RO + Fe_2O_3$ avec R_2O correspondant à $K_2O + Na_2O$ et RO correspondant à $CaO + MgO + MnO$. Ce diagramme confirme que le sédiment RHI est en dehors des domaines construits à partir des données initialement rencontrées pour les argiles utilisées

dans la fabrication de produits de terre cuite. Par contre, selon la composition chimique en éléments majeurs, les sédiments ISE et GAR seraient adaptés à une utilisation, seuls, dans l'industrie de la terre cuite.

Différents procédés de mise en forme peuvent être utilisés selon le type de céramique que l'on souhaite produire (voir chap. 2). Il est alors nécessaire d'avoir un type de pâte approprié. Selon le procédé, des pâtes liquides (25 à 35 % d'eau), plastiques (20 % d'eau) ou granulés (2 à 8 % d'eau) sont employées. Pour les matériaux de terre cuite, le procédé de mise en forme par extrusion nécessite des pâtes plastiques. Les sédiments fins, pour être utilisés, doivent alors avoir une teneur en eau adaptée.

La mise en forme des pièces pour la fabrication de matériaux en terre cuite est presque toujours réalisée par extrusion. Gippini [1969] a défini des plages limite de plasticité / indice de plasticité afin de déterminer les caractéristiques des mélanges et d'obtenir une mise en forme optimale. On peut situer les sédiments fins cet abaque de plasticité.

Parmi les sédiments étudiés, le sédiment ISE présente des propriétés de mise en forme directement acceptables (voir figure 3-29). Pour les autres sédiments étudiés, un mélange est à envisager afin d'obtenir des propriétés de mise en forme plus adéquates.

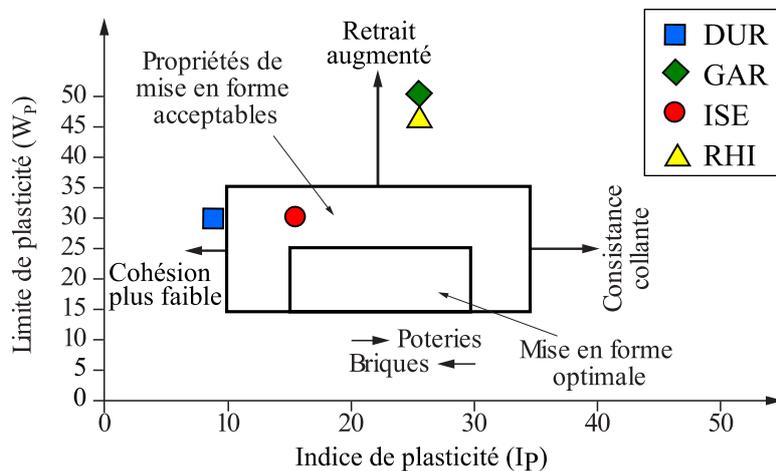


Figure 3-29. Classification des sédiments étudiés selon le diagramme de Gippini [1969]

En conclusion, les sédiments sont constitués des mêmes minéraux que ceux retrouvés dans les mélanges. L'espèce argileuse la plus abondante dans les sédiments étudiés est l'illite, excepté pour le sédiment RHI où elle reste présente en quantité significative. Or, d'après Alviset [1987], les roches argileuses employées en terre cuite en France sont le plus souvent de type illitique ou kaolino-illitique.

Parmi les sédiments étudiés, le sédiment ISE apparaît comme le plus adapté pour une utilisation comme matière première alternative pour la fabrication de terre cuite. Ce sédiment pourrait présenter une plasticité adaptée. De plus, l'analyse chimique montre que sa composition est appropriée.

Le sédiment GAR a aussi une composition en éléments majeurs appropriée. Cependant, la limite de plasticité élevée de ce sédiment peut être à l'origine d'un retrait trop important. De plus la quantité de matière organique est aussi un peu trop importante.

Enfin, les caractéristiques du sédiment RHI semblent les plus défavorables. Ce sédiment présente en effet une limite de plasticité trop grande, une composition chimique mal adaptée, des matières organiques en quantité élevée et la faible teneur en phyllosilicates. De plus, quelques fragments coquilliers sont présents et peuvent altérer fortement les produits, notamment lors de la cuisson, avec la création de point de chaux vive.

4.5. LA FILIERE « AGRONOMIE »

Les résultats des analyses agronomiques sont discutés selon les deux logiques opérationnelles de valorisation :

- logique produit : valorisation en tant que matière fertilisante, conformément à la réglementation en vigueur. Elle est basée sur le respect des normes applicables en France : support de culture (terre végétale), engrais, amendement basique, amendement organique.
- logique déchet : valorisation par l'intermédiaire d'un plan d'épandage, conformément à la réglementation applicable aux boues d'épuration (arrêté du 08/01/1998 [JORF, 1998]).

L'interprétation agronomique se base sur les analyses des caractérisations agronomiques (éléments nutritifs totaux et assimilables), physiques (granulométrie) et d'innocuité (ETM), afin d'étudier les possibilités d'incorporation dans le sol ou d'apport en reconstruction de sol.

4.5.1. Interprétation vis-à-vis de la réglementation : logique produit

En France, le texte de base qui fixe les règles de mise sur le marché d'une matière fertilisante (engrais, amendement ou support de culture) est le Code Rural (Art. L.255-1 à L.255-11). Selon ce texte, les matières fertilisantes, vendues ou cédées à titre gratuit, doivent avoir obtenu une homologation, délivrée après acceptation du dossier par le ministère en charge de l'agriculture. Il existe exactement 5 cas de dispense :

1. Produit conforme à une norme française (NF) rendue d'application obligatoire par arrêté ministériel,
2. Produit ayant obtenu une autorisation provisoire de vente ou d'importation,
3. Engrais minéraux CE conformes au règlement CE n°2003/2003,
4. Rejets, dépôts, déchets au titre de la loi sur l'eau ou sur les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE), encadrés par des plans d'épandage,
5. Produits organiques bruts, sous-produits d'une exploitation agricole.

Nous examinons ici la conformité aux normes NF suivantes : NF U42-001 (engrais), NF U44-051 (amendements organiques), NF U44-001 (amendements basiques) et NF U44-551 (supports de culture).

► *Conformité à la norme NF U42-001 (engrais minéraux)*

Les engrais sont régis par la norme NF U42-001. Il s'agit de « matières fertilisantes dont la fonction principale est d'apporter aux plantes des éléments directement utiles à la nutrition (éléments fertilisants majeurs, éléments fertilisants secondaires, oligo-éléments). » Selon la législation, tout produit dont une des teneurs en N, P₂O₅ ou K₂O dépasse 3 % de la matière brute, ou dont la somme de ces trois éléments dépasse 7 %, doit être considéré comme engrais.

Ces concentrations n'étant pas atteintes pour les sédiments étudiés, ils ne peuvent pas revendiquer le statut d'engrais.

► *Conformité à la norme NF U44-051 (amendements organiques) :*

Les amendements organiques sont définis comme « matières fertilisantes composées principalement de combinaisons carbonées d'origine végétale, ou animale et végétale en mélange, destinées à l'entretien ou à la reconstitution du stock de matière organique du sol et à l'amélioration de ses propriétés physiques et/ou chimiques et/ou biologiques ». La norme NF U44-051 fixe les matières premières et procédés de transformation autorisés, ainsi que les critères analytiques à respecter. Parmi ces critères, la norme NF U44-051 fixe une teneur minimale en matière organique, de 15 % à 25 % de la matière fraîche selon les types de produits.

Les sédiments ne font pas partie de la liste exhaustive des matières premières autorisées dans les amendements organiques. De plus, les teneurs en matière organique déterminées lors de la caractérisation agronomique varient de 1,3 % à 5,7 %. Elles sont donc bien inférieures aux valeurs

minimales admissibles. Les sédiments étudiés ne peuvent donc pas revendiquer le statut d'amendement organique.

► **Conformité à la norme NF U44-001 (amendements minéraux basiques, dénomination « tangué »)**

Les amendements minéraux basiques sont définis comme « matières fertilisantes contenant des carbonates, des oxydes, des hydroxydes et/ou des silicates, généralement associés à du calcium et/ou du magnésium, et destinées principalement à maintenir ou à élever le pH du sol et à en améliorer les propriétés » par la norme NF U44-001. Certains sédiments peuvent s'apparenter à des « tangués », définies comme des amendements calcaires simples provenant de sables carbonatés de dépôts marins. Les tangués doivent contenir au minimum 15 % (sur produit brut) de CaO + MgO. Leur valeur neutralisante doit être au minimum de 15, et leur pH ne doit pas dépasser la valeur de 10.

Pour tous les sédiments fins étudiés, le pH est inférieur à 10. Les concentrations de CaO + MgO sur matière sèche des sédiments, calculées à partir de la caractérisation agronomique sont inférieures à 15 % pour deux sédiments GAR (6,6 %) et ISE (13,3 %). Pour les deux autres sédiments, la somme des concentrations en CaO et MgO est supérieure au seuil de 15 %. En effet, les valeurs pour les sédiments DUR et RHI sont respectivement de 18,8 % et 19,6 % de la matière sèche.

Dans le cas de norme NF U44-001, ce seuil minimum est sur le produit brut. Pour respecter ce critère, la teneur en matière sèche (ou siccité) des sédiments humides doit dépasser un certain niveau, à savoir 79,8 % pour le sédiment DUR et 76,5 % pour le sédiment RHI. Cela correspond à des teneurs en eau (w) pour les sédiments DUR et RHI de 25,3 et 30,7 % respectivement.

Pour deux des sédiments étudiés les plus riches en carbonates (DUR et RHI), des critères normatifs relatifs aux amendements basiques sont respectés. Pour confirmer que les caractéristiques de ces deux sédiments sont conformes aux exigences techniques de la norme NF U44-001, la valeur neutralisante doit également être déterminée. En revanche, les sédiments ISE et GAR ont des concentrations trop faibles en CaO+MgO pour revendiquer le statut d'amendement minéral basique.

Enfin, tous les sédiments étudiés proviennent de retenues d'eau continentales. Or, la dénomination « tangué » correspond à des sédiments d'origine marine, ce qui n'est donc pas le cas des sédiments étudiés. Bien que certains sédiments pourraient avoir des caractéristiques adéquates et similaires à certains types d'amendements minéraux basiques, le contexte normatif actuel exclut le cas des sédiments étudiés en raison de leur origine fluviale.

► **Conformité à la norme NF U44-551 (supports de culture) :**

Les supports de culture sont des substrats destinés à servir de milieu de culture à certains végétaux, le plus souvent en culture hors-sol. La norme NF U44-551 fixe les matières premières et procédés de transformation autorisés, ainsi que les critères analytiques à respecter.

La classe 1 « supports de culture minéraux et de synthèse minérale ou organique » est la plus proche des sédiments fins de barrage. La norme NF U 44-551 fixe des spécifications sur la teneur en MO de la matière sèche ainsi que, selon le type de support, sur la granulométrie et la teneur en calcaire totale. Le tableau 3-25 présente les types de support de culture pour lesquels se rapprochent les sédiments étudiés ainsi que leurs spécifications.

Selon les types de support de culture, des paramètres supplémentaires sont à déclarer de façon facultative ou obligatoire sans qu'il n'y ait de spécification normative. Il s'agit notamment de la conductivité, de la teneur en matière sèche, de la capacité de rétention en eau, du pH, de la capacité d'échange cationique, de la masse volumique ou encore de la garantie d'absence de graines d'adventices¹.

¹ Une adventice désigne, en agriculture, une plante qui pousse dans un endroit où on ne souhaite pas la voir se développer (champs, massifs...) car elle risquerait d'entrer en concurrence avec les plantes cultivées

Tableau 3-25. Dénomination et spécification des types de support de culture se rapprochant des sédiments de barrage

Dénomination du type	Mode d'obtention et composants essentiels	Spécifications		
		% MO	Granulométrie	% CaCO ₃ total
Terre support	Terre issue d'horizons de surface humifères ou d'horizons profonds pouvant être mélangée avec des matières minérales	1 à 5 de la MS	$d_{50} < 2 \text{ mm}$	-
Terre végétale	Terre issue d'horizons de surface humifères ou d'horizons profonds pouvant être mélangée avec des matières organiques d'origine végétale, des amendements organiques et/ou des matières minérales	3 à 15 de la MS	$d_{50} < 2 \text{ mm}$	-
Argile	Produit constitué de grains à structure feuilletée issu de gisement sédimentaire, ayant ou non subi des traitements mécaniques et des traitements thermiques de surface	-	$d_{50} < 2 \mu\text{m}$	< 10 %
Substrat minéral	Mélange de matières minérales pouvant intégrer des matières organiques et/ou des matières synthétiques	\leq à 10 de la MS	-	-

Les résultats des analyses agronomiques montrent que les spécifications normatives sont satisfaites par les sédiments étudiés. Tous les sédiments satisfont les spécifications du « substrat minéral » puisque leurs teneurs en matière organique sont inférieures à 10 %. Les spécifications relatives au type « terre végétale » sont satisfaites pour les sédiments GAR et RHI, leur teneur en matière organique étant respectivement de 5,7 % et 4,5 % de la MS. La teneur en MO des sédiments DUR et ISE, respectivement 1,3 % et 1,5 %, est trop faible pour satisfaire les spécifications du support de culture de type « terre végétale » mais suffisante pour répondre aux critères de la « terre support ». Enfin, aucun des sédiments étudiés n'est suffisamment fin au regard du support de culture de type « argile ». En effet, dans les cas des sédiments étudiés, la fraction granulométrique $< 2 \mu\text{m}$ ne représente pas de plus de 50 %. Remarquons que cette finesse pourrait être atteinte par d'autres sédiments de barrage, plus fins, ou encore si les sédiments étudiés faisaient l'objet d'une séparation granulométrique.

La norme NF U 44-551 énonce aussi des teneurs limites en éléments traces métalliques que doivent respecter les supports de culture. Ces teneurs limites sont les mêmes que celles données dans l'arrêté du 08 janvier 1998 [JORF, 1998] pour les teneurs en éléments-traces métalliques dans les sols qui ne doivent pas être dépassées pour réaliser des opérations d'épandage des boues de STEP. Les concentrations en ETM des matériaux étudiés sont inférieures aux teneurs limites. Ces concentrations en ETM des sédiments par rapport à ces valeurs seuils sont discutées dans la section « logique déchets ».

Par ailleurs, de par leur origine, les sédiments ne répondent pas directement à la définition de « terre végétale » et de « terre support ». Il est donc difficile de leur faire revendiquer ces statuts. En revanche, les définitions assez larges des supports de culture de type argile et substrat pourraient inclure les sédiments issus des retenues hydroélectriques.

Somme toute, les caractéristiques agronomiques des sédiments étudiés sont proches de certains types de support de culture normalisés mais, étant donné qu'ils ne sont pas listés, leur origine les handicape pour revendiquer ce statut.

► **Bilan pour une valorisation agronomique selon la logique produit**

Les caractéristiques des sédiments étudiés confirment le constat du chapitre précédent, à la section 5.2.1 portant sur le cadre applicable aux sédiments. Il n'est pas concevable d'envisager une valorisation des sédiments comme :

- « engrais » selon la norme NF U 42-001 ; les concentrations en NKP étant bien trop faibles,
- « amendement organique » selon la norme NF U 44-051 en raison de teneurs en matière organique insuffisantes.

Pour une valorisation comme « amendement basique » selon la norme NF U 44-001, les sédiments DUR et RHI pourraient avoir des caractéristiques conformes à certains types d'amendement basiques, leurs teneurs en CaO+MgO étant supérieures à 15. Il faudrait effectuer des essais complémentaires pour vérifier si la valeur neutralisante (VN) est supérieure à 15 et confirmer que les caractéristiques sont bien conformes à la norme. En revanche, les sédiments ISE et DUR ne présentent pas des concentrations suffisamment élevées en CaO et MgO. Rappelons enfin que pour la dénomination « tange », les sédiments doivent être d'origine marine. Ce cas vise essentiellement les sédiments du golf normand-breton.

Enfin, une valorisation des sédiments étudiés selon la norme NF U 44-551 « support de culture » apparaît comme la solution la plus envisageable. Les caractéristiques agronomiques des sédiments étudiés sont proches de certains types de support de culture normalisés mais leur origine les handicape pour revendiquer ce statut. En effet, les dénominations énoncées dans la norme sont assez restrictives. Le type de support de culture qui semble correspondre le mieux aux sédiments étudiés, tant du point de vue des spécifications que de la définition, est le type « substrat minéral ».

4.5.2. Interprétation vis-à-vis de la réglementation : logique déchet

La réglementation relative à l'épandage des boues des stations d'épuration urbaines (arrêté du 08/01/1998) est aussi utilisée, faute de réglementation spécifique, pour d'autres déchets. C'est notamment le cas des sédiments gérés à terre si un épandage agricole est envisagé. En effet, l'arrêté du 30 mai 2008 relatif aux opérations d'entretien des cours d'eau [JORF, 2008], précise que les « sédiments non remis dans le cours d'eau peuvent faire l'objet [...] d'un épandage agricole, sous réserve de l'accord des propriétaires des parcelles et du respect des prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles fixées par l'arrêté du 8 janvier 1998 ».

L'acceptation en épandage suppose d'avoir vérifié l'intérêt agronomique du sédiment pour les parcelles réceptrices, ainsi que son innocuité. Les analyses réalisées sur les sédiments permettent de vérifier leur conformité par rapport aux teneurs en éléments traces métalliques (ETM). Les analyses des teneurs totales en ETM indiquent que les sédiments satisfont les critères relatifs aux concentrations maximales en éléments traces métalliques de l'arrêté du 08/01/1998. En effet, les concentrations mesurées dans les sédiments de barrage sont très inférieures aux limites réglementaires définies pour les boues de STEP (voir tableau 3-26).

L'arrêté fixe également une quantité maximum épandable de 30 tonnes de MS/ha/10ans. Cependant, cette quantité peut être réduite en fonction des teneurs en éléments traces. En effet, des flux maximaux en métaux lourds (kg/ha/10ans) ont été fixés et peuvent déterminer une dose épandable inférieure à 30 t de MS/ha/10 ans selon la concentration de ces éléments.

Tableau 3-26. Concentration en ETM des sédiments de barrage étudiés

ETM	Valeur limite (en mg/kg de MS)	Concentration en ETM des sédiments (en mg/kg de MS)			
		DUR	GAR	ISE	RHI
Cd	10	0,26	1,16	0,26	0,26
Cr	1 000	31,71	37,03	34,94	30,31
Cu	1 000	36,12	34,23	32,52	30,78
Hg	10	0,062	0,072	0,041	0,154
Ni	200	41,82	39,85	44,13	28,35
Pb	800	30,95	36,94	23,9	20,43
Zn	3 000	84,57	237,14	103,87	103,07
Cr+Cu+Ni+Zn	4 000	194,22	348,25	215,46	192,51

Le tableau 3-27 présente les flux limites et les dosages en sédiments calculés correspondants. La quantité maximale épandable correspond à la valeur la plus faible de ces quantités d'ETM dans le sédiment.

Les quantités maximales théoriquement épandables des sédiments DUR, GAR, ISE et RHI, du point de vue des teneurs en ETM, seraient respectivement de 71,7 t, 75,3 t, 68,0 t et 105,8 t de MS/ha/10. Ce sont les teneurs en nickel des sédiments qui limitent ces doses maxima d'apport. Cependant, ces quantités restent nettement supérieures à la limite réglementaire de 30 t de MS/ha/10 ans. Les éléments traces métalliques ne constituent donc pas un facteur limitant pour les épandages des sédiments étudiés.

Pour respecter la réglementation, la dose d'épandage sur 10 ans ne doit pas dépasser 30 tonnes de sédiment sec. Cette dose peut aussi être fractionnée, par exemple 15 tonnes de matière sèche tous les 5 ans, ou tout autre fractionnement permettant de respecter la quantité maximale de 30 tonnes de matière sèche par hectare sur 10 ans.

Tableau 3-27. Calcul des flux d'ETM et doses maxima théoriques

ETM	Flux max. autorisé sur 10 ans si pH > 6 (en g/ha)	Calcul de la dose maximum théorique sur 10 ans (t de MS/ha)			
		DUR	GAR	ISE	RHI
Cd	150	576,9	129,3	576,9	576,9
Cr	15 000	473,0	405,1	429,3	494,9
Cu	15 000	415,3	438,2	461,3	487,3
Hg	150	2419,4	2083,3	3658,5	974,0
Ni	3 000	71,7	75,3	68,0	105,8
Pb	15 000	484,7	406,1	627,6	734,2
Zn	45 000	532,1	189,8	433,2	436,6
Cr+Cu+Ni+Zn	60000	308,9	172,3	278,5	311,7

Dans ces conditions, si l'on considère un volume *in situ* de 1 000 m³ de sédiment à draguer d'un cours d'eau, soit environ 700 t de MS en assimilant les sédiments à une « vase consolidée » avec une densité moyenne *in situ* de 1,45 [CETMEF, 2012], il est nécessaire de disposer d'une surface adaptée à recevoir des épandages de l'ordre de 23 ha.

Il est alors évident que cette possibilité de valorisation agricole, en suivant la logique « déchet » et en appliquant la réglementation pour les boues de STEP, ne peut être envisagée que pour des volumes très réduits de sédiment à valoriser.

Pour envisager réellement cette possibilité de valorisation, une réglementation adaptée aux cas des sédiments issus d'opération de dragage serait à établir.

CONCLUSION DU CHAPITRE

Plusieurs lots de sédiments fins, issus de quatre retenues françaises exploitées par EDF ont été sélectionnés, puis leurs caractéristiques ont été déterminées. Les sites échantillonnés ont été choisis de façon à refléter une certaine diversité typologique des sédiments, liée aux caractéristiques des bassins versants et des retenues. De plus, ces sites pourraient constituer des gisements de matériaux. Les quatre lots prélevés et étudiés ont été codifiés avec trois lettres : DUR, GAR, ISE et RHI. La caractérisation des sédiments est une phase primordiale permettant d'apprécier le potentiel de valorisation des sédiments fins. Les essais ont été menés dans différents laboratoires désignés selon les filières de valorisation pressenties.

Pour résumer les résultats des essais présentés dans ce chapitre, les principales caractéristiques des sédiments étudiés sont les suivantes :

- Le sédiment DUR est le plus riche en particules de la classe des limons. Il présente, en effet, peu de particules inférieures à 2 μm et supérieures à 63 μm . La teneur en matière organique de ce sédiment est faible (3 %). La teneur en carbonate de ce sédiment de 22,8 %, déterminée par calcimétrie est la plus élevée des sédiments étudiés. Enfin, ce sédiment se distingue aussi par sa faible plasticité comparée aux autres sédiments. Bien que les analyses minéralogiques de ce sédiment n'aient pu être réalisées, il est possible de supposer que les minéraux argileux présents représentent une faible fraction de sa composition minéralogique totale.
- Le sédiment GAR se distingue des autres sédiments par le fait qu'il est composé des particules les plus grossières. Notons cependant, qu'il présente des minéraux argileux (phyllosilicates) en quantité importante (35 %). Ces minéraux sont en partie à l'origine de la plasticité assez élevée (IP = 26). Ce sédiment GAR est aussi le plus organique (MO = 9,1 %) et le plus siliceux avec 36 % de quartz. L'analyse élémentaire, exprimée sous forme d'oxydes confirme ces observations. En effet, la silice est en fraction importante (56,3 %) et l'alumine et l'oxyde de fer, respectivement 14,7 % et 5,59 %, apportées notamment par les minéraux argileux, sont plus présentes que pour les autres sédiments analysés.
- Le sédiment ISE est le plus fin. Il est dépourvu de fraction sableuse (> 63 μm) et composé d'une grande quantité de particules < 2 μm . Bien que la granulométrie soit fine, la teneur en phyllosilicates est du même ordre que le sédiment GAR. La teneur en carbonate est de 18,8 %. On peut faire l'hypothèse que les particules fines du sédiment ISE sont composées de minéraux carbonatés et argileux alors que pour le sédiment GAR, les particules fines doivent quasi-exclusivement être composées de minéraux argileux. Les espèces argileuses présentes dans le sédiment ISE, majoritairement illites et chlorites, ne lui procurent pas une plasticité particulièrement prononcée (IP = 16). La composition chimique élémentaire confirme la présence de minéraux argileux et de carbonates. En effet, les éléments chimiques composant ces minéraux sont en fractions significatives. Enfin, la teneur en matière organique, de 3,6 %, peut être qualifiée de faible.
- Le sédiment RHI présente une granulométrie relativement grossière. Il s'agit du sédiment qui possède la teneur en carbonates la plus élevée, comme une teneur en matière organique importante. Ces deux paramètres ont pour conséquence d'être à l'origine d'une forte perte au feu (22,8 %). Le cortège argileux est bien différent des trois autres sédiments étudiés. En effet, en plus des principales espèces argileuses (illite et chlorite) identifiées pour tous les sédiments analysés, on retrouve en quantité importante de la kaolinite et un interstratifié smectite-chlorite dans des proportions respectives de 38 % et 15 %. Bien que son cortège argileux soit composé de kaolinite (espèce argileuse riche en Al), l'analyse élémentaire ne quantifie que peu d'alumine (7,9 %) comparativement aux autres sédiments analysés. Le sédiment RHI est aussi le plus pauvre en oxyde de fer. Ceci s'explique par le fait que, du point de vue de la minéralogie totale, les phyllosilicates ne représentent que 22 % des minéraux. Enfin, l'origine de la plasticité relativement importante est en partie liée à la présence du minéral argileux interstratifié smectite-chlorite ; la smectite étant connue pour son activité assez importante.

Dans la caractérisation des sédiments fins, les composés traces organiques (CTO) qui pourraient être présents n'ont pas été mesurés. Ceci est lié à un choix fait dans le cadre de cette thèse : la recherche d'adéquation technique entre les caractéristiques des sédiments et les spécifications d'entrée

dans les filières de valorisation. Ce choix est motivé par le fait que la valorisation des sédiments n'est pas chose aisée, il n'existe pas de filière robuste, même lorsqu'ils ne renferment ni ETM ni CTO. Mais, dans de nombreux cas, les sédiments fins des retenues hydroélectriques peuvent demander une gestion à terre pour d'autres raisons que celles liées à la présence de contaminants d'origine anthropique. De plus, bon nombre de travaux de recherche abordent déjà les problématiques liées aux contaminants qui peuvent être présents dans les sédiments fins. Cependant, pour prévoir au mieux la phase de réalisation des opérations de valorisation, après avoir démontrée l'adéquation technique, l'étude des contaminants métalliques et organiques sera aussi un point clé. Il faudra en particulier prévoir leur comportement au cours des étapes et procédés propres aux différentes filières de valorisation ainsi que leurs impacts associés.

La connaissance des caractéristiques des sédiments échantillonnés a permis de discuter de leur adéquation avec les spécifications techniques des filières. Ainsi, le tableau 3-28 et le tableau 3-29 proposent une première évaluation du potentiel d'utilisation des sédiments fins. Les caractéristiques favorables et/ou défavorables selon les filières sont indiquées. Notons que cette interprétation n'est qu'une indication générale au regard des caractéristiques des quatre sédiments étudiés.

Tableau 3-28. Adéquation entre les caractéristiques des sédiments étudiés et les spécifications des filières de valorisation « minérales »

	<i>DUR</i>	<i>GAR</i>	<i>ISE</i>	<i>RHI</i>	
Matériau routier	<i>Note relative</i>	++++	++	+++	++
	<i>Points forts</i>	- %MO faible - IP et VBS faible	- Taille des grains	- %MO faible	- Taille des grains
	<i>Points faibles</i>	- Finesse	- IP et VBS élevés - %MO élevé	- Finesse	- %MO élevé - IP et VBS élevés - Présence de smectite
Matière première pour la céramique	<i>Note relative</i>	?(++)	+++	++++	+
	<i>Points forts</i>	-	- Composition chimique	- Composition chimique - Wp et IP adaptés	-
	<i>Points faibles</i>	- IP faible (probablement trop peu de phyllosilicates) - %CaCO ₃ élevé	- Wp élevée	-	- Composition chimique - %MO élevé - Wp élevée
Matière première pour le clinker	<i>Note relative</i>	?(++++)	++	++++	+++
	<i>Points forts</i>	- Finesse - %CaCO ₃ élevé	- %Phyllos. (Al ₂ O ₃ et Fe ₂ O ₃ élevés)	- Finesse - %Phyllos. (Al ₂ O ₃ et Fe ₂ O ₃ élevés)	- %CaCO ₃ élevé
	<i>Points faibles</i>	-	- Quartz en forte proportion - Grossier - %CaCO ₃ faible	-	- Al ₂ O ₃ et Fe ₂ O ₃ faible
Addition minérale pour le béton	<i>Note relative</i>	++++	+	++	+
	<i>Points forts</i>	- VB faible - MO faible	-	- Finesse	-
	<i>Points faibles</i>	-	- VB élevée - %MO élevé	- VB élevée	- VB élevée - %MO élevé

Tableau 3-29. Adéquation entre les caractéristiques des sédiments étudiés et les spécifications des applications agronomiques potentielles

		DUR	GAR	ISE	RHI
<i>Engrais minéraux (NF U42-001)</i>		<i>Non envisageable pour tous les sédiments étudiés</i> <i>Teneurs en N, P₂O₅ et K₂O trop faibles</i>			
<i>Amendements organiques (NF U44-051)</i>		<i>Non envisageable pour tous les sédiments étudiés</i> <i>Teneurs en MO trop faibles</i>			
Logique produit	<i>Amendements minéraux basiques (NF U44-001)</i>	+	-	-	+
		<i>Teneur en CaO+MgO satisfaisante</i>	<i>Teneur en CaO+MgO trop faible</i>	<i>Teneur en CaO+MgO trop faible</i>	<i>Teneur en CaO+MgO satisfaisante</i>
	<i>Hors du contexte normatif actuel (sédiments non marins)</i>				
	<i>Terre support</i>	+	-	+	+
		<i>Teneur en MO trop élevée</i> <i>Hors du contexte normatif actuel (les sédiments ne répondent pas directement à la définition de « terre support »)</i>			
	<i>Support de culture (NF U44-551)</i>	<i>Terre végétale</i>	-	+	-
<i>Teneur en MO trop faible</i> <i>Hors du contexte normatif actuel (les sédiments ne répondent pas directement à la définition de « terre végétale »)</i>					
Logique déchet	<i>Argile</i>	-	-	-	-
		<i>Non envisageable</i> <i>Les sédiments étudiés ont une fraction < 2 µm trop faible (d₅₀>2 µm) et une teneur en CaCO₃ trop élevée (excepté GAR)</i>			
	<i>Substrat minéral</i>	+	+	+	+
<i>Tous les sédiments étudiés ont une teneur en MO suffisamment faible.</i>					
<i>Envisageable pour tous les sédiments étudiés (ETM en dessous des seuils réglementaires)</i>					
Logique déchet	<i>Epandage agricole</i>	++	+	+	+++
		<i>Apport de minéraux calciques</i>	<i>Apport de MO</i>	<i>Apport de minéraux calciques</i>	<i>Apport de MO et apport de minéraux calciques</i>

Enfin, d'autres variables, notamment extérieures, peuvent être prise en compte telles que les caractéristiques des autres matières premières pour une valorisation en cru de cimenterie, les caractéristiques des sols et les besoins des cultures pour un épandage agricole, ainsi que les spécifications propres à certains procédés, etc.

Chapitre 4

MISE EN ŒUVRE DANS LES FILIERES

SOMMAIRE DU CHAPITRE

Introduction.....	188
1. La filière « ciment ».....	190
1.1. Elaboration des crus.....	190
1.2. Caractérisation des produits de cuisson	192
1.3. Conclusion sur l'aptitude des sédiments à être valorisés dans la filière	195
2. La filière « bétons et mortiers »	196
2.1. Formulation et confection des mortiers	196
2.2. Caractérisation des mortiers a l'état frais.....	197
2.3. Caractérisation des mortiers à l'état durci.....	198
2.4. Conclusion sur l'aptitude des sédiments à être valorisés dans la filière	201
3. La filière « matériau routier et assimilé »	203
3.1. Composition des mélanges et confection des éprouvettes	203
3.2. Approche expérimentale et essais de validation mécanique et de durabilité	204
3.3. Analyse des propriétés des sédiments traités à partir de la résistance en compression sur éprouvettes...	205
3.4. Co-valorisation et liant alternatif : une cendre volante issue de l'industrie papetière.....	207
3.5. Conclusion sur l'aptitude des sédiments à être valorisés dans la filière	207
4. La filière « matériau céramique ».....	209
4.1. Mise en forme à partir d'une suspension	209
4.1. Mise en forme à partir d'une pâte plastique.....	212
4.1. Conclusion sur l'aptitude des sédiments à être valorisés dans la filière	216
5. Potentiel de valorisation des sédiments fins calcinés	217
5.1. Matière première pour l'élaboration de pouzzolanes artificielles	217
5.2. Matière première pour l'élaboration de géopolymères	218
Conclusion du chapitre	221

INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est d'apprécier, si du point de vue technique, des exigences de qualification et pratique, l'emploi de sédiments fins de barrages est envisageable dans les voies de valorisation pressenties. La « mise en œuvre dans les filières » consiste à mener des études préliminaires de faisabilité à l'échelle du laboratoire. Pour ce faire, les sédiments fins de retenues hydroélectriques viennent en substitution et/ou complément d'autres matériaux traditionnellement utilisés dans les différentes filières étudiées. Les propriétés des matériaux obtenus à base de sédiments sont ensuite déterminées de manière à établir une comparaison des performances avec celles exigées des matériaux classiques et/ou principales spécifications des filières de valorisation. L'influence de l'incorporation de sédiments et de leurs caractéristiques est mise en avant. Cela permet de :

- préciser si les sédiments fins de barrages étudiés peuvent être effectivement incorporés à d'autres matériaux et ce, sous quelles conditions,
- définir quelles caractéristiques sont nécessaires à leur valorisation et celles qui tendent à rendre difficile, voire empêcher cette valorisation,
- d'apporter les solutions, préconiser leur mise en œuvre et prévoir les études et essais complémentaires à effectuer.

Ce travail a concerné quatre des cinq filières de valorisation jugées comme plus pertinentes. Il s'agit des filières « minérales » à savoir l'utilisation des sédiments fins de barrages dans la fabrication de ciment, leur incorporation dans le béton, la préparation d'un matériau routier et assimilé à base de sédiments et la conception d'un matériau céramique avec des sédiments.

Les valorisations agronomiques n'ont pu être traitées dans ce chapitre de thèse. Les principales raisons concernent la durée dans le temps des essais nécessaires à l'étude de cette voie de valorisation. De ce fait, cette voie spécifique sera développée dans de travaux futurs prévus, voir section perspectives en fin de mémoire. Les travaux concernent notamment la capacité des sédiments à retrouver une structure physique semblable à un sol et l'élaboration d'anthroposols fabriqués à base de sédiment fins de barrages.

Pour chaque filière « minérale » de valorisation, les sédiments référencés ISE et RHI sont systématiquement étudiés. Pour explorer une plus large gamme de caractéristiques de sédiments de barrages, ils ont été complétés par deux autres sédiments, les sédiments GAR et DUR respectivement dans 3 et 2 filières. Différents laboratoires ont été sollicités en fonction de leurs compétences pour mener les essais de caractérisation et/ou valorisation. Le tableau 4-1 rappelle les filières étudiées par les différents laboratoires ainsi que la répartition des sédiments faisant l'objet de travaux dans les filières retenues.

Tableau 4-1. Sédiments, laboratoires et filières pressenties

Filières	Sédiments étudiés				Laboratoires
	DUR	GAR	ISE	RHI	
Ciment		X	X	X	LERM
Béton		X	X	X	LERM
Matériau routier et assimilé	X	X	X	X	M2C
Matériau céramique	X		X	X	ENSCI

La dernière section de ce chapitre s'intéresse aux possibilités qu'offre la calcination d'un sédiment argileux en termes de valorisation.

Les recherches suivies et approfondies que nous avons mené dans les filières "minérales" ont aussi permis de constater que les déchets qui présentent un caractère pouzzolanique prononcé, comme les cendres volantes par exemple, peuvent être *a priori* plus aisément valorisables dans certaines filières. Si des sédiments fins de barrages présentent des caractéristiques adéquates, une calcination à une température adaptée peut s'envisager. Elle pourrait notamment modifier la nature des minéraux

argileux vers une structure moins cristallisée leur conférant un caractère pouzzolanique accentué. De sédiments fins de barrages bruts, à calcinés, leur valorisation dans plusieurs filières pourrait être facilitée et ouvrir la voie à des perspectives de valorisation innovantes, par exemple avec la création de liants.

1. LA FILIERE « CIMENT »

Dans le chapitre précédent, nous avons constaté que les caractéristiques liées à la minéralogie et à la composition chimique des sédiments fins étudiés sont assez proches des matières premières couramment employées dans le cru en cimenterie.

Dans cette section, les sédiments référencés GAR, ISE et RHI viennent en substitution de matières premières utilisées pour la fabrication de clinker.

Pour chaque sédiment étudié, trois clinkers sont élaborés avec une proportion différente de sédiment dans le cru. Au total, ce sont neuf clinkers qui ont été préparés, étudiés et analysés. Les sédiments fins considérés contiennent des fractions importantes de phyllosilicates, ils peuvent ainsi apporter au cru les mêmes oxydes que ceux des argiles entrant dans la préparation et la fabrication du cru en cimenterie. Pour les neuf clinkers retenus, la quantité totale d'argile nécessaire au cru a été substituée par les sédiments.

La préparation des clinkers et les analyses ont été réalisées par le LERM.

1.1. ELABORATION DES CRUS

La plupart des crus de cimenterie sont composés d'un mélange de calcaire et d'argile auquel s'ajoutent d'autres constituants suivant les ajustements minéraux nécessaires. Les crus de cimenterie sont assemblés de manière à équilibrer les différents éléments principaux du clinker (calcium, silicium, aluminium et fer). Afin d'obtenir des crus dans la stœchiométrie souhaitée en éléments principaux, des ratios et modules ont été définis. Les principaux ratios ont été présentés dans le chapitre 2, section 1.2.1.

1.1.1. Composition des constituants du cru

Les sédiments étant déjà riches en argiles, les crus ont été composés à partir de mélanges avec un calcaire (provenant d'une cimenterie française) et, selon les cas, de la bauxite. Le calcaire est utilisé pour l'apport de chaux et la bauxite est employée pour ajuster la quantité en Al_2O_3 dans trois préparations de cru. Les compositions chimiques du calcaire et de la bauxite, exprimées sous forme d'oxyde, sont données dans le tableau 4-2. Le tableau 4-3 présente les modules pour l'ensemble des matières employées pour l'élaboration des clinkers.

Tableau 4-2. Compositions chimiques des matières premières traditionnelles utilisées (en % massique)

	PF	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	SrO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Cr ₂ O ₃
Calcaire	42,17	1,99	0,76	0,52	53,80	0,47	0,04	0,01	0,02	0,03	0,01	0,19	0,01	0,01
Bauxite	24,35	1,57	47,35	23,89	0,25	0,01	2,17	0,02	0,07	0,01	0,01	0,10	0,02	0,23

Tableau 4-3. Modules des composants des crus

	Sédiments fins de barrages étudiés			Matières premières traditionnelles utilisées	
	GAR	ISE	RHI	Calcaire	Bauxite
LSF	0,02	0,09	0,14	7,89	1,98
SR	2,78	2,48	3,96	1,55	0,02
HM	0,054	0,196	0,341	16,452	0,003

Nota : $LSF = \frac{CaO}{2,8 \times SiO_2 + 1,2 \times Al_2O_3 + 0,65 \times Fe_2O_3}$; $SR = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$; $HM = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}$

1.1.2. Calcul de la composition des crus

Les compositions des crus ont été déterminées en considérant les compositions chimiques des matières premières traditionnelles et des sédiments étudiés. Les compositions des crus ont été

calculées en utilisant le facteur de saturation en chaux (LSF), le module hydraulique (HM) et le module silicique (SR).

Les différentes compositions des crus ont été élaborées de la manière suivante :

- une première série (GAR-K2, ISE-K2 et RHI-K2) basée sur un mélange à deux composants avec pour valeur cible 0,99 pour le facteur de saturation en chaux ;
- une deuxième série (GAR-K3, ISE-K3 et RHI-K3) basée sur un mélange à trois composants visant des valeurs classiques de module hydraulique et module silicique, respectivement de 2,1 et 1,8 ;
- une troisième série (GAR-K'2, ISE-K'2 et RHI-K'2) avec un mélange à deux composants majorant la proportion de sédiments jusqu'aux limites des indices.

La proportion de sédiments dans les crus varie de 20,6 % à 31,14 % selon les séries et les caractéristiques chimiques des sédiments. Le tableau 4-4 détaille la composition des neuf crus préparés intégrant des sédiments fins de barrages.

Tableau 4-4. Composition des crus avant cuisson

	<i>GAR-K2</i>	<i>ISE-K2</i>	<i>RHI-K2</i>	<i>GAR-K3</i>	<i>ISE-K3</i>	<i>RHI-K3</i>	<i>GAR-K'2</i>	<i>ISE-K'2</i>	<i>RHI-K'2</i>
<i>Composition des crus</i>									
<i>Calcaire</i>	78,6	74,6	70,57	76,4	72,7	67,7	77,24	73,55	68,86
<i>Bauxite</i>	-	-	-	3,0	2,4	5,4	-	-	-
<i>GAR</i>	21,4	-	-	20,6	-	-	22,76	-	-
<i>ISE</i>	-	25,4	-	-	24,9	-	-	26,45	-
<i>RHI</i>	-	-	29,43	-	-	26,9	-	-	31,14
<i>Indices</i>									
<i>LSF</i>	0,99	0,99	0,99	0,95	0,95	0,93	0,92	0,95	0,93
<i>HM</i>	2,28	2,25	2,38	2,05	2,05	2,00	2,13	2,15	2,24
<i>SR</i>	2,54	2,32	3,43	1,80	1,79	1,70	2,56	2,33	3,46

Dans les trois séries de crus, le sédiment RHI constitue la proportion la plus importante utilisée. Cela est justifié par la composition minéralogique et chimique de ce sédiment. En effet, le sédiment RHI est le plus riche en carbonate des trois sédiments. Sa teneur en calcium est élevée. Cependant, le module silicique du sédiment RHI est élevé (voir tableau 4-3). La silice est en trop grande quantité comparée à l'alumine et au fer. Par conséquent, le module silicique des clinkers intégrant ce sédiment RHI s'avère important sans l'ajout d'un troisième composant, correcteur en alumine.

La figure 4-1 met en relation la proportion de sédiments dans les crus K2 (première série) en fonction de leur indice LSF calculé sur la composition chimique des sédiments étudiés. On constate que, plus l'indice « facteur de saturation en chaux » des sédiments est élevé, plus la proportion de sédiment dans le mélange est importante. En d'autres termes, plus les sédiments sont riches en calcium et pauvres en autres éléments principaux notamment en silice, plus il est possible de les incorporer en grande quantité dans le cru.

Pour les crus à trois composants (K3), on observe que, plus le module silicique des sédiments étudiés est élevé, plus il est nécessaire d'avoir recours à une matière correctrice riche en alumine (voir figure 4-2).

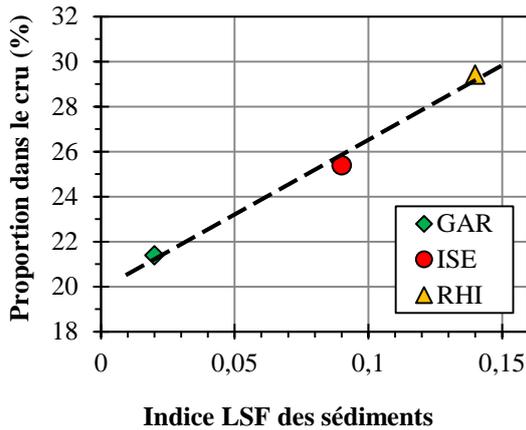


Figure 4-1. Relation entre LSF des sédiments et leurs proportions dans le cru (série K2)

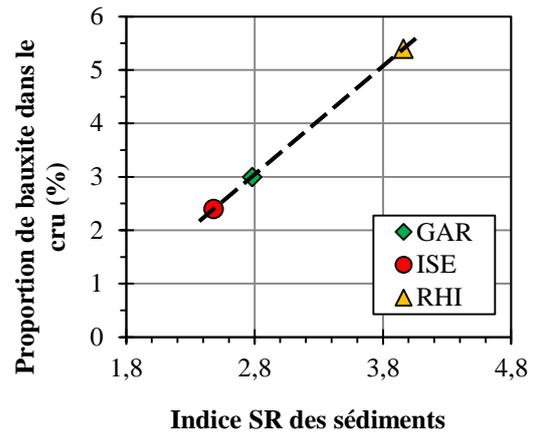


Figure 4-2. Influence du module silicique sur l'ajout de matière correctrice en alumine (série K3)

1.1.3. Préparation et cuisson des matières premières

Les sédiments sont séchés à 105 °C, puis tamisés à 160 µm. Le refus est broyé pour passer à 160 µm.

Les autres constituants du cru sont broyés à 125 µm. Les constituants sont ensuite pesés puis homogénéisés en suivant les formulations des mélanges fixées par les calculs (tableau 4-4). Les crus obtenus pour chacun des mélanges sont ensuite granulés avant d'être cuits au four électrique.

Les crus granulés sont cuits dans un four de laboratoire régulé à 1450 °C en observant les conditions suivantes :

- température d'essai : 1450 °C ;
- vitesse de montée en température : 1300 °C / h ;
- palier de 15 mn à 1450 °C ;
- défournement à 1175 °C ;
- refroidissement à l'air libre.

1.2. CARACTERISATION DES PRODUITS DE CUISSON

Les clinkers obtenus ont été caractérisés avec des analyses chimiques et minéralogiques.

1.2.1. Composition chimique des clinkers

La teneur en éléments majeurs a été réalisée par spectrométrie d'émission atomique à plasma inductif (ICP-AES Varian) après fusion alcaline (métaborate de lithium). La perte au feu a été mesurée selon le principe de la norme NF EN 196-2. La teneur en sulfate (SO₃) a été déterminée par chromatographie ionique après attaque acide ménagée à l'acide chlorhydrique. La teneur en chaux libre a été déterminée par la méthode au glycol.

Les résultats obtenus, exprimés en pourcentage massique, sont regroupés dans le tableau 4-5. Ce tableau renseigne aussi sur la composition potentielle des clinkers calculée à partir de la composition chimique des produits de cuisson à l'aide des formules de Bogue.

Les teneurs en chaux libre des produits de cuisson restent relativement faibles et témoignent d'une bonne combinaison de la chaux lors de la cuisson. En effet, la chaux libre est un bon indicateur de la cuisson si les conditions de stœchiométrie sont respectées. La teneur en chaux libre d'un clinker est classiquement inférieure à 2 %. Seul le produit de cuisson GAR-K2 présente une teneur en chaux libre supérieure à cette valeur.

Tableau 4-5. Résultats de l'analyse chimique et composition minéralogique potentielle des clinkers

	GAR-K2	ISE-K2	RHI-K2	GAR-K3	ISE-K3	RHI-K3	GAR-K'2	ISE-K'2	RHI-K'2
Composition chimique									
PF	0,65	0,33	0,38	0,46	0,48	0,45	0,59	0,45	0,42
SiO ₂	21,61	20,86	22,72	20,57	20,8	21,39	22,41	21,89	23,79
Al ₂ O ₃	6,13	6,52	4,73	7,85	7,91	8,02	6,16	6,6	4,83
Fe ₂ O ₃	2,65	2,62	2,1	3,69	3,52	3,89	2,76	2,69	2,05
CaO	66,79	67,09	67,55	65,14	64,64	63,48	65,78	65,81	66,16
MgO	1,23	1,4	1,7	1,23	1,36	1,59	1,29	1,42	1,78
TiO ₂	0,34	0,3	0,24	0,43	0,38	0,4	0,35	0,31	0,25
MnO	0,04	0,09	0,05	0,04	0,09	0,05	0,04	0,1	0,05
P ₂ O ₅	0,07	0,06	0,07	0,1	0,09	0,1	0,1	0,09	0,11
Cr ₂ O ₃	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01
SrO	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04
Na ₂ O	0,27	0,4	0,18	0,15	0,26	0,16	0,13	0,21	0,2
K ₂ O	0,15	0,2	0,12	0,21	0,28	0,28	0,11	0,18	0,1
SO ₃	<0,02	<0,02	<0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	<0,02	<0,02
Total	99,98	99,93	99,91	99,96	99,9	99,91	99,79	99,81	99,79
Chaux libre	2,61	1,18	0,79	1,14	0,95	0,67	1	0,88	1,4
Composition minéralogique potentielle*									
C ₄ AF	8,1	8	6,4	11,3	10,8	11,9	8,4	8,2	6,3
C ₃ A	11,8	12,9	9	14,6	15,1	14,7	11,7	13	9,4
C ₃ S	53,5	62,9	65,2	47,1	43,9	34,5	49,8	50,7	48,4
C ₂ S	22,1	12,6	16,3	23,8	26,9	35,6	27,3	24,9	32,1

* Calculées selon les formules de Bogue à perte au feu nulle

1.2.2. Analyse minéralogique quantitative par DRX des clinkers

La caractérisation minéralogique des clinkers est complétée par une analyse par diffraction des rayons X. Cette analyse DRX est réalisée comme décrit à la section 2.2.2 du chapitre 3. L'interprétation des diffractogrammes obtenus a permis de mettre en évidence les quatre phases majeures présentes dans un clinker Portland, le silicate tricalcique (C₃S), le silicate bicalcique (C₂S), l'aluminate tricalcique (C₃A) et l'alumino-ferrite tétracalcique (C₄AF).

Selon Pliskin [1993], les proportions classiques de ces phases dans un clinker Portland sont : C₃S : 40 à 75 %, C₂S : 0 à 30 %, C₃A : 2 à 15 %, C₄AF : 0 à 15 %

L'analyse quantitative réalisée à l'aide du logiciel TOPAS a permis de déterminer les proportions de ces différentes phases. Les résultats sont présentés dans le tableau 4-6.

La proportion de corps amorphe est anormalement élevée dans le cas de la première série de cuisson témoignant de domaines mal cristallisés probablement au niveau des aluminates et ferroaluminates de calcium.

Les proportions relatives de chacune des phases sont conformes à celle des clinkers Portland malgré une forte représentation des phases interstitielles notamment des aluminates de calcium.

Tableau 4-6. Résultats de l'analyse minéralogique semi-quantitative par DRX des clinkers

	GAR-K2	ISE-K2	RHI-K2	GAR-K3	ISE-K3	RHI-K3	GAR-K'2	ISE-K'2	RHI-K'2
C_3S	55	59	65	55	53	44	56	58	57
C_2S	14	13	14	18	20	29	25	20	29
C_4AF	6	4	5	9	8	13	6	6	4
C_3A	10	13	8	15	17	13	12	13	10
CaO (chaux libre)	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Corps amorphe	15	11	8	3	2	1	1	3	1
Total	101	100	100	100	100	100	100	100	101

1.2.3. Examen de sections polies des clinkers au microscope optique en lumière réfléchie

La microstructure et les phases minéralogiques des clinkers ont été caractérisées par examen de sections polies des clinkers au microscope optique en lumière réfléchie. Une attaque acide spécifique sur la surface des sections permet de distinguer les différentes phases minérales.

Des images des sections polies des clinkers sous microscopie optique sont observables en annexe 5.

► *Clinkers synthétisés à partir des crus à trois composants (GAR-K3, ISE-K3 et RHI-K3)*

Les crus de ces échantillons de clinker ont été réalisés à partir des deux composants de base, calcaire et sédiment, auxquels a été ajoutée de la bauxite. Les principales observations sont les suivantes :

- Les cristaux de silicates tricalciques (C_3S) correspondent à la phase dominante de ces clinkers. Ils sont bien cristallisés sous formes de grains polygonaux. On y observe également des grains aux formes plus arrondies et en moindre proportion, des silicates bicalciques (C_2S). Ces derniers sont parfois développés en forme de doigts de gants ;
- Les cristaux de silicates présentent une taille moyenne de l'ordre de 20 μm pour l'échantillon GAR-K3. Elle est plus importante, de l'ordre de 40 μm , pour les échantillons de clinker référencés ISE-K3 et RHI-K3 ;
- Les silicates sont enrobés par une phase interstitielle, elle-même partagée en zones plus ou moins réfléchissantes, allant du blanc au gris en lumière réfléchie. La phase la plus claire correspond à des cristaux d'alumino-ferrite tétracalcique (C_4AF) et la plus sombre à des cristaux d'aluminate tricalcique (C_3A). Ce dernier élément, en proportion relativement importante, se présente ici en plages bien définies ;
- Quelques nodules agglomérés de chaux vive sont localement mis en évidence, en particulier dans l'échantillon GAR-K2.

► *Clinkers synthétisés à partir des crus à deux composants (GAR-K2, ISE-K2, RHI-K2, GAR-K'2, ISE-K'2 et RHI-K'2)*

L'ensemble des clinkers est synthétisé à partir de crus avec une composition binaire, uniquement préparés à partir du même calcaire et des sédiments. On retrouve les composants minéralogiques décrits lors de l'observation des clinkers expérimentaux à trois composants.

- Le silicate tricalcique (C_3S) reste dominant sous forme de cristaux polygonaux avec des grains dont la taille évolue, pour la plupart, entre 10 et 40 μm . Ces cristaux présentent parfois des inclusions de petits cristaux de silicate bicalcique ;
- Le silicate bicalcique (C_2S), deuxième phase silicatée du produit de cuisson, est présent en moindre proportion. Il est le plus souvent regroupé sous forme de petits assemblages de cristaux arrondis dont les tailles sont équivalentes à celles du silicate tricalcique ;

- De larges plages d'aluminate tricalcique (C_3A), grise en lumière réfléchie, enrobent les grains de silicates, en association avec les plages blanches d'alumino-ferrite tétracalcique (C_4AF). La phase interstitielle qui en résulte témoigne du refroidissement progressif du clinker suite à son défournement et sa trempe à l'air ;
- La présence de chaux libre est assez limitée et représentée par quelques amas nodulaires peu nombreux.

Les crus réalisés dans le cadre de cette étude, avec trois composants ou deux composants, en faisant varier les modules de chaux et de silice, permettent d'obtenir des produits qui après cuisson présentent les composants minéralogiques attendus dans les clinkers de type Portland.

1.3. CONCLUSION SUR L'APTITUDE DES SEDIMENTS A ETRE VALORISES DANS LA FILIERE

L'objet de l'étude menée en laboratoire concernait la faisabilité de l'utilisation des sédiments fins de barrages comme composant d'un cru de cimenterie. Cette étude a permis de dégager les points essentiels suivants :

- les sédiments fins de barrages permettent d'apporter la quantité d'argiles nécessaire au cru sous forme de mélanges binaire (calcaire/sédiment) ou ternaire (calcaire/sédiment/bauxite). Les taux d'incorporation varient d'environ 20 à 30 % de sédiments secs selon le type de mélange et de sédiment ;
- chaque sédiment étudié a fait l'objet de trois compositions de cru différentes. Toutes les cuissons réalisées ont conduit à des produits présentant les caractéristiques minéralogiques attendues dans un clinker de type Portland ;
- le sédiment RHI permet d'obtenir les meilleurs taux d'incorporation du fait de sa teneur en carbonate plus élevée. Il s'agit aussi du sédiment nécessitant l'ajout de bauxite le plus important du fait de son module silicique élevé ;
- la présence de chaux libre reste limitée témoignant ainsi de la bonne combinaison des composants du clinker lors des différentes cuissons ;
- la proportion d'aluminates de calcium des produits de cuisson reste relativement importante, y compris pour les crus à deux composants. Un ajustement des compositions du cru ou une diminution du taux d'incorporation des sédiments sont à suggérer pour en atténuer la proportion. En effet, la tendance actuelle des clinkers modernes est de s'orienter vers des teneurs en aluminates contrôlées, en particulier dans le cadre des appellations PM (prise mer) et ES (résistant aux eaux sulfatées) mais aussi plus généralement pour prévenir les risques de formation de composés sulfatiques gonflants (ettringite, thaumasite). Par ailleurs, une faible teneur en aluminate de calcium permet également de maîtriser plus facilement les dégagements de chaleur lors de la prise des ciments.

Les sédiments fins de barrages utilisés dans les crus de laboratoire présentent des caractéristiques de cuisson adaptées à leur intégration aux compositions de crus de cimenterie. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques des clinkers obtenus sont tout à fait encourageantes. Afin de valider et de conforter les résultats obtenus de l'étude de cette faisabilité, il conviendrait de la compléter par des cuissons plus variées et à grande échelle. Ceci permettrait de caractériser de manière plus complète le ciment produit à partir de tels clinkers (réactivité, temps de prise, développement des résistances mécaniques, stabilité, etc.).

L'étude en laboratoire a démontré clairement la possibilité d'utiliser des sédiments de barrages comme composant en cru de cimenterie. Les contraintes à l'échelle industrielle sont à considérer. Elles sont d'ordre économique voire technique (déshydratation et transport des sédiments, distance à parcourir, besoin et fonctionnement des cimenteries locales, ...).

2. LA FILIERE « BETONS ET MORTIERS »

Pour apprécier l'aptitude des sédiments étudiés à être utilisés dans cette filière, l'approche retenue a été d'évaluer l'intérêt et les avantages à les incorporer comme une addition minérale. L'emploi d'additions minérales dans la composition des bétons est chose courante et toujours en voie de développement. Elles viennent le plus souvent en complément ou en substitution partielle du ciment. Ceci permet aussi de réduire le coût de certains bétons et/ou d'en améliorer ses propriétés de mise en œuvre et de résistance.

La liste des additions minérales utilisables à l'heure actuelle est établie dans la norme NF EN 206-1/CN. Deux catégories d'additions minérales se distinguent : les additions quasiment inertes, de type I (additions calcaires et additions siliceuses), et les additions à caractère pouzzolanique ou hydraulique latent, de type II (cendres volantes, fumées de silice, laitiers et métakaolin).

Dans cette section, les sédiments référencés GAR, ISE et RHI ont été étudiés en formulation de mortier. Deux taux d'incorporation ont été évalués pour chacun des sédiments en substitution de 10 % et 25 % de ciment. Les mortiers ont été caractérisés aux états frais et durcis. La préparation des mortiers et les analyses ont été réalisées par le LERM.

Nous avons choisi de faire l'étude sur des mortiers pour plusieurs raisons. Les minéraux argileux présentent, à des degrés divers, une certaine affinité avec l'eau et de ce fait ont une action sur les propriétés rhéologiques (maniabilité) des produits frais. Les mélanges plus riches en pâte de ciment comme les mortiers se prêtent bien à ce type d'étude. De plus, les études réalisées sur les mortiers, qu'elles soient physiques, rhéologiques ou mécaniques permettent, tout en exacerbant les phénomènes, d'économiser des matériaux, du temps et d'être plus pratique. Enfin, les protocoles pour les additions béton normalisées impliquent la préparation de mortiers pour vérifier que les caractéristiques des additions soient conformes aux spécifications. Dans ces protocoles, une part de ciment est substituée par l'addition minérale. La préparation de mortiers avec des taux de substitution de ciment issus de ces protocoles permet de comparer les performances des mortiers intégrant des sédiments aux spécifications établies pour les additions béton couramment employés.

2.1. FORMULATION ET CONFECTION DES MORTIERS

Les formulations mortiers reposent sur la base d'un mortier de référence (T1) dit normal, selon la norme NF EN 196-1 :

- La première série (GAR/10C, ISE/10C et GAR/10C) correspond à une substitution en masse de 10 % du ciment par un sédiment par rapport à la formulation témoin T1,
- La seconde (GAR/25C, ISE/25C et GAR/25C) correspond à une substitution de 25 % de ciment par rapport à la formulation témoin T1.

Ces taux de substitution sont retenus afin de permettre une comparaison avec les indices d'activité de certaines additions actives et inertes couramment employées dans les bétons. La norme relative à la fumée de silice (NF EN 13263-1+A1) spécifie que l'indice d'activité doit être calculé avec un taux de substitution de ciment de 10%. Pour les additions siliceuses (NF P 18-509) et additions calcaires (NF P 18-508), le taux de substitution de ciment des éprouvettes normalisées de mortier doit être de 25%.

Avant leur incorporation dans les mortiers, les sédiments ont subi un séchage à 60 °C jusqu'à poids constant et éventuellement un écrêtage à 250 µm avec l'objectif de retirer les éléments grossiers indésirables (débris végétaux, coquilles, etc.) dans les mortiers.

Les mortiers sont confectionnés avec un ciment CEM I 52,5 N et un sable siliceux normalisé CEN conforme à la norme NF EN 196-1.

Il a été choisi de travailler à consistance équivalente. La teneur en eau a donc été ajustée de manière à obtenir une consistance proche de celle du témoin. Le tableau 4-7 détaille ces formulations.

Tableau 4-7. Formulation des séries de mortier

Référence	Ciment (g)	Sable CEN (g)	Nature du sédiment	Sédiment (g)	Taux de substitution de ciment (%)	Eau (g)	E/C
<i>TI</i>	450	1350	-	-		225	0,50
<i>GAR/10C</i>	405	1350	<i>GAR</i>	45	10	237,5	0,59
<i>ISE/10C</i>	405	1350	<i>ISE</i>	45	10	237,5	0,59
<i>RHI/10C</i>	405	1350	<i>RHI</i>	45	10	235	0,58
<i>GAR/25C</i>	337,5	1350	<i>GAR</i>	112,5	25	267	0,79
<i>ISE/25C</i>	337,5	1350	<i>ISE</i>	112,5	25	255	0,76
<i>RHI/25C</i>	337,5	1350	<i>RHI</i>	112,5	25	250	0,74

Pour chaque formulation de mortier, des éprouvettes ont été confectionnées dans des moules prismatiques de 4 cm x 4 cm x 16 cm :

- 9 éprouvettes (3 par échéance) conservées en eau régulée à (20 ± 2) °C pour la détermination des résistances en compression,
- 2 éprouvettes équipées de plot de mesure pour le suivi des variations dimensionnelles. L'une est conservée dans une salle régulée à (20 ± 2) °C et (50 ± 5) % d'hygrométrie pour la mesure du retrait, l'autre dans l'eau à (20 ± 2) °C pour les mesures de gonflement (NF P15-433).

2.2. CARACTERISATION DES MORTIERS A L'ETAT FRAIS

Pour caractériser les mortiers à l'état frais, la maniabilité est déterminée d'après la norme NF EN 12350-5 (mesure de l'étalement à la table à secousse, « flow test »). De cet essai, on estime la demande en eau par rapport au témoin. Les temps de prise sont mesurés au prisomètre automatique selon la norme NF P15-431.

Les résultats de la caractérisation des mortiers à l'état frais sont présentés dans le tableau 4-8.

Tableau 4-8. Caractérisation à l'état frais des mortiers.

Référence	Etalement (mm)	Demande en eau par rapport à TI (%)	Début de prise (min.)	Fin de prise (min.)
<i>TI</i>	156	-	250	490
<i>GAR/10C</i>	162	+5,6	270	480
<i>ISE/10C</i>	161	+5,6	230	490
<i>RHI/10C</i>	161	+4,4	240	510
<i>GAR/25C</i>	160	+18,7	330	640
<i>ISE/25C</i>	160	+13,3	230	450
<i>RHI/25C</i>	151	+11,1	310	550

Pour obtenir une consistance équivalente, il faut dans tous les cas un apport d'eau supplémentaire. En effet, l'introduction des sédiments fins de barrages entraîne une demande en eau supplémentaire variant de 11,1 % à 18,7 % pour une substitution de 25 % de ciment par les sédiments. Cette demande en eau supplémentaire est bien sûr liée à la finesse des sédiments mais également à leur nature argileuse. Ces derniers éléments semblent avoir un rôle important puisque le sédiment GAR, riche en phyllosilicates présente une plus grande demande en eau que le sédiment le plus fin (ISE). Les sédiments n'ont pas d'effet positif sur la maniabilité du mortier.

Une substitution de 10 % de ciment par les sédiments ne modifie pas de manière significative les temps de début et fin de prise. Ces derniers restent identiques lorsque 25 % de ciment est substitué par le sédiment le plus fin (ISE). Le temps de début de prise, pour une substitution de 25 % de ciment par le sédiment GAR, augmente de 32 %. Pour le même taux de remplacement, le sédiment référencé RHI

entraîne une augmentation du temps de début de prise de 24 %. Les temps de fin de prise, avec un taux de substitution égal à 25 %, pour les sédiments référencés GAR et RHI sont respectivement supérieurs à celui du témoin, d'environ 31 % et 12 %. Or, les sédiments référencés GAR et RHI sont les deux sédiments qui renferment le plus de matière organique. La teneur en matière organique semble donc augmenter le temps de début de prise et de fin de prise.

Pour le cas des cendres volantes obtenues par combustion de charbon pulvérisé, le temps de début de prise doit être déterminé sur une pâte préparée avec 25 % de cendre volante et 75 % de ciment d'essai, conformément à la norme NF EN 196-3 et il doit être au maximum deux fois plus long que le temps de début de prise d'une pâte de ciment constituée à 100 % du ciment d'essai (témoin). Dans le cas des sédiments étudiés, cette condition est satisfaite.

2.3. CARACTERISATION DES MORTIERS A L'ETAT DURCI

Pour caractériser les mortiers à l'état durci, les résistances mécaniques en compression sont déterminées selon la norme NF EN 196-1 aux échéances de 7, 28 et 90 jours. Le retrait à l'air et le gonflement en eau sont mesurés selon la norme NF P 15-433. La recherche d'éventuels signes d'altération et la caractérisation de la microstructure sont réalisées par un examen au microscope électronique à balayage sur les mortiers à 90 jours.

2.3.1. Résistances mécaniques en compression à 7, 28 et 90 jours

Les résistances mécaniques en compression des deux séries de mortiers déterminées pour les échéances de 7, 28 et 90 jours sont présentées sur la figure 4-3.

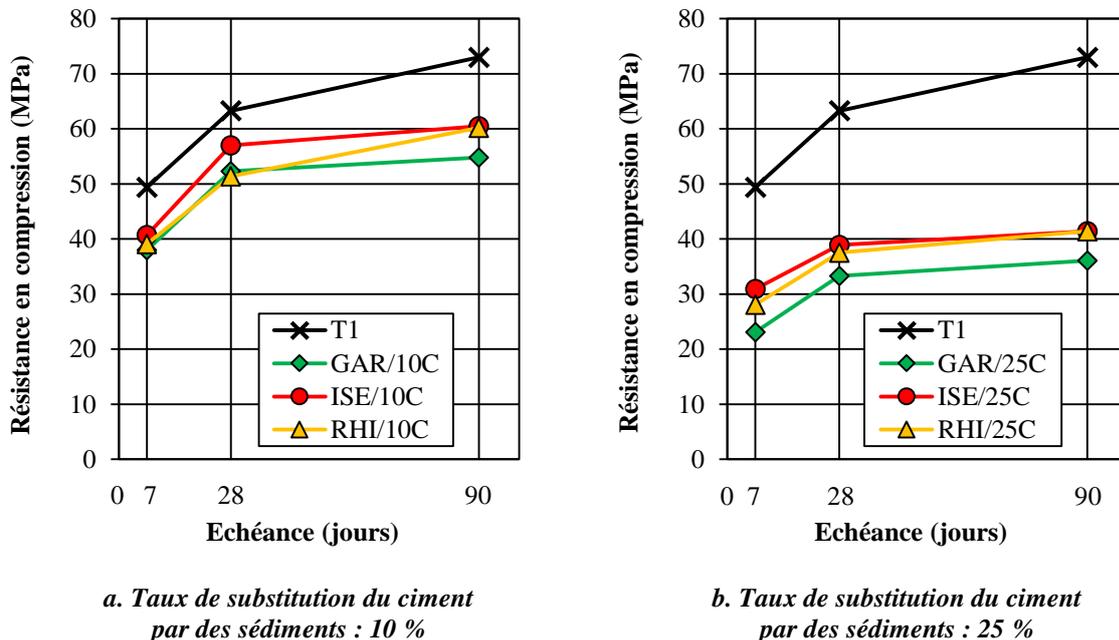


Figure 4-3. Evolution des résistances en compression pour les différents mortiers.

D'une manière générale, à 90 jours, les résistances en compression sur les mortiers contenant des sédiments sont plus faibles que celles obtenues sur le mortier témoin de 25 à 17 % pour 10 % de substitution et de 51 à 43 % pour les mortiers substitués à 25 %.

Les résistances en compression les plus élevées sont obtenues avec le sédiment ISE mais peu d'écart sont observés avec l'échantillon RHI. En revanche, les mortiers obtenus avec le sédiment GAR développent des résistances sensiblement plus faibles.

Par ailleurs et contrairement aux témoins, les résistances des mortiers substitués évoluent très peu entre 28 jours et 90 jours.

L'indice d'activité à un âge donné d'une addition calcaire, d'une addition siliceuse ou d'une cendre volante est défini par le rapport de la résistance en compression d'un mortier dont la partie liante est composée en masse de 25 % de l'addition (filler calcaire, siliceux ou de cendres) et de 75 % d'un ciment Portland témoin, à celle obtenue au même âge sur mortier témoin fabriqué à partir du même ciment d'essai.

Pour la détermination de l'indice d'activité de la fumée de silice, la partie liante doit être composée de 10 % de fumée de silice et 90 % de ciment.

Dans l'étude, l'indice d'activité représente le rapport entre la résistance du mortier substitué (10 ou 25 %) et la résistance du mortier témoin à une échéance donnée. Les indices obtenus à 28 jours pour les deux séries de mortiers sont présentés sur la figure 4-4.

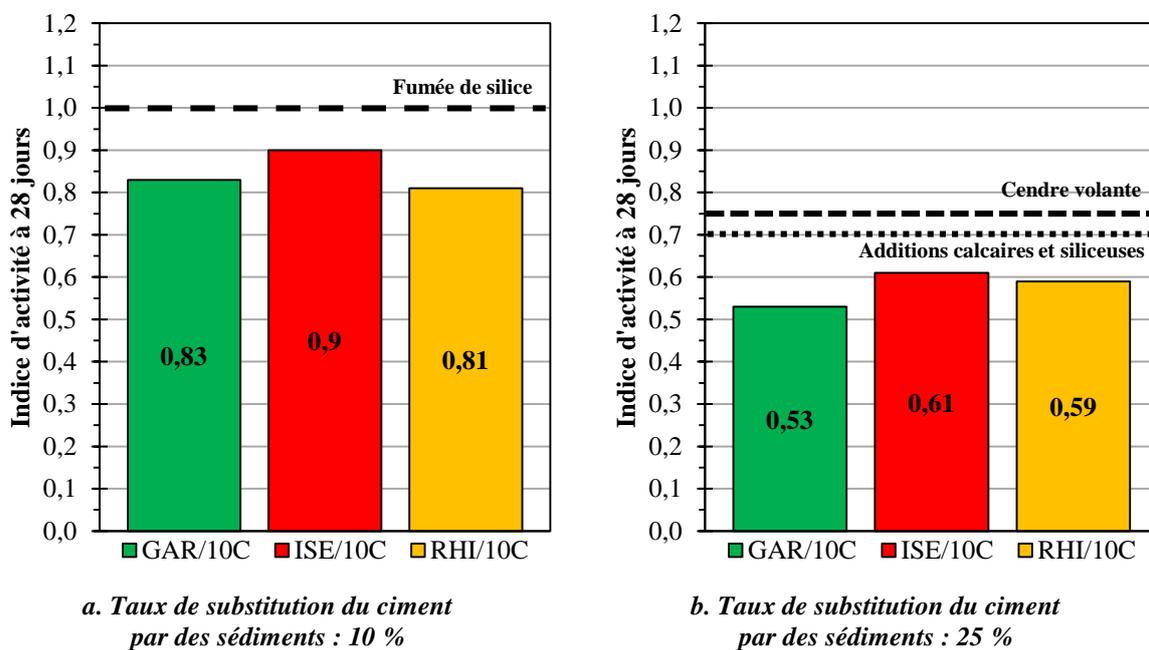


Figure 4-4. Indices d'activité des mortiers à 28 jours.

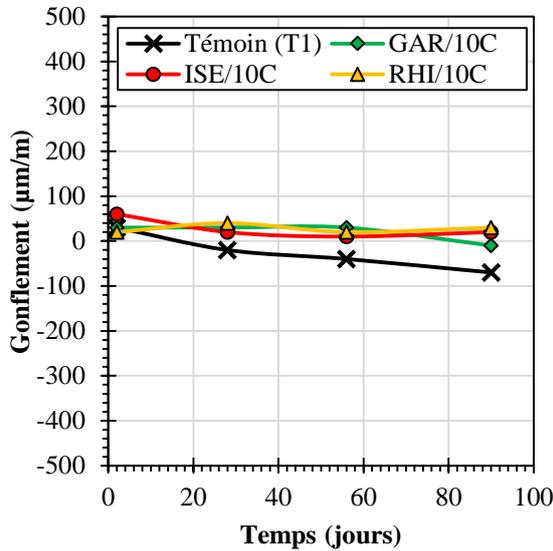
Les indices d'activité à 28 jours pour 25 % de substitution de ciment sont inférieurs aux exigences imposées aux additions normalisées. En effet, les indices d'activité des additions calcaires, des additions siliceuses et des cendres volantes doivent respectivement être supérieurs à 0,71 [NF EN 18-508], 0,70 [NF EN 18-509] et 0,75 [NF EN 450-1].

Les indices d'activité à 28 jours pour 10 % de substitution de ciment sont inférieurs à 1,0 et par conséquent inférieurs aux exigences imposées pour la fumée de silice [NF EN 13263-1+A1].

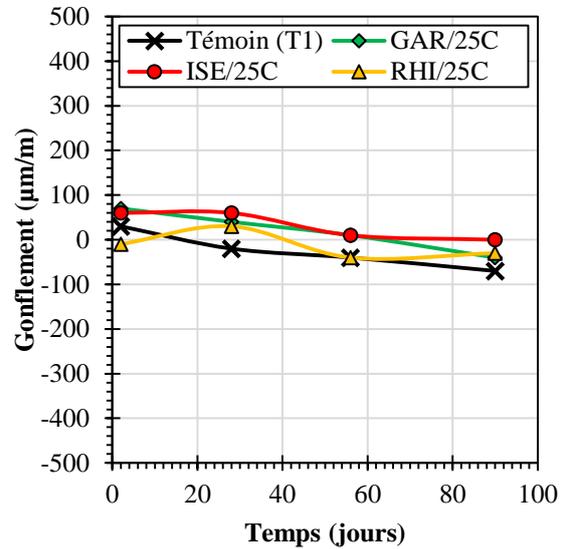
Plusieurs phénomènes notables peuvent influencer les résistances à la compression des mortiers. Pour obtenir une consistance similaire aux mortiers témoins, la demande en eau est plus élevée avec l'ajout de sédiments. Il y a alors un excès d'eau vis-à-vis des réactions d'hydratation du ciment qui conduisent à la prise et au durcissement. Cet excès d'eau, suite à son évaporation, se transforme en vides (porosité) qui affecteront la résistance du mortier. Par ailleurs, les sédiments renferment des matières organiques et des minéraux argileux qui peuvent aussi perturber la prise hydraulique et *de facto* faire chuter la résistance mécanique des mortiers. Ces effets négatifs sont atténués par le léger caractère pouzzolanique des minéraux argileux lorsqu'ils sont attaqués par le liant et l'action sur la compacité des éléments fins.

2.3.2. Retrait à l'air et gonflement à l'eau

Les résultats des mesures de suivi dimensionnel des éprouvettes sont présentés sur la figure 4-5 pour les éprouvettes conservées en eau à 20 °C (suivi du gonflement) et sur la figure 4-6 pour les éprouvettes conservées dans l'air à 20 °C et 50 % d'hygrométrie (suivi du retrait).

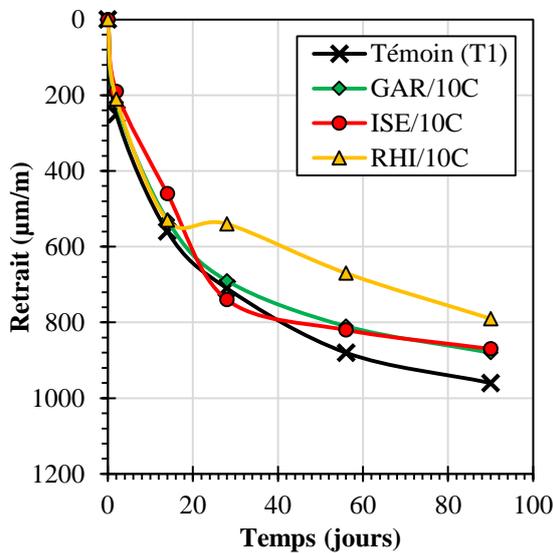


a. Taux de substitution du ciment par des sédiments : 10 %

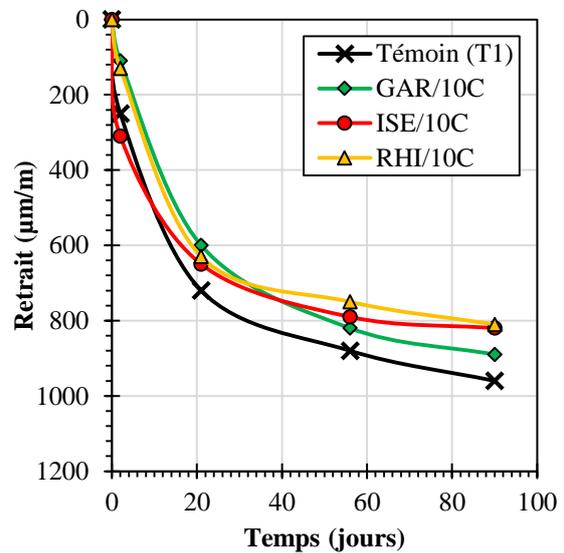


b. Taux de substitution du ciment par des sédiments : 25 %

Figure 4-5. Suivi du gonflement des éprouvettes de mortiers conservées en eau à 20 °C



a. Taux de substitution du ciment par des sédiments : 10 %



b. Taux de substitution du ciment par des sédiments : 25 %

Figure 4-6. Suivi du retrait des éprouvettes de mortiers conservées à l'air à 20 °C et 50 % d'humidité

Les variations dimensionnelles des mortiers conservés en eau restent faibles et inférieures à 100 µm. Aucun gonflement n'est observé.

Les mesures de retrait (conservation à l'air) sont similaires à celles obtenues pour le mortier témoin dans le cas des deux séries.

Les sédiments étudiés n'ont donc pas d'influence sur les variations dimensionnelles des mortiers et ce pour les deux taux de substitution.

2.3.3. Examen au microscope électronique à balayage

Les examens au microscope électronique à balayage associé, et à la microanalyse élémentaire par spectrométrie X à dispersion d'énergie ont été réalisés sur des fractures fraîches confectionnées à partir des mortiers conservés en eau pendant 90 jours. Ils ont permis de mettre en évidence les points essentiels suivants :

- Les mortiers observés présentent des caractéristiques minéralogiques et microstructurales globalement très proches. Ils sont caractérisés par une microstructure microporeuse. La charge granulaire est de nature siliceuse et silico-alumineuse. Le contact entre la pâte de ciment et les granulats est correct.
- De composition globalement silico-alumino-calcique, la matrice cimentaire est constituée essentiellement de silicates de calcium hydratés (C-S-H) généralement denses et microporeux et plus rarement fibreux. Ces C-S-H sont associés à de la portlandite sous forme de plaquettes hexagonales empilées les unes sur les autres et souvent orientées perpendiculairement aux granulats.
- Les sédiments sont intimement liés à la matrice cimentaire, notamment la fraction argileuse qui est peu discernable. Par ailleurs, aucune différence notable n'est observée entre les mortiers formulés avec des sédiments de nature différente.
- Les mortiers substitués présentent dans la matrice cimentaire une quantité d'aluminate de calcium supérieure à celle d'un mortier normal. Il semblerait qu'il s'agisse plus particulièrement de monosulfoaluminate de calcium dans le cas des mortiers substitués à 10 % et de trisulfoaluminate de calcium dans le cas des mortiers substitués à 25 %. Cette présence accrue est probablement à mettre en relation avec une certaine réactivité des argiles apportant une proportion d'aluminium et de silicium supplémentaire à la matrice cimentaire.
- Aucune pathologie particulière n'a été observée à cette échéance de conservation.

Les images des observations sous microscope électronique à balayage sont montrées en annexe 6.

2.4. CONCLUSION SUR L'APTITUDE DES SEDIMENTS A ETRE VALORISES DANS LA FILIERE

L'objet des essais menés en laboratoire se rapportait à la faisabilité d'une utilisation possible des sédiments fins de barrages comme addition minérale. L'analyse des résultats de ces essais a permis de mettre en avant les points essentiels suivants :

- Les demandes en eau des sédiments additionnés sont relativement élevées. Elles sont à mettre en relation avec leur nature argileuse plus que leur finesse ;
- La présence de matière organique peut être à l'origine d'un retard de prise pour les sédiments GAR et RHI ;
- Les résistances mécaniques obtenues sur des mortiers substitués sont proches d'un sédiment à l'autre bien que légèrement supérieures pour le sédiment ISE, sédiment le plus fin ;
- Le suivi du gonflement en immersion dans l'eau et du retrait à l'air ne montre pas d'évolution particulière ;
- Les observations au microscope électronique à balayage mettent en évidence des matrices homogènes dans lesquelles les sédiments sont intimement liés. La fraction argileuse n'est que difficilement décelable et semble avoir réagi au moins partiellement, apportant des concentrations en aluminium et silicium plus élevées que dans un mortier normal. Aucune pathologie n'a pu être observée à l'échéance de 90 jours de conservation en eau.

Les sédiments fins de barrages étudiés, utilisés comme addition minérale ne permettent pas d'obtenir des performances équivalentes à celles d'un mortier témoin ni des additions normalisées de

type calcaire ou siliceuse. Néanmoins, compte tenu du comportement observé sur des mortiers substitués, leur incorporation dans certains bétons paraît envisageable. Des essais complémentaires permettraient d'optimiser leurs conditions de mise en œuvre et d'usage, notamment par l'emploi d'adjuvants de type superplastifiants pour limiter l'apport d'eau. Ce développement vers les bétons est à mettre en relation avec le tonnage significatif du béton produit en France pour des éléments non structurants dans lesquels des sédiments pourraient être incorporés.

Les différentes caractéristiques obtenues sur les mortiers substitués diffèrent peu d'un sédiment à l'autre mais la finesse, la teneur en argile et en matière organique semblent être les paramètres les plus influents.

3. LA FILIERE « MATERIAU ROUTIER ET ASSIMILE »

Parmi les voies potentielles où les sédiments fins pourraient être valorisés, la filière matériau de remblai ou de couche de forme routière a été très étudiée pour les sédiments marins. Peu d'études concernent par contre les sédiments fins de barrages. Dans cette section, les quatre sédiments (DUR, GAR, ISE et RHI) ont été étudiés pour une valorisation en matériau routier et assimilé.

Il est entendu que tout matériau routier ou assimilé a pour application première les sous couches de toute structure routière. Mais par extension, ces matériaux peuvent être destinés à des couches de remblais, de plates-formes industrielles comme à des voies piétonnes, des pistes cyclables, chemins littoraux, ruraux et de halage, des aires de stationnement, ...

Un traitement des sédiments fins de barrages à base de liants classiques à *dosage économique* a été entrepris. Deux formulations à base de chaux et de ciment ont été proposées pour des teneurs totales égales à 6 % du poids du sédiment sec. Les performances mécaniques des sédiments fins de barrages traités aux liants hydrauliques sont ensuite évaluées. La résistance à la compression simple (R_c) est utilisée comme indicateur de l'intégrité physique du matériau stabilisé/solidifié. Les performances mécaniques des mélanges sont discutées en considérant notamment les critères de traficabilité et de sensibilité à l'eau en s'appuyant sur les références en vigueur. La préparation des éprouvettes et les essais ont été réalisés au laboratoire M2C (UMR CNRS 6143).

3.1. COMPOSITION DES MELANGES ET CONFECTION DES EPROUVETTES

Un traitement de stabilisation/solidification des sédiments à base de liants classiques a été opéré sur deux formulations à base de chaux et de ciment. Les teneurs en liants exprimées en pourcentage massique de sédiment sec, ont été volontairement limitées à un total de 6 %. Deux liants couramment utilisés pour le traitement des sols fins, ont été retenus pour cette étude. Il s'agit d'un ciment Portland ordinaire de type CEM II B-M (S-LL) 32,5R et de la chaux vive en poudre 0/1,5 mm, de teneur en CaO supérieure à 93 %.

Pour apprécier le dosage en chaux pour une stabilisation des sols fins, Eades et Grim [1966] ont développé l'essai de point de fixation de la chaux (PFC) qui permet de déterminer la quantité de chaux nécessaire et suffisante à apporter à un sol pour assurer à la fois une saturation des sites d'échanges des argiles et initier les réactions pouzzolaniques. En effectuant cet essai sur des sédiments, Dubois *et al.* [2009] et Maherzi *et al.* [2012], ont observé qu'un pourcentage de chaux de 3 % stabilise le pH à 12,4, valeur seuil liée à la dissociation de la chaux en Ca^{2+} et OH^- . Cette valeur de pH permet d'obtenir un milieu favorable au développement d'hydrates cimentaires et au développement de performances mécaniques. Ces résultats confirment les observations de Tremblay [1998]. Un dosage similaire, avec 3 % de chaux a donc été retenu dans une formulation.

Pour qu'une formulation soit dite "économique" du point de vue pratique routière, le dosage total en liants doit être inférieur à 7 % [Foucher, 2003]. Pour respecter ce critère économique, deux formulations ont été définies, voir tableau 4-9. La première formulation, notée A, est réalisée avec un dosage à hauteur de 3 % de chaux et 3 % de ciment. Une deuxième, notée B, est à base de ciment seul à hauteur de 6 % de la matière sèche des sédiments. Pour chacun des quatre sédiments, les deux formulations sont appliquées.

Tableau 4-9. Dosage en liants des mélanges

<i>Liants</i>	<i>Série A</i>	<i>Série B</i>
<i>Ciment (%)</i>	3	6
<i>Chaux (%)</i>	3	-

Un protocole de préparation a été établi pour assurer la répétabilité des opérations suivantes : séchage, malaxage, confection et conservation des échantillons.

Dans un premier temps, les sédiments bruts sont séchés dans une étuve à 50 °C pour atteindre la teneur en eau fixée à 30 %. Cette teneur a été déterminée au regard de la teneur en eau à l'optimum

Proctor que l'on rencontre pour ce type de sédiment subissant un traitement, généralement comprise entre 20 et 35 % [Maher *et al.*, 2004 ; Jauberthie *et al.*, 2010 ; Silitonga, 2010 ; Behmanesh, 2008 ; Boutouil *et al.*, 2011 ; Colin, 2003 ; Miraoui, 2010 ; Dermatas *et al.*, 2003]. Les sédiments de barrages sont ensuite mélangés aux liants dans un malaxeur durant 5 minutes, voir figure 4-7.

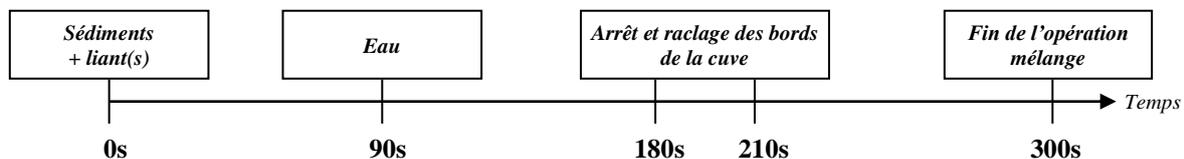


Figure 4-7. Opération de malaxage

Les éprouvettes sont ensuite moulées dans des étuis cylindriques en PVC ayant un diamètre intérieur de 34 mm et un élanement de 2. Le compactage est réalisé manuellement par piquetage tel que décrit par Liang [2012]. L'objectif de cette méthode rapide à mettre en œuvre est de permettre un compactage à une énergie équivalente par volume, relativement proche de celle d'un compactage Proctor normal.

3.2. APPROCHE EXPERIMENTALE ET ESSAIS DE VALIDATION MECANIQUE ET DE DURABILITE

L'approche expérimentale retenue dans cette étude, consiste à évaluer les performances mécaniques des sédiments traités en tenant compte de deux critères à satisfaire pour un matériau routier, à savoir, le critère de traficabilité complété du critère d'insensibilité à l'eau tels que définis dans le guide GTS [SETRA-LCPC, 2000], voir tableau 4-10 ci-après. Pour une étude complète, deux critères supplémentaires doivent être considérés : la résistance au gel et les performances escomptables à long terme.

Cinq séries d'éprouvettes pour chaque sédiment et formulation ont été compactées puis démoulées. Quatre de ces séries ont été conservées à l'air ambiant à $20 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$ jusqu'à faire l'objet d'un essai de résistance à la compression simple R_C . Les essais ont été réalisés pour des temps de cure de 7, 28 et 60 jours afin d'observer l'évolution des résistances mécaniques. Ce mode de conservation à l'air reproduit sensiblement la pratique en milieu naturel moyennement favorable au développement des résistances mécaniques. En effet, l'action des liants n'est pas optimale dans ces conditions. Dans des situations réelles, il est donc possible d'atteindre de meilleures performances mécaniques.

Tableau 4-10. Performances à atteindre après traitement, pour les paramètres retenus dans cette étude en vue d'une utilisation en couche de forme d'après le GTS [SETRA-LCPC, 2000].

Critères à satisfaire		Exigences mécaniques requises
Critère de traficabilité	R_C	$\geq 1,0 \text{ MPa}$
Critère d'insensibilité à l'eau	R_{C1}/R_{C60}	$\geq 0,8 \text{ si } VBS \leq 0,5 ; \geq 0,6 \text{ si } VBS > 0,5$

Nota : R_{C1} , résistance en compression après immersion

La cinquième série d'éprouvettes a permis d'évaluer la sensibilité à l'eau des mélanges. Dans cette optique, les éprouvettes ont été conservées 28 jours à l'air puis immergées durant 32 jours avant de faire l'objet d'un essai de compression simple (tableau 4-8). La mesure est alors notée R_{C1} . La résistance à l'immersion au jeune âge étant définie par le rapport R_{C1}/R_{C60} .

Les essais de compression simple ont été effectués sur une presse à une vitesse de déformation imposée de 1,93 mm/min. La résistance à la compression simple est la moyenne des résultats obtenus avec trois éprouvettes. Avant chaque essai, les extrémités des éprouvettes ont subi un léger surfacage de manière à obtenir deux surfaces plates et parallèles. Puis les dimensions (diamètre et longueur) et masses de l'éprouvette ont été relevées.

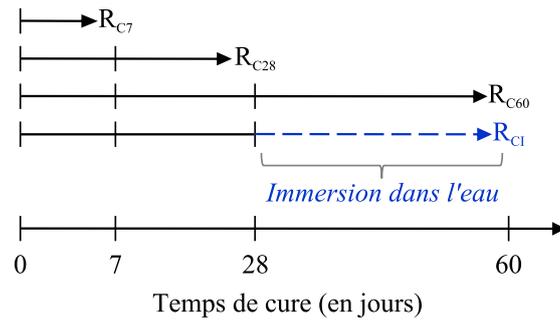


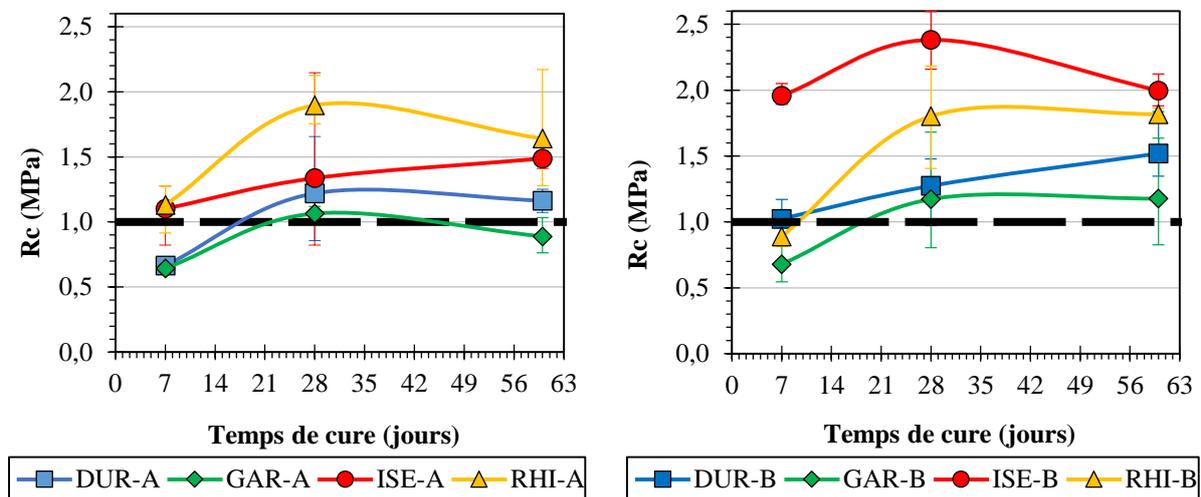
Figure 4-8. Organisation des essais et conservation des éprouvettes.

3.3. ANALYSE DES PROPRIETES DES SEDIMENTS TRAITES A PARTIR DE LA RESISTANCE EN COMPRESSION SUR EPROUVETTES

Pour une utilisation comme couche de forme, la résistance en compression doit être supérieure à 1 MPa et le rapport R_{CI}/R_{C60} supérieur à 0,6 si l'argilosité est significative. Tous les sédiments étudiés ont une valeur au bleu de méthylène (VBS) supérieure à 0,5 g de bleu / 100 g de sédiment. Notons que dans le cas de voies piétonnes ou de pistes cyclables, il n'existe pas de guide technique en vigueur mais les sollicitations sur la structure sont moindres et se limitent en surface. Les exigences mécaniques seraient alors plus faibles.

3.3.1. Evolution des résistances à la compression

Les évolutions temporelles des résistances mécaniques à la rupture obtenues pour les mélanges sont données sur la figure 4-9. Les barres d'incertitudes indiquent les valeurs minimales et maximales.



a. Formulation A (3% chaux + 3% ciment)

b. Formulation B (6% ciment)

Figure 4-9. Evolution comparée des résistances en compression simple.

Pour la formulation A, les résistances augmentent jusqu'à 28 jours dans la plupart des cas. Au-delà de cette date, les mélanges marquent une légère diminution, excepté pour le sédiment ISE. L'étendue de résistance à 7 jours va de 0,64 à 1,13 MPa, elle passe de 0,89 à 1,64 MPa à 60 jours. Le seuil de 1 MPa est dépassé pour tous les sédiments à 28 jours mais à 60 jours le sédiment GAR n'atteint pas cette valeur.

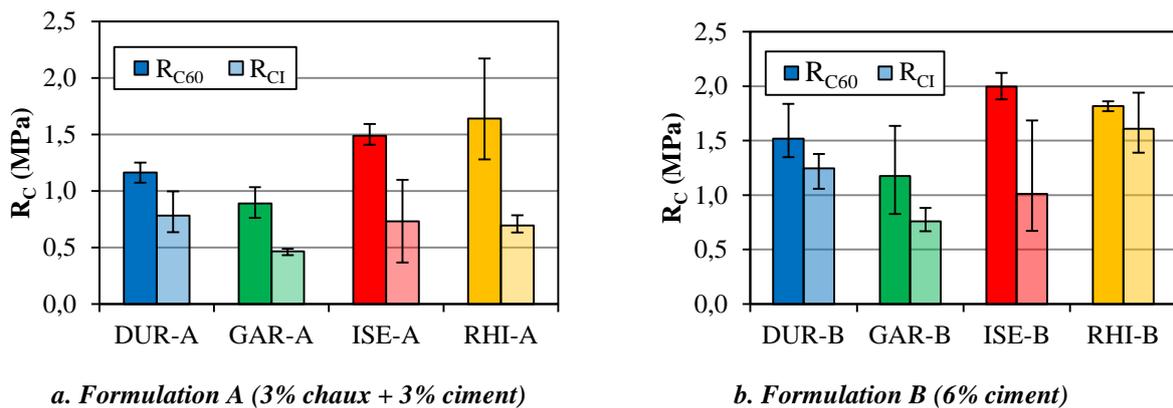
Pour la formulation B, le développement des résistances semble plus rapide. On constate qu'elles atteignent toutes des valeurs supérieures à 1 MPa, résistance seuil autorisant la circulation sur la couche traitée, dès 14 jours. L'intervalle de résistance obtenu à 7 jours se répartit entre 0,68 et 1,96 MPa. Le sédiment ISE développe à court terme des résistances mécaniques très satisfaisantes. A 60 jours les valeurs observées vont de 1,18 à 2,00 MPa. Les résistances mécaniques à 60 jours (R_{C60}) sont légèrement meilleures pour la formulation B avec un dosage à 6 % de ciment que la formulation A. Ceci est observé pour tous les sédiments.

3.3.2. Résistance à l'immersion "au jeune âge"

Afin d'apprécier l'influence du mode de cure sur la résistance en compression simple, des histogrammes comparatifs sont tracés sur la figure 4-10.

Les résistances à l'immersion observées sont plus faibles pour les mélanges de composition A que ceux de composition B. Les rapports R_{CI}/R_{C60} , permettant de qualifier les mélanges au regard du critère d'insensibilité à l'eau, sont donnés sur la figure 4-11.

Pour les mélanges de composition A, les rapports R_{CI}/R_{C60} vont de 0,42 à 0,67. Seul le sédiment DUR est au-dessus du ratio de 0,6. Pour les mélanges avec la composition B, les rapports R_{CI}/R_{C60} vont de 0,51 à 0,89. Seul le sédiment ISE ne satisfait pas le critère d'insensibilité à l'eau pour les deux formulations. Cette observation est à relativiser par le fait que la résistance R_{CI} de ce le mélange ISE-B, atteint 1,01 MPa. Autrement dit, le sédiment se montre sensible à l'eau mais le niveau de résistance observé après immersion reste satisfaisant.



a. Formulation A (3% chaux + 3% ciment)

b. Formulation B (6% ciment)

Figure 4-10. Valeurs comparées de R_{C60} et de R_{CI} .

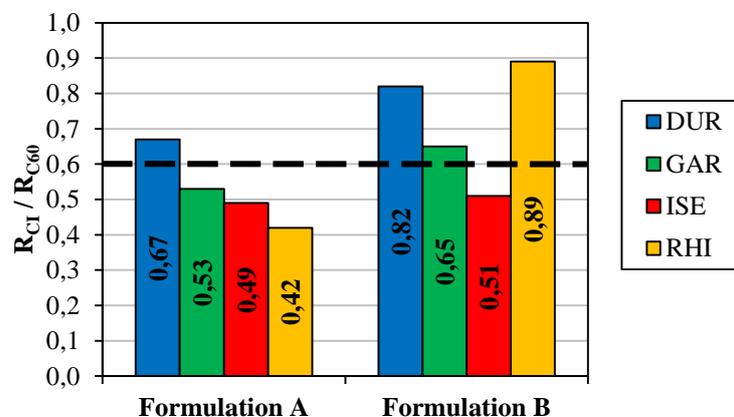


Figure 4-11. Résistance à l'immersion au jeune âge des mélanges.

La finesse des grains du sédiment ISE peut être une hypothèse pour expliquer sa sensibilité à l'eau. Elle confère à l'éprouvette un faible squelette interne au matériau stabilisé/solidifié. Il s'agit en effet du sédiment qui présente la granulométrie la plus fine, le seul qui soit dépourvu de fraction sableuse. Afin de limiter la sensibilité à l'eau, il est envisageable d'ajuster ou d'optimiser les formulations (dosage, qualité de résistance du ciment), de recourir à des ajouts voire utiliser un correcteur granulométrique.

Le sédiment DUR développe des résistances à l'immersion suffisantes qui satisfont le critère pour les deux formulations. Il apparaît moins sensible à l'eau avec la formulation B. Cette remarque prévaut pour tous les sédiments. Ainsi, la formulation B est à préconiser quant au respect du critère de sensibilité à l'eau.

3.4. CO-VALORISATION ET LIANT ALTERNATIF : UNE CENDRE VOLANTE ISSUE DE L'INDUSTRIE PAPETIERE

Une des solutions possibles et avantageuses à la valorisation des déchets est la co-valorisation. Elle consiste à valoriser deux déchets ou plus pour créer un nouveau matériau. Dans le cas de la valorisation de sédiments marins et des fines de carrières, Liang [2012] utilise des fibres végétales et synthétiques pour modifier les propriétés mécaniques. Ces fibres peuvent venir de déchets.

Une étude exploratoire de co-valorisation a été menée par Alaeipirali [2014] incorporant deux types de déchet : un sédiment fin de barrage et un coproduit industriel, à savoir une cendre volante papetière notée CVP. Avec le même protocole appliqué aux sédiments traités aux liants, les sédiments fins référencés ISE et RHI sont mélangés à part égale, soit 50 % de sédiments secs et 50 % de cendres CVP. Des éprouvettes de même taille 34 x 68 mm sont préparées. La teneur en eau des mélanges est fixée à 20 %. Les éprouvettes sont conservées à l'air et des essais de résistance à la compression simple sont menés à 7, 14 et 28 jours.

L'évolution des résistances mécaniques est montrée sur la figure 4-12. On observe que la série ISE-CVP, composée avec 50 % de sédiment ISE et 50 % de CVP, présente des performances mécaniques supérieures à la série RHI-CVP. Pour les deux séries, la résistance mécanique à 28 jours est supérieure à 1 MPa. Les résultats de ces mélanges, sans ajout de liants traditionnels sont prometteurs. Des investigations complémentaires sont nécessaires, elles pourraient porter sur les réactions chimiques et l'analyse de la micro-structure afin d'améliorer et optimiser ce mélange sédiments-cendres CVP.

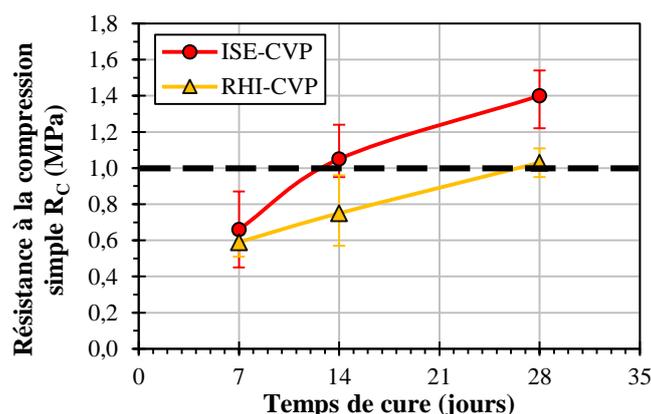


Figure 4-12. Evolution de la résistance à la compression simple des mélanges sédiments de barrages / CVP

3.5. CONCLUSION SUR L'APTITUDE DES SEDIMENTS A ETRE VALORISES DANS LA FILIERE

La procédure de caractérisation géotechnique a permis d'orienter le choix des compositions des mélanges pour une stabilisation aux liants classiques. Les sédiments sont en majorité des limons plus

ou moins organiques. L'étude visait à évaluer un réemploi des sédiments de barrages traités en matériau routier ou assimilé.

Cette étude a été réalisée à partir de l'analyse des performances mécaniques de deux formulations : l'une, notée A avec un dosage à 3 % de chaux et 3 % de ciment et la seconde, notée B, avec un dosage unique de 6 % de ciment.

Au regard du critère de traficabilité, les résistances mécaniques des mélanges des compositions A (à l'exception du mélange GAR-A) et B satisfont la valeur seuil de 1 MPa. Ce critère est atteint dès 14 jours pour les sédiments traités pour la formulation B. Pour tous les sédiments étudiés, les résistances obtenues à 60 jours avec la formulation B sont meilleures que celles obtenues avec la formulation A.

Au regard du critère d'insensibilité à l'eau, la formulation A ne se montre pas suffisamment efficace. En revanche, la formulation B satisfait ce critère dans tous les cas à l'exception du sédiment ISE qui reste sensible à l'eau. Cependant, le niveau de résistance observé après immersion du mélange ISE-B, proche de 1 MPa, reste satisfaisant.

La formulation B, avec 6 % de ciment, est donc plus efficace que la formulation A pour l'ensemble des sédiments au regard des résistances mécaniques et ce pour les deux modes de conservation (cure à l'air et immersion). Cette formulation est préconisée dans le cas des sédiments de barrages étudiés. Les résultats obtenus sont encourageants pour envisager une valorisation matière des sédiments de barrages dans des applications géotechniques telles que des couches de forme, de pistes cyclables, de voies piétonnes, etc. Des études complémentaires restent nécessaires avant d'effectuer une réalisation pratique. Elles pourraient comporter une caractérisation complète des gisements afin d'en évaluer l'homogénéité, les caractéristiques de mise en œuvre et les performances escomptables à long terme à l'aide d'essais de traction indirecte et de la détermination des modules d'élasticité des sédiments traités.

4. LA FILIERE « MATERIAU CERAMIQUE »

Les sédiments fins de barrages étudiés renferment des minéraux argileux en quantité significative. Pour la fabrication des céramiques silicatées, l'argile est la matière première. Au regard des compositions minéralogique, chimique et granulométrique similaires entre les sédiments des retenues hydroélectriques et les matières premières traditionnelles utilisées pour l'élaboration de matériaux céramiques, il semble judicieux d'envisager leur utilisation dans l'industrie céramique comme matière première alternative.

Deux procédés de mise en forme couramment utilisés dans les céramiques traditionnelles ont été retenus. Tout d'abord, la mise en forme est réalisée à partir d'une suspension coulée dans un moule (voie humide). Ensuite, la mise en forme est obtenue par extrusion à partir d'une pâte plastique (voie semi-humide). Les sédiments référencés DUR, ISE et RHI sont considérés pour l'étude de cette filière.

Les essais menés dans le cadre de la valorisation des sédiments fins de barrages comme matière première pour la préparation de matériaux céramiques ont été confiés à l'ENSCI de Limoges. Différentes études et essais de mise en forme par le procédé de coulage conventionnel en moule en plâtre ont été effectués [Dosi *et al.*, 2013 ; Delaitre, 2013]. Les travaux relatifs aux essais avec une mise en forme par extrusion ont été conduits par Gouré-Doubi *et al.*, [2014]. Les sections suivantes présentent et rappellent les principaux essais effectués et dressent l'analyse des résultats obtenus.

4.1. MISE EN FORME A PARTIR D'UNE SUSPENSION

Les teneurs en eau élevées des sédiments fins de barrages ont conduit à privilégier des essais préliminaires de mise en forme par le procédé de coulage conventionnel en moule plâtre. Cette technique simple à mettre en œuvre permet de valoriser les matières premières directement après extraction, sans étape de séchage.

Les procédés par voie humide reposent sur la préparation d'une suspension céramique stable, la barbotine. On ajoute un défloculant pour disperser les grains de manière homogène. La barbotine est coulée dans un moule poreux en plâtre qui absorbe par capillarité une grande partie de l'eau, en provoquant la solidification de la pâte. La pièce est démoulée puis séchée et enfin cuite.

Deux stratégies de valorisation, basées sur des essais de mise en forme par le procédé de coulage conventionnel en moule plâtre, ont été développées :

- La première vise à utiliser des suspensions de sédiments sans modification majeure de composition.
- La seconde concerne une modification de composition des suspensions de barbotine par addition d'autres matières premières argileuses.
- Pour ces deux stratégies, les sédiments fins sont utilisés comme principal composant des mélanges ou composant unique.

4.1.1. Utilisation des sédiments sans modification majeure de composition

Les trois sédiments retenus, utilisés seuls sans aucune modification, sous forme de pseudo-barbotine, ont révélé une mauvaise coulabilité. Il est alors difficile de couler des objets de forme simple. Pour y remédier, comme dans le cas de toutes les barbotines de grès, il est nécessaire d'introduire un surfactant. Du silicate de sodium (Na_2SiO_3) est utilisé dans ce but. L'ajout est de l'ordre de quelques pour mille à savoir 0,8 à 2,2 ‰ selon le sédiment. Le suivi de l'évolution de paramètres rhéologiques a permis d'optimiser la quantité de dispersant.

La barbotine préparée à base de sédiment ISE est coulable et des pièces simples peuvent facilement être confectionnées (voir figure 4-13).

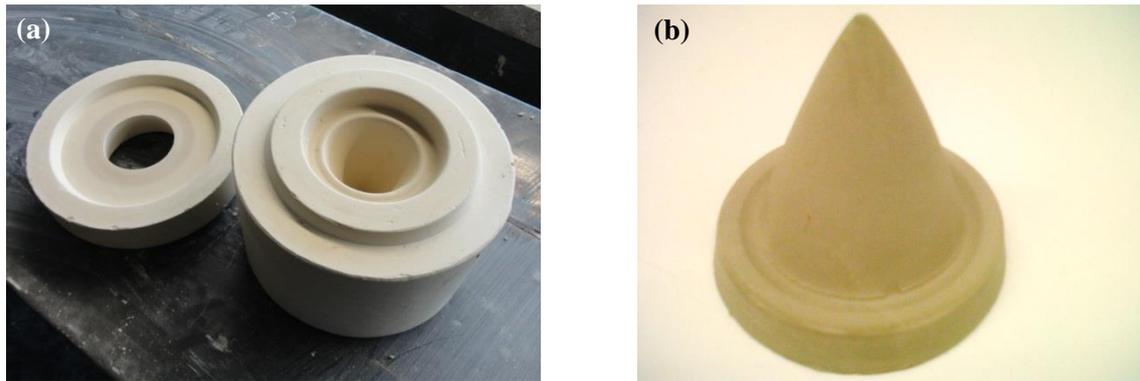


Figure 4-13. (a) Moule en plâtre utilisé pour la mise en forme d'objets simples de forme conique et (b) pièce crue à base de sédiment ISE.

En revanche, les barbotines à base des sédiments DUR et RHI se coulent très difficilement. Au démoulage, les objets crus se fendent et s'effritent, étant donné le manque de matière plastifiante des suspensions de coulage.

4.1.2. Utilisation des sédiments après modification de composition

Pour pallier les difficultés à mettre en forme les sédiments DUR et RHI seuls, des matières plastiques commerciales ont été apportées et mélangées à ces deux sédiments.

Différentes proportions massiques (10, 15 et 20 %) d'une argile OKA¹ ou d'argile RR40² dont la teneur en kaolinite est élevée et avec un faible taux de phases secondaires dégraissantes, ont été ajoutées. L'ajout surfactant est ensuite adapté aux nouveaux mélanges. Le mélange référencé DUR+20-OKA nécessite la plus grande quantité en surfactant, à savoir 4,5 %. Avec ces mélanges, des pièces simples parviennent à être confectionnées.

4.1.3. Cuisson et caractéristiques des produits céramiques

Pour optimiser la température de cuisson des différentes compositions élaborées et testées, des cuissons sont effectuées au four gradient. Dans ce dispositif, la température varie de façon continue le long de l'axe du four (de 800 °C à 1150 °C) où neuf points de mesure instrumentés sont répertoriés. Une illustration de ce dispositif est donnée à la figure 4-14. La température optimale de traitement thermique pour un mélange donné a été déterminée en se référant à :

- l'aspect macroscopique des échantillons (présence de fissure, écaillage),
- la densification (couleur, test acoustique par choc manuel),
- la résistance mécanique (effritement, tentative de rupture manuelle).

Pour la barbotine à base de sédiment ISE (avec 0,8 % en Na_2SiO_3), une température de 1000 °C permet leur consolidation. A cette température, il n'y a pas de défauts macroscopiques comme l'atteste la figure 4-15a. Les échantillons à base de sédiment ISE présentent une perte de masse relativement limitée, de l'ordre de 13 %. En résumé, seuls les sédiments ISE sont « céramisables » après dispersion sans addition de matières premières.

Les résultats de cuisson au four gradient indiquent, pour tous les mélanges testés avec les sédiments DUR, que le mélange avec un ajout de 20 % d'argile OKA possède les meilleures propriétés macroscopiques, optimisées pour une température de traitement thermique de 1150 °C.

¹ 79 % de kaolinite, 12 % de quartz et 9 % d'illites-montmorillonites

² 90 % de kaolinite et 8 % de quartz, ainsi que des traces d'anatase et de rutile

Zone	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
T (°C)	1150	1123	1096	1062	1025	980	929	876	803

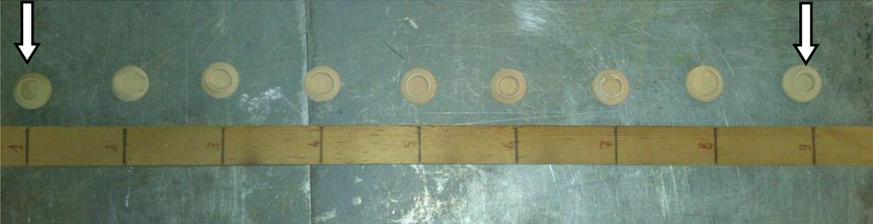


Figure 4-14. Exemple type d'un test de cuisson en four gradient avec des niveaux de température mesurés pour chaque zone

En ce qui concerne le sédiment RHI, une addition de 10 % de kaolin OKA conduit à des échantillons présentant des propriétés macroscopiques correctes pour une température de traitement thermique de 1125 °C. Une addition du même pourcentage de RR40 amène à des échantillons corrects pour une température de 1150°C. Cependant, les fragments de coquilles présents dans les sédiments RHI sont à l'origine de point de chaux sur certaines pièces comme observé sur la figure 4-15b.

L'augmentation de 10 à 20 % de la quantité d'argile RR40 ajoutée aux sédiments RHI se traduit par une diminution notable de la température de consolidation. L'optimisation de la température de traitement thermique en fonction de la composition de quelques mélanges est synthétisée dans le tableau 4-11.

Tableau 4-11. Température de cuisson optimale

	Masse volumique apparente (g/cm ³)	Teneur en Na ₂ SiO ₃ (‰)	Température de cuisson optimale (°C)
ISE	1,3	0,8	1000
DUR + 20-OKA	1,8	4,5	1150
RHI + 10-OKA	1,6	0,3	1125
RHI + 10-RR40	1,5	0,4	1150
RHI + 20-RR40	1,6	0,7	1095

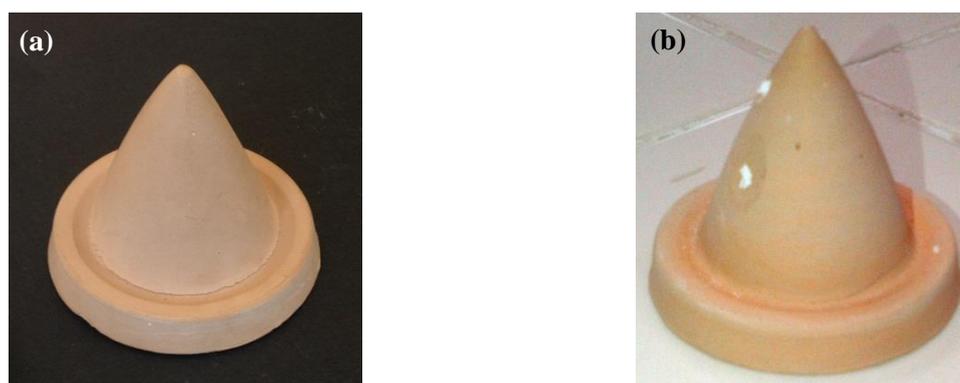


Figure 4-15. Aspect des pièces cuites à base de (a) sédiment ISE et de (b) sédiment RHI avec un ajout de 20 % d'argile RR40.

Pour tester la résistance mécanique en flexion trois points des matériaux consolidés, des barrettes de 246 x 15 x 20 mm sont coulées dans des moules en plâtre. Le comportement du sédiment RHI, même après modification de sa composition avec un ajout de matière plastique, ne permet pas de démouler les pièces crues en forme de barrettes sans les altérer. De ce fait, elles se fissurent au séchage. Ainsi, les essais de caractérisation mécanique n'ont pu être effectués sur les mélanges à base de sédiment RHI. Les caractéristiques physiques et mécaniques déterminées sur les pièces confectionnées à partir des barbotines les plus adaptées sont données dans le tableau 4-12.

Tableau 4-12. Caractéristiques physico-mécaniques des pièces cuites à base de sédiments.

	<i>Contrainte à la rupture en flexion trois points (MPa)</i>	<i>Porosité (%)</i>	<i>Perte massique à la cuisson (%)</i>
<i>ISE</i>	$7,8 \pm 1,3$	45,3	13,7
<i>DUR + 20-OKA</i>	$12,4 \pm 2,3$	39,0	17,3

Il est bien établi que la mise en forme des pièces crues est une étape importante qui conditionne la qualité de la pièce finale. Parmi les trois sédiments étudiés, seul le sédiment ISE a des caractéristiques adaptées pour être mis en forme par coulage sans apport de matière plastique, avec seulement un ajout de surfactant. En effet, le sédiment DUR nécessite un ajout d'argile plastique pour présenter des caractéristiques convenables. Pour le sédiment RHI, bien que des pièces soient réalisables, leur qualité reste médiocre à cause du démoulage délicat. Et pour ce sédiment, il conviendra de séparer les fragments coquilliers grossiers ou d'envisager un broyage pour éviter le phénomène de point de chaux particulièrement compromettant.

4.1. MISE EN FORME A PARTIR D'UNE PATE PLASTIQUE

Dans cette section la mise en forme est réalisée à partir d'une pâte plastique. La teneur en eau de la pâte pour être mise en forme est plus faible que dans le cas d'un moulage par voie humide précédemment étudié. Le procédé retenu pour façonner les pièces est l'extrusion. Il consiste à forcer la pâte céramique plastique à travers une filière. C'est le procédé de mise en forme le plus couramment utilisé dans l'industrie de la terre cuite. La mise en forme à partir de pâtes plastiques est réalisée sur les sédiments référencés ISE et RHI.

4.1.1. Préparation des briques

Les sédiments RHI sont préalablement passés dans un tamis avec des mailles de 1 mm afin d'éliminer les éléments grossiers indésirables tels que les fragments de coquilles ou débris végétaux.

Des échantillons de briques sont mis en forme par extrusion. L'humidité des pâtes extrudées varie de 24 à 30 %. Le ruban de pâte extrudé est débité en tronçons de manière à former des pièces de format 14 x 40 x 16 mm.

Les échantillons de briques sont ensuite séchés dans une étuve à 40 °C pendant 72 h, puis les pièces crues sont cuites à différentes températures.

Lors de la phase d'extrusion, des difficultés sont apparues pour mettre en forme la pâte à base de sédiment RHI à cause de sa mauvaise plasticité. Ce constat vient confirmer l'observation faite dans le chapitre précédent. Rappelons en effet que dans la section 4.4 du chapitre 3, en considérant les limites d'Atterberg et le diagramme de Gippini [1969], il avait été observé des propriétés de mise en forme acceptables pour le sédiment ISE alors que le sédiment présentait une limite de plasticité trop élevée (voir figure 3-29).

De ces difficultés d'extrusion, deux autres pâtes à base de sédiments RHI ont été testées avec une addition de 10 et 20 % en masse d'une argile plastique brute commerciale de type RR40. Les compositions obtenues sont référencées RHI-10R et RHI-20R. L'argile RR40 est composée de 90 % de kaolinite, 8 % de quartz ainsi que de traces d'anatase et de rutile.

4.1.2. Détermination de la température de cuisson

La détermination de la température de cuisson a été déterminée en considérant le comportement dilatométrique de pâtes extrudées à base de sédiment. Pour les terres cuites, la densification par frittage est influencée par les transformations typiques des minéraux argileux et par la quantité et la distribution de taille des phases granulaires entrant dans les mélanges initiaux. Pour ce faire, des petits échantillons prismatiques de 6 x 6 x 10 mm ont été coupés dans les pièces extrudées. Après séchage à

40 °C pendant 48 heures, le comportement à la densification de ces échantillons au cours d'un chauffage à 5 °C / min sous air a été caractérisé à l'aide d'un dilatomètre vertical SETSYS TMA Evolution (SETARAM). Les températures maximales sont de 1 050 °C et 1 125 °C pour les échantillons de pâte extrudés, à base respectivement, de sédiment ISE et de sédiment RHI. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 4-16.

L'analyse dilatométrique met en avant des similitudes et des différences entre les deux échantillons préparés à base des deux sédiments étudiés. Les deux pâtes présentent deux densifications avec une première densification vers 850 °C. La seconde densification a lieu à des températures différentes. Elle intervient pour une température plus élevée pour les pâtes de sédiment RHI que les pâtes de sédiment ISE. Notons également qu'à 1 050 °C, l'échantillon ISE présente moins de retrait que l'échantillon RHI.

En prenant en compte les résultats de l'étude partant d'une mise en forme à partir d'une suspension (section précédente), les compositions minéralogiques et le processus de mise en forme, il est probable que le sédiment ISE puisse être consolidé à une température inférieure à celle du sédiment RHI. Par conséquent, nous avons décidé de cuire des briques à base de sédiment RHI à la température de 1 125 °C et aux températures de 880 °C, 1 000 °C et 1 050 °C pour les briques à base de sédiment ISE. La température de cuisson des pâtes référencées RHI-10R et RHI-20R est fixée à 1 095 °C.

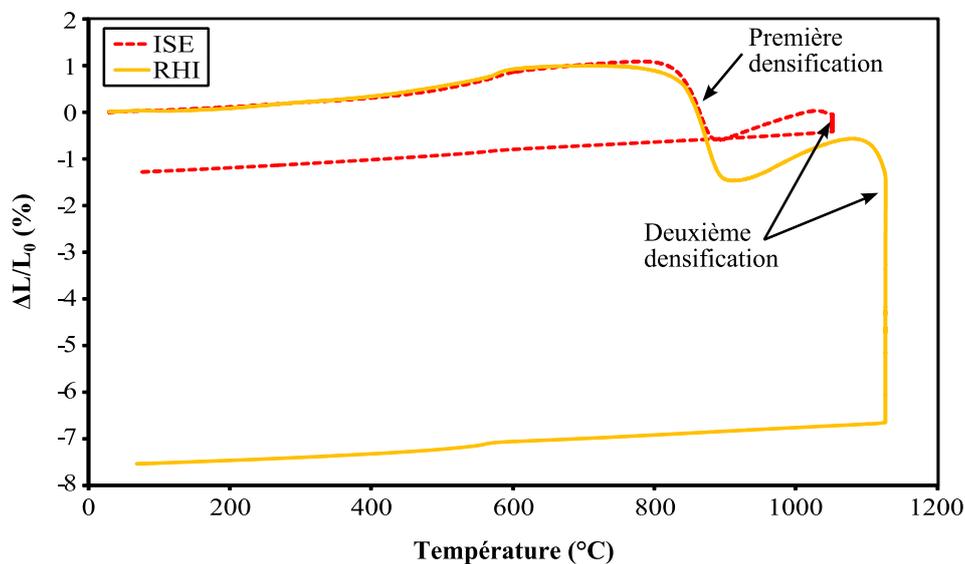


Figure 4-16. Courbes dilatométriques des sédiments ISE et RHI

Les paramètres de cuisson suivants ont été appliqués pour les échantillons de briques :

- une montée en température de 5 °C / min jusqu'à la température souhaitée ;
- un palier de 2 heures à la température ciblée ;
- un refroidissement depuis la température maximale jusqu'à la température ambiante à la vitesse de 10 °C / min.

4.1.3. Propriétés des briques cuites

Pour caractériser les échantillons cuits ou tessons, les caractéristiques suivantes sont déterminées : porosité, absorption d'eau, conductivité thermique et résistance à la flexion. L'ensemble de ces caractéristiques est présenté dans le tableau 4-12.

Tableau 4-13. Propriétés des échantillons cuits de briques à base de sédiments fins de barrages

Référence	Température de cuisson (°C)	Masse volumique apparente (g/cm ³)	Masse volumique absolue (g/cm ³)	Porosité totale (%)	Absorption d'eau (%)	Conductivité thermique (W/m.K)	Résistance à la flexion (MPa)
ISE	880	1,52	2,81	45,9	29,7	0,45	9,3
ISE	1000	1,37	2,82	51,4	30,1	0,44	7,9
ISE	1050	1,38	2,82	41,2	30,6	0,45	9,7
RHI	1125	1,37	2,75	50,2	28,0	0,66	7,5
RHI-10R	1095	1,36	2,75	50,7	25,3	0,50	7,5
RHI-20R	1095	1,48	2,72	45,2	19,8	0,60	8,7

La porosité des tessons à base de sédiments varie de 41,2 à 50,7 %. Elle dépend de nombreux facteurs tels que le mélange argileux initial (nature et quantité de minéraux argileux, granulométrie, etc.) et du cycle de cuisson (température maximale, temps de maintien).

En pratique, les matériaux de terre cuite sont poreux dans une large gamme. Selon Kornmann [2009], la porosité varie entre 15 et 48 %, bien que la porosité la plus fréquente soit de l'ordre de 35 %. La porosité des tessons à base de sédiment est donc élevée, voire trop élevée pour les échantillons RHI, RHI-10R et l'échantillon ISE cuit à 1000 °C.

Les masses volumiques apparentes vont de 1,36 à 1,52 g/cm³. Selon Kornmann [2009], elles varient en pratique de 2,2 g/cm³ (tuile) à 1,3 g/cm³ (brique très posée). La relation entre la masse volumique absolue, la masse volumique apparente et la porosité totale est la suivante :

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{\rho_a}{\rho_s} \right) \quad \text{Eq. 20}$$

avec : ε la porosité totale, ρ_a la masse volumique apparente et ρ_s la masse volumique absolue.

L'absorption d'eau est déterminée selon le principe de la norme NF EN 772-21 en faisant la différence de masse des tessons avant (m_1) et après une immersion de 20 h dans de l'eau déminéralisée à température ambiante (m_2). Le calcul de l'absorption d'eau est réalisé avec l'équation suivante :

$$\text{Absorption d'eau} = \left(\frac{m_2 - m_1}{m_1} \right) \times 100 \quad \text{Eq. 21}$$

Les valeurs obtenues pour l'absorption d'eau s'étalent de 19,8 à 30,6 %. Elles sont élevées mais restent acceptables pour des briques, voir figure 4-17a.

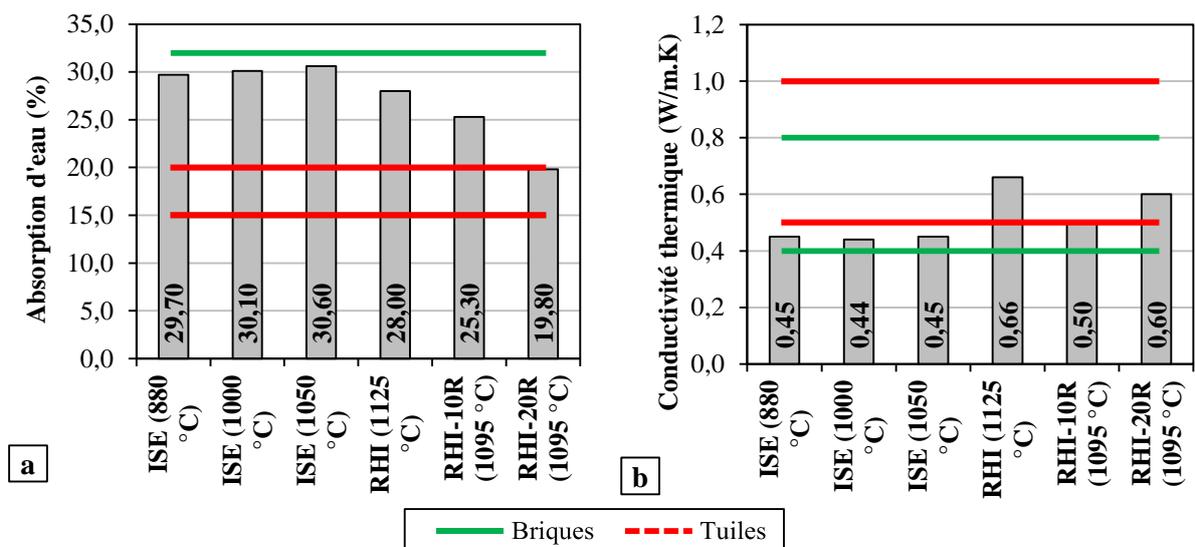


Figure 4-17. (a) Absorption d'eau et (b) conductivité thermique des tessons à base de sédiments fins de barrages

La conductivité thermique est mesurée par la méthode de la source plane transitoire (disque chaud). Les résultats sont illustrés à la figure 4-17b.

La résistance mécanique a été mesurée par des essais de flexion trois points sur les tessons de 40 x 14 x 16 mm. Les valeurs données dans le tableau 4-13 sont des moyennes d'essais conduits sur cinq échantillons. La gamme de valeurs moyennes mesurée pour la résistance à la flexion, de 7,5 à 9,7 MPa, correspond *a priori* plus aux caractéristiques mécaniques des briques, généralement comprise entre 6 et 14 MPa, que celles des tuiles qui nécessitent d'avoir une résistance en flexion plus élevée (12 à 22 MPa).

La porosité est un facteur majeur qui influe sur les propriétés de la terre cuite, notamment la résistance mécanique. La figure 4-18 traduit cette relation sur les tessons à base de sédiments fins.

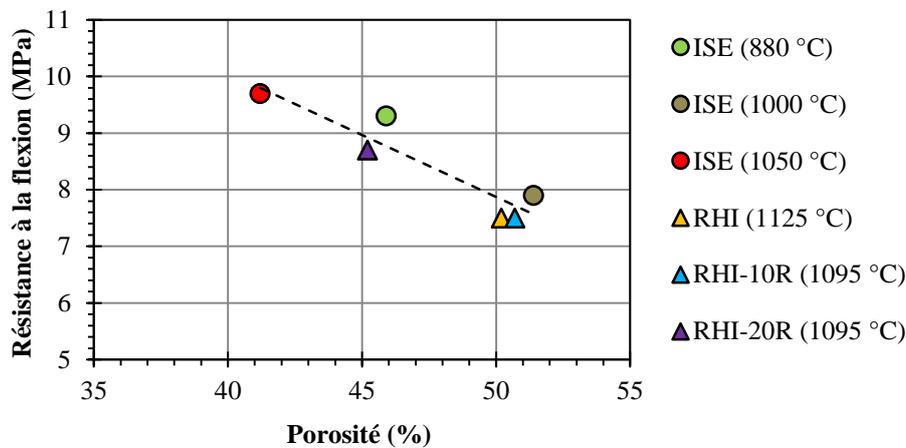


Figure 4-18. Relation entre la porosité et résistance mécanique des pièces cuites à base de sédiments

Les caractéristiques finales des échantillons ISE cuits à 1050 °C et RHI cuits à 1125 °C peuvent être justifiées par la différence de microstructure, comme l'illustre la figure 4-19. L'échantillon à base de sédiment RHI présente des pores dilatés avec une structure lâche qui est préjudiciable pour les propriétés d'usage recherchées.

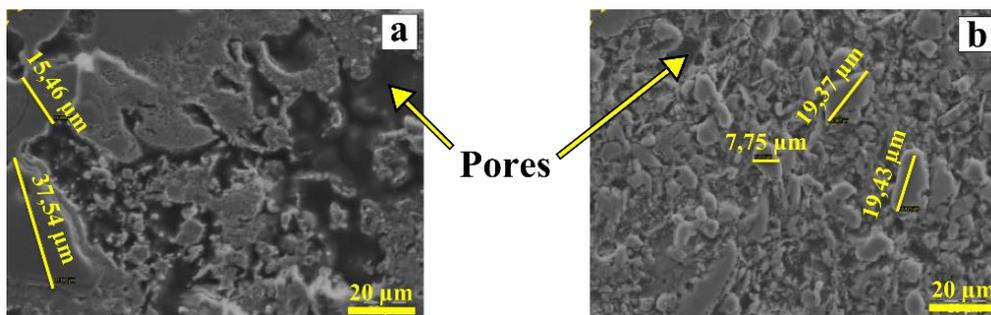


Figure 4-19. Examen au MEB des tessons à base de (a) sédiment RHI à 1125 °C et (b) à base de sédiment ISE à 1050 °C.

Finalement, les produits à base de sédiments ISE présentent des caractéristiques appropriées sans modification de la composition après une cuisson à 880°C. Le sédiment RHI nécessite un ajout de matière plastique (argile RR40) afin d'avoir une plasticité acceptable pour être mis en forme par extrusion. De plus, l'ajout d'argile RR40 améliore les propriétés des pièces cuites à base de sédiments RHI.

4.2. CONCLUSION SUR L'APTITUDE DES SEDIMENTS A ETRE VALORISES DANS LA FILIERE

Des céramiques ont été réalisées à base de sédiments fins de barrages avec deux procédés de mise en forme, l'un par voie humide et l'autre par voie plastique.

Les résultats de ces études de faisabilité confirment en partie les comportements auxquels on peut s'attendre au regard des caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques et géotechniques des différents sédiments. En effet, dans le chapitre précédent, à la section 4.4, relative à l'interprétation de la caractérisation des sédiments, les atouts et les inconvénients étaient énoncés. Si nous considérons les propriétés de mise en forme, le sédiment ISE avait les caractéristiques les plus adaptées parmi les sédiments fins de barrages étudiés. Dans cette section nous constatons que ce sédiment a pu être mis en forme sans ajout de matière plastique. Le sédiment RHI qui présentait des propriétés moins acceptables, a dû être mélangé à d'autres matériaux plastiques afin d'obtenir des pièces céramiques avec des propriétés acceptables.

Les travaux menés confirment qu'une utilisation dans cette filière est envisageable. Les résultats de ces études de faisabilité sont prometteurs. Un point important est que les sédiments fins de retenues hydroélectriques ont été utilisés à l'état naturel directement, comme principal composant des mélanges ou composant unique.

5. POTENTIEL DE VALORISATION DES SEDIMENTS FINS CALCINES

Un traitement thermique sur les sédiments fins de barrages à une gamme de température de 600 à 800 °C présente de multiples intérêts et permet de lever plusieurs verrous pour certaines filières de valorisation.

Un tel traitement aura pour effet de détruire les matières organiques, de déshydrater les sédiments, de diminuer la plasticité, de détruire les CTO, d'affecter la mobilité des ETM et de diminuer la cristallinité des minéraux argileux lorsque la température de calcination est adaptée.

Dans cette section, c'est ce dernier point qui va être traité sous deux aspects :

- l'élaboration de pouzzolanes artificielles,
- l'élaboration de géopolymères.

Dans le cas de l'application d'un traitement thermique à des sédiments qui comporteraient certains contaminants, il faudra porter une attention particulière aux émissions atmosphériques de composés organiques et si besoin est, évaluer les dispositions nécessaires à leur traitement.

5.1. MATIERE PREMIERE POUR L'ELABORATION DE POUZZOLANES ARTIFICIELLES

L'option la plus prometteuse pour réduire les coûts et l'impact environnemental de la fabrication de ciment consiste à réduire la part de clinker par l'ajout d'autres constituants. Dans la même optique de réduction des coûts et impacts, le recours à des additions minérales est devenu courant dans la fabrication du béton. Les listes exhaustives des matériaux utilisables pour la fabrication du ciment et la fabrication du béton sont respectivement données dans les normes NF EN 197-1 et NF EN 206-1. Parmi les matériaux utilisables dans le cadre actuel des normes en vigueur, on trouve notamment des matériaux pouzzolaniques.

La norme américaine ASTM C125-07 donne la définition suivante d'une pouzzolane : « Les pouzzolanes sont des matériaux siliceux ou silico-alumineux, qui ne possèdent pas eux-mêmes de propriétés liantes mais qui, sous forme finement divisée et en présence d'humidité, réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à température ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes. »

Un matériau est donc dit pouzzolanique si, en présence d'eau, il présente la propriété de se combiner avec la chaux pour former un liant. Puisque c'est le caractère pouzzolanique d'un matériau qui en fait une pouzzolane (soit naturelle, soit artificielle), sont donc finalement classés sous cette dénomination, des matériaux qui n'ont aucune parenté géologique entre eux. Les pouzzolanes artificielles couramment utilisées sont le plus souvent obtenues de sous-produits industriels. Elles ont attiré l'attention des fabricants de ciment et de béton pour leur bonne performance en tant que matériaux de remplacement du clinker et/ou du ciment.

Les cendres volantes de charbon et de laitier de hauts fourneaux sont de bons exemples de sous-produits industriels qui sont à présent très largement utilisés pour substituer du ciment. Par ailleurs, il est important de noter que dans le long terme, les sous-produits actuellement disponibles ne pourront probablement pas répondre à la demande croissante en ajouts cimentaires dans certaines zones géographiques. Le laitier de haut fourneau et les cendres volantes sont tributaires des aléas technico-économiques de la fabrication de l'acier (laitier de la sidérurgie) ou de la production de l'électricité (cendres volantes). Il faut dès lors envisager et développer des travaux de recherche relatifs à de nouveaux ajouts cimentaires à partir de ressources locales. Il faudra aussi acquérir un retour d'expérience suffisant afin de permettre l'évolution des cadres normatifs pour qu'ils prennent en compte ces nouveaux ajouts cimentaires qui devront avoir des caractéristiques adéquates.

Dans ce contexte de diminution du coût économique et environnemental associés à la production du ciment, Fernandez Lopez [2009] et Antoni [2013] ont mené des travaux qui ont contribué à évaluer le potentiel d'activation thermique de sols argileux pour la production de pouzzolanes réactives. Ces pouzzolanes réactives viennent en substitution du ciment dans les ouvrages en béton. Ce choix porté sur les sols argileux, a été fait parce qu'il s'agit d'un matériau largement accessible, et qu'il a déjà été démontré que dans des conditions de calcination spécifiques, les minéraux argileux pouvaient révéler d'excellentes propriétés pouzzolaniques.

Depuis 2012, la norme NF P18-513 encadre le métakaolin pour un emploi comme addition minérale dans le béton. Le métakaolin est aussi utilisé, au même titre que les cendres volantes, pour créer des liants qui sont utilisés pour des travaux de stabilisation de sol.

Pour que les argiles présentent un caractère pouzzolanique prononcé, elles nécessitent d'être activées. L'activation des minéraux argileux désigne le processus consistant à modifier leur structure cristalline d'origine, au moyen d'action mécanique, chimique ou thermique afin de la rendre plus réactive à son environnement. Le traitement thermique est la technique la plus commune pour activer les argiles. L'activation thermique consiste à chauffer les minéraux argileux à une température donnée pour éliminer l'eau de constitution. Ce processus est appelé déshydroxylation. Comme les groupes OH font partie de la couche octaédrique et la relient à la couche tétraédrique, l'élimination de ces groupes conduit à un état structural plus désorganisé qui est un état métastable. La silice et l'alumine, ainsi transformées dans un état plus amorphe, peuvent réagir rapidement, à température ordinaire et en présence d'eau avec l'hydroxyde de calcium. Parmi les différentes espèces argileuses, c'est le kaolin qui a le potentiel le plus élevé d'activité pouzzolanique. Sa température d'activation étant dans la plage de 650 à 800 °C en fonction de sa pureté et des autres minéraux présents. Lorsque le kaolin est déshydroxylé, il est nommé « métakaolin ».

Les sédiments fins sont composés de minéraux argileux en quantité significative. Comme ils sont le résultat de processus complexes d'altération des roches avec différentes minéralogies, ces matériaux se trouvent sur la croûte terrestre avec une grande variété de structures cristallographiques et compositions chimiques. Ils sont généralement composés d'une combinaison de différents types d'argile plus ou moins pure et d'autres minéraux. Cela souligne la nécessité d'une approche scientifique du problème afin de comprendre l'influence du type d'argile et des autres minéraux sur le potentiel d'activation de ces matériaux par traitement thermique. Les études portant sur le caractère pouzzolanique des sédiments fins sont décrits dans le chapitre 2 aux sections 1.3.2 et 2.3.1 relatives aux travaux de recherche sur la valorisation en sédiments dans la filière « ciment », comme constituant du cru ; et de la filière « béton ».

Au-delà de l'emploi potentiel dans les filières « béton » et « ciment », il existe une perspective intéressante pour la valorisation en matériau routier et assimilé. On peut en effet, envisager l'élaboration d'un Liant Pouzzolanique à base de Sédiments Fins Calcinés (LPSFC) mélangés avec des liants traditionnels de type chaux et éventuellement du ciment. Ce liant LPSFC pourrait avoir comme usage de traiter des sols fins. On peut aussi prévoir le traitement de sédiments bruts présentant de faibles performances mécaniques avec le LPSFC afin de les améliorer et obtenir les caractéristiques suffisantes pour qu'ils soient employés dans la construction de couches de forme routière, de voies cyclables, de chemins piétonniers, etc. En d'autres termes, des sédiments fins traités thermiquement contribueraient donc, par leur caractère pouzzolanique, à solidifier des sédiments bruts ayant des caractéristiques mécaniques médiocres.

5.2. MATIERE PREMIERE POUR L'ELABORATION DE GEOPOLYMERES

Les géopolymères sont la réciproque minérale des polymères organiques. À la place des chaînes carbonées, on utilise de la matière minérale composée de silice et d'alumine. Le terme « géopolymère » a été inventé par le scientifique français Joseph Davidovits en 1978 [Davidovits, 1991].

Leur synthèse est réalisée par polycondensation et peut démarrer à partir d'aluminosilicates naturels ou artificiels par réaction avec une solution d'hydroxyde et/ou de silicate de métal alcalin (Na ou K).

Les matières premières minérales peuvent être des argiles calcinées (notamment du métakaolin), des cendres volantes, du laitier de haut fourneau, etc. Il est important que la matière première ait un taux d'amorphe suffisant pour engendrer une réaction de géopolymérisation. Les meilleures performances mécaniques des géopolymères synthétisés à base d'argiles calcinées sont obtenues en utilisant des argiles totalement déshydroxylées et en évitant la formation de nouvelles phases stables telles que la mullite à des températures trop élevées. Buchwald *et al.* [2009] ont utilisé aussi des argiles essentiellement illitiques-smectiques qui ont été thermiquement activées entre 550 °C et 950 °C

pour formuler des géopolymères. Malgré l'état d'amorphisation atteint lors de la calcination des argiles naturelles, leur dissolution reste plus lente que celle du métakaolin.

En contact avec une solution alcaline à pH élevé, les matières premières se dissolvent et la polycondensation a lieu. Des géopolymères amorphes sont obtenus à des températures de 20 à 90 °C tandis que des cristaux sont formés en autoclave à des températures élevées, supérieures à 200 °C.

Comme les géopolymères formés à basse température ont des structures amorphes, la diffraction des rayons X ne propose pas de caractérisation pertinente sur la structure. Par contre, la spectroscopie à haute résolution MAS-NMR (résonance magnétique nucléaire) de ^{29}Si et ^{27}Al est un outil très puissant qui fournit des données précises sur la structure.

Les matériaux géopolymères sont attrayants parce que d'excellentes propriétés mécaniques, de durabilité et de stabilité thermique peuvent être obtenues. En outre, ils sont d'un grand intérêt en raison du moindre besoin d'énergie pour leur fabrication. En effet, le processus réactionnel nécessite soit des argiles calcinées (notamment du métakaolin à partir de kaolinite calcinée à 600 - 700 °C) ou des matières premières aluminosilicatées qui sont parfois des déchets. De plus, les émissions de gaz à effet de serre peuvent être réduites jusqu'à 80 % par rapport aux matériaux traditionnels à base de ciment Portland.

Les applications des matériaux à base de géopolymères sont très diverses. Elles concernent des domaines tels que les céramiques techniques, les liants, les matériaux de construction, l'encapsulation permanente des déchets dangereux, radioactifs et des métaux toxiques, les matériaux résistant au feu, etc.

Etant donné l'intérêt des propriétés des matériaux et la diversité des applications, la recherche mondiale est en plein développement sur les sujets liés aux géopolymères. Une croissance exponentielle du nombre d'articles scientifiques est observée.

Des travaux de thèse récents ont contribué à la connaissance et au développement d'applications avec des géopolymères. Ils portent notamment sur la formulation de liants géopolymères à base d'argile [Favier, 2013 ; Najet, 2013] qui pourraient être des alternatives potentielles aux liants hydrauliques classiques ou encore sur l'emploi de technologie géopolymère pour transformer des déchets ultimes et dangereux contenant des métaux lourds en matières minérales chimiquement stables [Krausová, 2013].

Parmi les aluminosilicates, les sédiments fins méritent d'être pris en considération. La plupart d'entre eux contiennent un ensemble varié de minéraux argileux, la plupart des illites, smectites, chlorites et kaolinites. Ce sont principalement des sédiments fins provenant de retenues d'eau qui ont fait l'objet de travaux de recherche dans ce domaine. Dans tous les cas, une activation thermique est effectuée pour améliorer la réactivité des sédiments dans des procédés de polycondensation. La température est généralement comprise entre 650 et 850 °C. Ce traitement semble nécessaire pour que les minéraux argileux soit suffisamment désordonnés pour engendrer par la suite une réaction de géopolymérisation.

Les sédiments de la retenue d'A-Kung-Tien (Taiwan) ont fait l'objet de plusieurs études en relation avec les géopolymères. Dans une étude préliminaire menée par Chen *et al.*, [2009], les sédiments sont calcinés sur une gamme de température allant de 500 à 900 °C pour améliorer la réaction liée à l'activation alcaline et la polycondensation pour la fabrication d'un polymère inorganique. Le changement de la structure cristalline des sédiments dû à la déshydroxylation est caractérisé par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) et diffraction des rayons X (DRX). Les sédiments calcinés et bruts sont mélangés à une solution alcaline d'activation pour produire des polymères inorganiques et leurs résistances mécaniques en compression sont mesurées. De ces résultats expérimentaux, une température de calcination optimale de 850 °C est déterminée pour les sédiments de la retenue d'A-Kung-Tien.

Afin de confirmer ces premiers résultats, une seconde étude est conduite par Chen *et al.*, [2011] sur les mêmes sédiments. En se basant sur les résultats de l'étude préliminaire, les sédiments sont calcinés à 850 °C durant 6 heures. Le potentiel de substitution du métakaolin par des sédiments est évalué. Pour une composition typique de géopolymère avec 30 % de laitier et 70 % de métakaolin,

trois taux de substitution (50, 70 et 100 % de substitution du métakaolin) sont préparés. Plusieurs solutions d'activation alcaline sont utilisées pour produire des géopolymères à base de sédiments fins. Les auteurs montrent dans cette étude que les géopolymères à base de sédiments peuvent être employés comme liants dans la fabrication de mortiers avec une résistance à la compression élevée et une bonne aptitude au façonnage. Grâce aux résultats des études précédentes, Yang *et al.*[2013] créent une mousse polymère inorganique à partir des sédiments provenant de la même retenue.

Dans l'optique d'utiliser les sédiments fins de barrages comme matière première pour la fabrication de liants géopolymères, Ferone *et al.* [2012] étudient les sédiments des retenues d'Occhito et de Sabetta situées dans le sud de l'Italie. Après avoir été caractérisés par DRX, ATD et IRTF les sédiments, ceux-ci subissent durant 1 h et 2 h, un traitement thermique à 650 °C et 750 °C. Les sédiments calcinés sont alors caractérisés par Résonance Magnétique Nucléaire (RMN ^{27}Al) et IRTF. Puis ils sont mélangés avec une solution alcaline de NaOH à 5M afin de préparer des éprouvettes de matériau géopolymère. Les éprouvettes font l'objet de résistance mécanique en compression simple. Un panel de ces valeurs est représenté à la figure 4-20. Les auteurs concluent que les sédiments argileux calcinés étudiés provenant de retenues de barrages en Italie peuvent constituer des précurseurs dans les réactions de polycondensation.

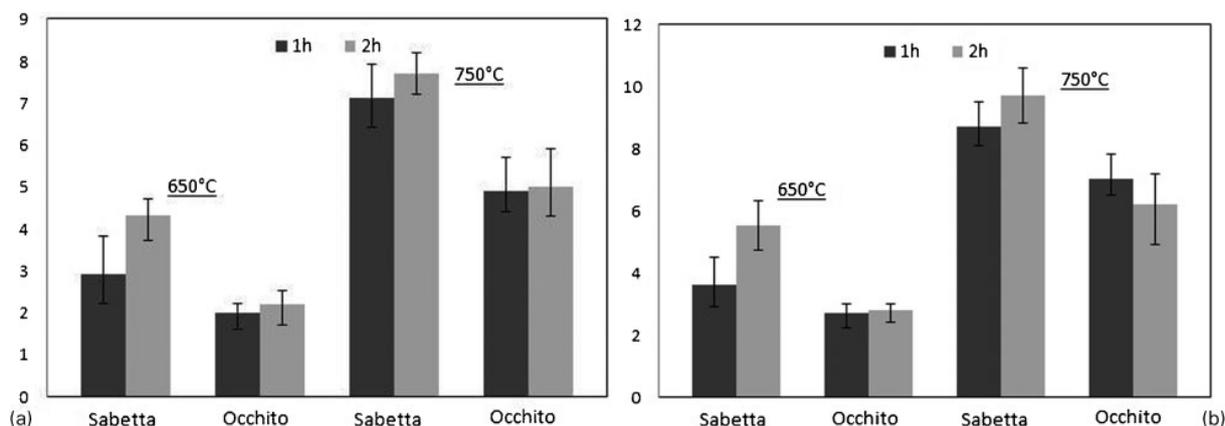


Figure 4-20. Résistance en compression simple (en MPa) des éprouvettes de géopolymères après une cure de (a) 3 jours à 60 °C et 4 jours à température ambiante et de (b) 3 jours à 60 °C et 25 jours à température ambiante

En conclusion de cette section, la calcination de sédiments pourraient permettre de faciliter leur valorisation dans plusieurs filières et ouvre la voie à des perspectives de valorisation innovantes, notamment avec la création de liants pour les sédiments fins présentant des caractéristiques minéralogiques adaptées.

CONCLUSION DU CHAPITRE

Plusieurs sédiments fins de barrages de diverses origines aux caractéristiques différentes ont été utilisés à la place de matières premières classiques dans quatre applications :

- matière première dans un cru pour la fabrication de clinker,
- addition minérale dans des mortiers,
- matériau routier traité aux liants hydrauliques,
- matière première argileuse pour la fabrication de matériau céramique.

Les sédiments ont été employés seuls ou comme composant dans des mélanges avec d'autres matériaux couramment utilisés.

Dans les crus de cimenteries, les sédiments ont permis d'apporter la quantité d'argiles voire de calcaire nécessaire sous forme de mélanges binaire (calcaire/sédiment) ou ternaire (calcaire/sédiment/bauxite). Les taux d'incorporation ont varié d'environ 20 à 30 % de sédiments secs selon le type de mélange et de sédiment. Le sédiment RHI a été le sédiment au taux d'incorporation le plus important du fait de sa teneur élevée en carbonates. Il est aussi le sédiment qui a nécessité un fort ajout de matière correctrice du fait de sa teneur en silice élevée comparée à sa teneur en oxyde de fer et d'aluminium (module silicique élevé). Les caractéristiques chimiques et minéralogiques des clinkers obtenus sont tout à fait encourageantes. Les sédiments utilisés dans les crus en laboratoire présentent des caractéristiques de cuisson adaptées à leur intégration aux compositions de crus de cimenterie. C'est principalement la composition en éléments chimiques majeurs qui permet d'apprécier le potentiel d'utilisation dans cette application.

Dans des mortiers, les sédiments ont été utilisés comme addition minérale avec deux taux de substitution de ciment : 10 et 25 %. Ces taux de substitution ont été retenus afin de permettre une comparaison avec les indices d'activité de certaines additions actives et inertes couramment employées dans les bétons. Les demandes en eau des mortiers sont relativement élevées et seraient à mettre en relation plus avec la nature argileuse des sédiments que leur finesse. La présence de matière organique pourrait être à l'origine d'un retard de prise pour les sédiments GAR et RHI. Les résistances mécaniques obtenues sur des mortiers substitués sont proches d'un sédiment à l'autre bien que légèrement supérieures pour le sédiment ISE. Il apparaît que les sédiments fins de barrages étudiés ne permettent pas d'obtenir des performances équivalentes à celles des additions normalisées de type calcaire ou siliceuse. En effet, les indices d'activité à 28 jours et pour 25 % de substitution de ciment vont de 0,53 (GAR) à 0,61 (ISE) et sont inférieurs aux exigences imposées aux additions normalisées. A ce stade et sans atout particulier pour cet usage, leur incorporation dans certains mortiers est envisageable.

Pour le réemploi des sédiments de barrages traités en matériau routier ou assimilé, l'étude visait à évaluer les performances mécaniques des sédiments après une stabilisation aux liants classiques. Deux formulations sont testées : l'une avec un dosage de 3% de chaux et 3% de ciment et la seconde un dosage de 6% de ciment. La formulation avec 6 % de ciment, est plus efficace pour l'ensemble des sédiments au regard des résistances mécaniques et ce, pour les deux modes de conservation (cure à l'air et immersion). En effet, le critère de traficabilité (valeur seuil de 1 MPa) et le critère d'insensibilité à l'eau sont satisfaits. Cette formulation est préconisée dans le cas des sédiments de barrages étudiés. Les résultats obtenus sont encourageants pour envisager des valorisations matières des sédiments de barrages dans des applications géotechniques telles que des couches de forme, pistes cyclables, voies piétonnes, etc. Des études complémentaires restent nécessaires avant d'effectuer une application pratique.

Les sédiments ont permis de fabriquer des pièces céramiques. Les produits à base de sédiment ISE présente des caractéristiques appropriées sans modification de la composition. Le sédiment RHI nécessite un ajout de matériau plastique (argile riche en kaolinite) afin d'avoir une plasticité acceptable pour être mis en forme. De plus, l'ajout d'argile RR40 améliore les propriétés des pièces cuites à base de sédiment RHI mises en forme par extrusion. Les travaux menés confirment qu'une

utilisation dans cette filière est envisageable. Les résultats de ces études de faisabilité sont prometteurs car les sédiments fins de retenues hydroélectriques ont été utilisés directement, comme composant principal des pâtes ou composant unique.

Les résultats obtenus et les comportements observés lors des mises en œuvre dans les filières, sont à corréler avec les conclusions émises sur la caractérisation des sédiments fins de barrages (chapitre 3). Il y a une assez bonne concordance avec les interprétations relatives aux caractéristiques des sédiments.

Chapitre 5

VERS UN OUTIL DECISIONNEL DE PRE-ORIENTATION

SOMMAIRE DU CHAPITRE

Introduction	224
1. Adéquation technique	225
1.1. Cadre méthodologique d'évaluation du potentiel des sédiments fins à être valorisés	225
1.2. Application aux sédiments fins de barrage étudiés	236
1.3. Limites et perspectives.....	243
1.4. Proposition d'une caractérisation permettant d'accéder au jeu de données minimum.....	244
2. Adéquation spatiale	245
2.1. Méthodologie.....	245
2.1. Résultats des analyses SIG	246
Conclusion du chapitre	248

INTRODUCTION

La complexité de la problématique « gestion durable à terre des sédiments » s'explique par le fait que plusieurs aspects doivent être considérés, à savoir réglementaires, scientifiques (caractérisation, valorisation), techniques (mise en œuvre dans les filières), socio-économiques (coût des opérations, acceptabilité des produits à base de sédiments). Une solution aboutie en dépendra.

Des solutions partielles ont été ébauchées. Nous pouvons citer bon nombre de travaux de recherche qui portent pour la plupart sur des sédiments contaminés. Ils s'appuient sur des méthodes d'analyses multicritères ; les critères retenus sont le plus souvent environnementaux, parfois économiques et/ou sociétaux [Alvarez-Guerra *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2010; Driscoll *et al.*, 2002; Linkov *et al.*, 2005, 2007; Sparrevik *et al.*, 2011a et 2011b ; Lemièrre *et al.*, 2012, 2013; SMOCS, 2013; Oen *et al.*, 2010; Cura *et al.*, 2004; Bridges *et al.*, 2006; Hong *et al.*, 2010; Scheffler *et al.*, 2014; Kiker *et al.*, 2007]. D'autres aspects relatifs aux filières de valorisation, notamment techniques, doivent encore être mis davantage en avant.

Ce chapitre a pour objectif de mettre en place les bases d'un outil de pré-orientation des sédiments fins vers les filières de valorisation les plus adaptées. L'approche présentée dans ce chapitre porte d'abord sur la définition de critères techniques permettant de présélectionner les filières de valorisation les plus adaptées à partir des caractéristiques des sédiments fins. Cette approche dite *technique* est ensuite complétée par une approche *spatiale* afin de prendre en compte un critère de proximité à l'échelle du territoire. Coupler ces deux approches permet de cerner les filières de valorisation potentielles (figure 5-1)

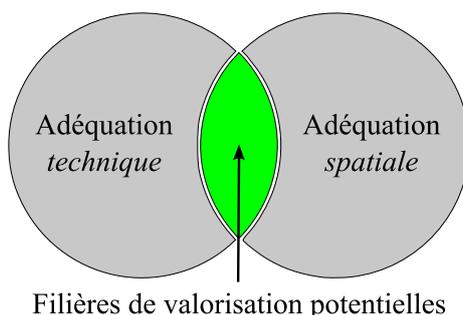


Figure 5-1. Combinaison d'aspects à retenir pour une valorisation de sédiments fins

Pour apprécier l'adéquation *technique* entre les caractéristiques des sédiments et les filières de valorisation, un outil d'évaluation a été mis au point. Sa finalité est d'aider à la décision pour orienter les sédiments fins vers les filières de valorisation adaptées à leurs caractéristiques.

Un cadre méthodologique a été établi pour élaborer cet outil d'évaluation pour l'adéquation technique. La démarche s'articule en trois étapes : (i) identification de critères indicateurs, (ii) interprétation des critères selon les filières et (iii) obtention des indices d'adéquation. Ces indices d'adéquation permettent finalement d'identifier, à l'aide de notes, le potentiel technique d'utilisation des sédiments dans les filières de valorisation.

1. ADEQUATION TECHNIQUE

Il s'agit de concevoir un outil d'évaluation de l'adéquation technique entre les caractéristiques des sédiments et les spécifications des filières de valorisation. Il aide à pré-orienter les sédiments fins vers les voies de valorisation adaptées. Le cadre méthodologique est expliqué, l'outil est présenté. Puis la démarche ainsi élaborée est alors appliquée aux sédiments fins de barrage étudiés. A ce stade, les limites de l'outil sont exposées et des perspectives de développement proposées. Dans le même temps une caractérisation *minimale* relative aux sédiments fins est établie afin de disposer d'un jeu de données suffisant pour utiliser l'outil de pré-orientation.

1.1. CADRE METHODOLOGIQUE D'EVALUATION DU POTENTIEL DES SEDIMENTS FINS A ETRE VALORISES

Un cadre méthodologique est développé afin de déterminer l'adéquation *technique* entre les filières de valorisation et les caractéristiques des sédiments fins.

L'approche méthodologique retenue requiert trois étapes pour aboutir aux indices d'adéquation (IA) permettant d'apprécier le potentiel de valorisation des sédiments selon leurs caractéristiques. La démarche mise en œuvre ici, s'appuie sur certains principes développés dans l'approche d'Andrews *et al.*, [2004]. Cette approche avait pour but d'élaborer un indicateur pour l'évaluation de la qualité des sols.

Le cadre conceptuel de l'approche est présenté sur la figure 5-2 avec les trois étapes considérées ; elles concernent l' :

- 1) Identification/sélection des paramètres pertinents pour les filières pressenties (critères indicateurs) ;
- 2) Interprétation des critères selon les différentes filières (traduction par un score) ;
- 3) Intégration/agrégation des scores pondérés pour aboutir aux indices d'adéquation (IA) des filières.

C'est à l'aide de ces indices d'adéquation qu'une identification simple du potentiel technique d'utilisation des sédiments dans les filières de valorisation, sera établie.

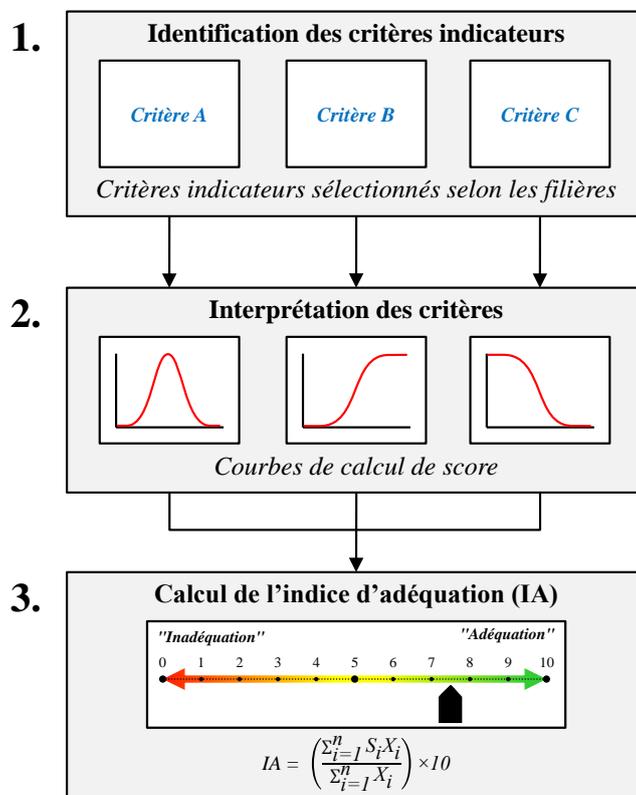


Figure 5-2. Schéma conceptuel de l'approche

1.1.1. Identification des critères indicateurs

Le potentiel de valorisation des sédiments fins de barrage est construit à partir d'un jeu de données minimum et suffisant. Ces dernières sont relatives aux caractéristiques des sédiments, les plus déterminantes quant à l'utilisation dans les filières.

Selon les filières de valorisation étudiées, les spécifications sur les matières premières employées sont évidemment différentes. Par conséquent, les critères indicateurs doivent être adaptés aux spécifications des filières ou permettre de comparer les caractéristiques des sédiments à celles de matières premières relevant de ces filières.

Un nombre restreint de critères indicateurs est retenu pour chaque filière, le plus souvent, trois à quatre. Les critères indicateurs sont soit des paramètres physiques ou chimiques ou minéralogiques issus des analyses et essais de caractérisation des sédiments. Pour être retenus, les critères indicateurs doivent être des paramètres discriminants pour les sédiments. Ils sont en règle générale issus de guides techniques ou de normes et leur intérêt a été mis en avant par les essais en laboratoire ou des recommandations d'experts.

1.1.2. Interprétation des critères

Après avoir déterminé les critères indicateurs (étape 1), l'interprétation (étape 2) implique la conversion des valeurs ou grandeurs de chaque critère en un score à l'aide d'une courbe. Les scores sans unité seront ensuite combinés pour former une seule valeur à l'étape 3, appelée indice d'adéquation (IA).

Les courbes de score sont définies à l'aide de fonctions mathématiques et logiques : *si, alors, sinon*. Les courbes fournissent une relation quantitative entre les valeurs des critères indicateurs et les scores normalisés, reflétant l'adéquation entre les critères et les valeurs désirables pour envisager une valorisation. Chaque critère indicateur est transformé par l'intermédiaire d'une courbe de score en une note sans unité comprise entre 0 et 1, voir figure 5-3. Un score de 1 signifie que le critère est parfaitement dans la gamme de valeur qui est alors optimale et sera donc bénéfique pour le potentiel d'utilisation du sédiment.

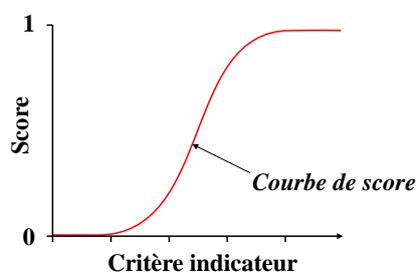


Figure 5-3. Exemple de courbe de score

Cette étape d'interprétation est particulièrement délicate. Elle nécessite de fixer des valeurs clés pour ensuite esquisser la courbe de score. Ces valeurs clés de chaque critère, utilisées pour le calage des courbes, sont obtenues de plusieurs façons. Pour certains critères, elles sont issues de guides techniques ou de normes mais elles nécessitent, dans la plupart des cas, d'être adaptées au cas des sédiments fins.

Pour d'autres critères, elles font référence aux gammes de valeurs rencontrées pour les matières premières traditionnelles utilisées. Cela nécessite de disposer de données à propos de ces matières premières. Dans ce cas, l'écart entre les valeurs des critères pour les sédiments et les intervalles de valeurs rencontrées dans la pratique, est utilisé pour tracer la courbe de score. Une similarité entre caractéristiques des sédiments et celles des matières premières utilisées se traduira par un score élevé. Notons que dans cette étape d'interprétation, des règles issues d'un savoir-faire industriel, fruit d'un

long retour d'expérience sont aussi considérées tout comme des travaux scientifiques ou encore des avis d'experts.

Pour certaines courbes, le type de la fonction et le calage des coefficients est réalisé à l'aide d'un logiciel d'ajustement de courbes (CurveExpert v1.4). Les équations des courbes sont déterminées à partir de valeurs clés auxquelles des scores ont été attribués.

Certains critères indicateurs sont identifiés et utilisés dans plusieurs filières. Les spécifications des filières étant différentes, la courbe de score, et donc l'interprétation sera également différente.

Trois cas généraux sont décrits par les courbes de score : « *plus-est-mieux* », « *moins-est-mieux* » et « *valeurs optimums* ». Pour les deux premiers cas, la forme de la courbe est généralement sigmoïdale, avec une fonction du type $y = \frac{1}{1 + \alpha x^\beta}$ mais peut aussi être basée sur une fonction exponentielle ou linéaire. Pour le dernier cas, « *valeurs optimums* », la courbe prend l'allure d'une gaussienne, le plus souvent asymétrique. Selon les cas, les algorithmes permettant de tracer les courbes de score sont basés sur une ou plusieurs fonctions, linéaires ou non.

1.1.3. Intégration des résultats et calcul de l'indice d'adéquation

Dans cette étape, les valeurs de chaque critère indicateur, transformées en scores (sans unité), sont pondérées pour obtenir un indice final.

En fait, on intègre l'ensemble des scores des critères indicateurs de l'étape d'interprétation précédente (étape 2) en une seule note, sous forme d'un indice pour chaque filière : l'indice d'adéquation (IA).

Cette valeur est considérée comme une évaluation globale de l'adéquation entre les caractéristiques des sédiments et les spécifications d'une filière de valorisation ou bien la similarité avec les caractéristiques des matières premières d'usage. Les indices d'adéquation (IA), associant les différents critères indicateurs, sont plus simples à manier qu'un ensemble de valeurs ou de scores.

Pour obtenir les indices d'adéquation, la technique d'intégration consiste à pondérer les scores des critères indicateurs afin de mettre en avant leur influence et les combiner. Cette opération est réalisée en faisant une moyenne pondérée des scores, puis en multipliant par 10 (Eq. 5-1).

$$\text{Indice d'adéquation (IA)} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n S_i X_i}{\sum_{i=1}^n X_i} \right) \times 10 \quad (\text{Eq. 5-1})$$

avec S_i les scores des critères indicateurs et X_i les coefficients de pondération.

La valeur de l'indice IA a été multipliée par 10 pour fournir des valeurs dans un intervalle allant de 0 à 10 afin de marquer clairement la distinction entre les scores des indicateurs exprimés entre 0 et 1 et les indices d'adéquation.

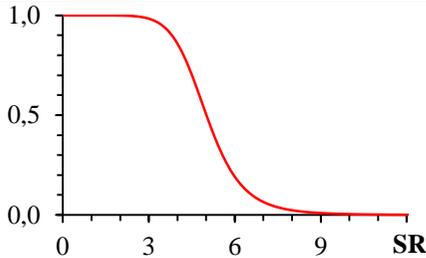
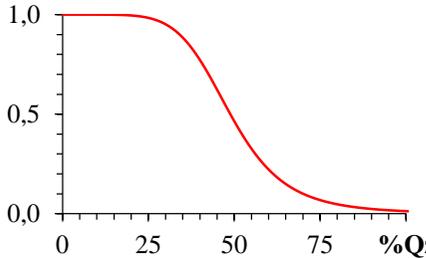
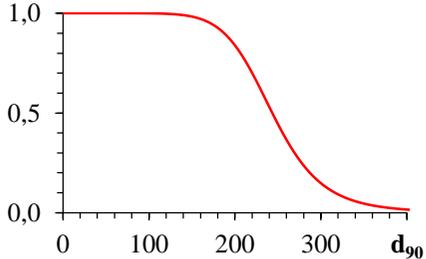
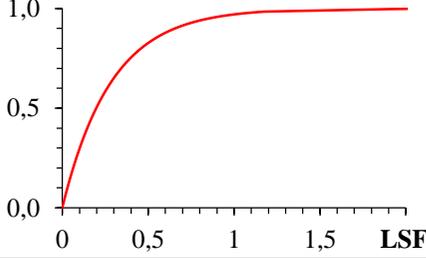
Les coefficients de pondération sont affectés selon le caractère discriminant des critères indicateurs pour les sédiments fins de barrage. Une plage de 1 à 4 a été retenue. Ainsi, les coefficients vont de 1, pour un critère peu impactant à 4 pour les critères affirmant un potentiel élevé de valorisation des sédiments fins de barrage dans la filière. Le poids des critères a été fixé en prenant en compte différents aspects et références. L'attribution de valeurs aux coefficients de pondération est le fruit d'une expertise construite tout au long des présents travaux, en considérant les spécifications des filières de valorisation, les caractéristiques des matières premières d'usage, les classifications définies dans certains domaines, les avis d'experts et le retour d'expériences basé sur des références scientifiques relatives à la valorisation des sédiments et aux analyses menées sur les sédiments de barrage étudiés.

1.1.4. Outil d'évaluation de l'adéquation technique des sédiments fins avec les filières de valorisation

Pour chacune des filières de valorisation, les critères indicateurs (étape 1), les courbes de score (étape 2) et les coefficients de pondération (étape 3) sont présentés sous forme de tableaux récapitulatifs, voir tableau 5-1 au tableau 5-6.

Dans la mise au point de l'outil, un traitement particulier a été fait pour la filière agronomique. Pour les possibilités de « valorisation agronomique », deux voies ont été distinguées : une utilisation pour confectionner des sols reconstitués (anthroposols construits à base de sédiments fins de barrage) et une valorisation agricole (épandage). Pour cette voie de valorisation agricole, l'indice d'adéquation est calculé différemment. En effet, parmi les trois scores retenus, seule la valeur la plus élevée est admise et multipliée par 10 pour obtenir l'indice d'adéquation.

Tableau 5-1. Matière première dans le cru de cimenterie

Critère indicateur	Courbe de score	Algorithme	Coefficient de pondération	Commentaire
Module silicique [SR]		$y=1/(1+2,5 \cdot 10^{-6} \cdot [SR]^8)$	3	« Moins-est-mieux » Pour un cru de cimenterie, SR est généralement compris entre 2 et 3. L'ajout de sédiments fins peut contribuer à apporter de l'alumine et du fer (substitution de l'argile) mais il est souhaitable qu'ils n'apportent pas trop de silice.
Teneur en quartz (en %) [Qz]		$y=1/(1+5 \cdot 10^{-11} \cdot [\%Qz]^{6,1})$	2	« Moins-est-mieux » La silice nécessaire à la préparation du cru est principalement apportée par les minéraux argileux et le quartz. En trop grande quantité, le quartz peut déséquilibrer la composition chimique avec l'apport de beaucoup de silice. Il est donc préférable d'éviter le quartz en quantité importante.
Seuil du 9 ^e décile de la distribution granulométrique [d ₉₀]		$y=1/(1+9 \cdot 10^{-21} \cdot [d_{90}]^{8,4})$	1	« Moins-est-mieux » Il faut en particulier éviter d'avoir des grains quartzeux supérieurs à 200 µm.
Indice de saturation en chaux [LSF]		$y=1-\exp(-3,5 \cdot [LSF])$	1	« Moins-est-mieux » Pour un cru de cimenterie, LSF est généralement compris entre 0,92 – 0,98. Dans le cas des sédiments, si le LSF est élevé, il sera théoriquement plus facile d'ajouter des sédiments dans le cru en quantité importante.

Nota : $SR = SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3)$; $LSF = CaO / (2,8 \cdot SiO_2 + 1,2 \cdot Al_2O_3 + 0,65 \cdot Fe_2O_3)$

Tableau 5-2. Addition minérale pour les bétons et mortiers (filler)

Critère indicateur	Courbe de score	Algorithme	Coefficient de pondération	Commentaire
Teneur en matière organique (en %) [MO]		$y=1/(1+8.10^{-2} * [\%MO]^{2,2})$	4	« Moins-est-mieux » La matière organique vient perturber la prise hydraulique et affecter fortement les propriétés des bétons et mortiers si elle est en quantité significative.
Diamètre médian (en μm) [d₅₀]		$y=1/(1+2,5.10^{-6} * [\%d_{50}]^4)$	3	« Moins-est-mieux » Dans le cas des additions minérales, la finesse est recherchée. Il est souhaitable que le passant à 125 μm soit supérieur à 85 % et que le passant à 63 μm soit supérieur à 70 %. La courbe considère ces critères.
Valeur au bleu (en g/100g) [VB]		$y=1/(1+0,3 * [VB]^4)$	2	« Moins-est-mieux » Il est souhaité que la valeur au bleu soit inférieure à 1,2 g/100g de sédiment.
Teneur en phyllosilicates (en %) [%phyllo]		$y=1/(1+1.10^{-3} * [\%phyllo]^3)$	2	« Moins-est-mieux » Les phyllosilicates (principalement des minéraux argileux) peuvent avoir des effets néfastes dans les mortiers et bétons. Il est recommandé qu'ils soient en quantité restreinte.

Tableau 5-3. Matériaux routiers et assimilés

Critère indicateur	Courbe de score	Algorithme	Coefficient de pondération	Commentaire
Teneur en matière organique (en %) [MO]		$y=1/(1+1.10^{-4}*[MO]^{4,7})$	3	« Moins-est-mieux » Idéalement, la teneur en MO doit être inférieure à 3 %. Entre 5 à 7 %, l'influence de la matière organique devient importante. Au-delà de 10-15 %, la teneur en MO rend difficile toute valorisation.
Diamètre médian (en µm) [d₅₀]		SI $d_{50} < 160$, ALORS $y = [d_{50}]/160$, SINON $y = 1$	2	« Plus-est-mieux » Pour des applications géotechniques comme les couches routières voire remblais, un squelette granulaire est souhaitable.
Indice de plasticité [I_p]		$y=1/(1+2.10^{-8} * [I_p]^5)$	1	« Moins-est-mieux » Une argilosité prononcée est néfaste pour les travaux de terrassement.

Tableau 5-4. Matière première pour l'industrie céramique (terre cuite)

Critère indicateur	Courbe de score	Algorithme	Coefficient de pondération	Commentaire
Diamètre médian (en μm) [d_{50}]		SI $d_{50} < 4$, ALORS $y = 1 / (1 + 1 * [d_{50}]^{-7})$ SINON $y = 1 / (1 + 7.10^{-12} * [d_{50}]^7)$	3	« Moins-est-mieux » / « Valeurs optimums » Les pâtes argileuses utilisées pour la fabrication de terre cuite ont un d_{50} généralement compris entre 2 et 20 μm . Plus les sédiments sont fins, plus ils sont susceptibles de présenter des propriétés favorisant leur utilisation.
Teneur en phyllosilicates (en %) [%phyllo]		$y = 1 / (1 + 9.10^{10} * [\% \text{phyllo}]^{-8,2})$	4	« Plus-est-mieux » Les phyllosilicates procurent de la plasticité aux pâtes argileuses.
Somme d'oxydes (en %) [$R_2O + RO + Fe_2O_3$]		SI $[R_2O + RO + Fe_2O_3] < 12$, ALORS $y = 1 / (1 + 1.10^{16} * [R_2O + RO + Fe_2O_3]^{-19})$ SINON $y = 1 / (1 + 1.10^{17} * [R_2O + RO + Fe_2O_3]^{12,1})$	2	« Valeurs optimums » Elles sont comprises entre 7 et 20 %. Ces éléments ont des effets importants sur le comportement lors de la cuisson et sur les caractéristiques des produits cuits (couleur, porosité, ...).
Rapport silice sur alumine [Al_2O_3/SiO_2]		SI $([Al_2O_3/SiO_2] \geq 0,05$ ET $< 0,15)$ ALORS $y = 10^{-5}$ $[Al_2O_3/SiO_2] - 0,5$ SINON SI $([Al_2O_3/SiO_2] \geq 0,015$ ET $\leq 0,3)$ ALORS $y = 1$ SINON SI $([Al_2O_3/SiO_2] > 0,3$ ET $< 0,7)$ ALORS $y = -2,5 * [Al_2O_3/SiO_2] + 1,75$ SINON $y = 0$	1	« Valeurs optimums » Il s'agit de deux oxydes les plus présents dans les argiles et les mélanges argileux.

Nota : $R_2O = K_2O + Na_2O$ et $RO = CaO + MgO + MnO$

Tableau 5-4 (suite). Matière première pour l'industrie céramique (terre cuite)

Critère indicateur	Courbe de score	Algorithme	Coefficient de pondération	Commentaire
Limite de plasticité [w _p]		SI [w _p] < 20, ALORS $y = 1 / (1 + 1.10^{17} * [w_p]^{-16})$ SINON $y = 1 / (1 + 3.10^{-10} * [w_p]^{5,8})$	2	« Valeurs optimums » / « Moins-est-mieux » Une limite de plasticité élevée augmente le retrait.
Indice de plasticité [I _p]		SI [I _p] < 20, ALORS $y = 1 / (1 + 3,5.10^9 * [I_p]^{-10})$ SINON $y = 1 / (1 + 2.10^{-12} * [I_p]^{6,8})$	2	« Valeurs optimums » Une plasticité adaptée est recherchée afin d'obtenir des propriétés de mise en forme optimales. Pour les mélanges argileux si un I _p est trop faible, la cohésion sera peu élevée, et, un I _p trop élevé conduit à une consistance « trop collante ».
Teneur en matière organique (en %) [MO]		$y = 1 / (1 + 0,01 * [MO]^{2,5})$	3	« Moins-est-mieux » Bien qu'une petite quantité de matière organique soit profitable dans les pâtes crues (amélioration de la plasticité, effet porosant), une teneur élevée n'est pas admise : elle favorise le « cœur noir » et augmente la demande en eau.

Tableau 5-5. Valorisation agronomique – Utilisation pour confectionner des sols reconstitués

Critère indicateur	Courbe de score	Algorithme	Coefficient de pondération	Commentaire
Conductivité électrique (en mS/cm) [CE]		SI [CE] <1 ALORS y=1 SINON SI ([CE] ≥1 ET <2) ALORS y= -[CE]+2 SINON y=0	3	« Moins-est-mieux » Une conductivité électrique très élevée peut être toxique pour les plantes. Il est souhaité que la CE soit inférieure à 1 mS/cm. Une valeur de CE supérieure à 2 mS/cm peut rendre inutilisable les sédiments pour cette voie de valorisation.
pH [pH]		SI ([pH] ≥5,5 ET <6,5) ALORS y=[pH]-5,5 SINON SI ([pH] ≥6,5 ET <7,1) ALORS y=1 SINON SI ([pH] ≥7,1 ET <9) ALORS y= -0,5263*[pH] +4,7368 SINON y=0	2	« Valeurs optimums » Le pH optimum du sol pour les plantes se situe entre 6,5 et 7,1 (bonne assimilabilité des nutriments et favorable à l'activité microbienne). Des valeurs en dessous de 5,5 et au-dessus de 9 sont inadaptées.
Rapport carbone organique / azote total [C/N]		SI ([C/N] ≥4 ET <8) ALORS y=0,25*[C/N]-1 SINON SI ([C/N] ≥8 ET <12) ALORS y=1 SINON SI ([C/N] ≥12 ET <16) ALORS y=-0,25*[C/N] +4 SINON y=0	1	« Valeurs optimums » Le rapport C/N renseigne sur la vitesse de minéralisation de la MO. Pour un rapport C/N en dessous de 8, la décomposition de la matière organique est trop rapide. Au-dessus de 12, l'activité biologique réduite amène une décomposition lente de la matière organique.
Teneur en matière organique (en %) [MO]		y=1-exp (-0,24*[MO])	1	« Plus-est-mieux » La MO a des rôles multiples : physique (rôle structurant avec un assemblage des particules et agrégats, capacité de rétention en eau), chimique et biologique.

Tableau 5-6. Valorisation agronomique – Utilisation agricole

Critère indicateur	Courbe de score	Algorithme	Coef. de pondération	Commentaire
Somme des teneurs en oxydes de calcium et de magnésium (en %) [CaO+MgO]		SI [CaO+MgO] <18,75 ALORS $y = [\text{CaO}+\text{MgO}]/18,75$ SINON $y=1$	(*)	« Plus-est-mieux » Les amendements basiques doivent au minimum avoir une somme CaO+MgO supérieure à 15 % de la matière brute. Pour que ce critère soit atteint pour des sédiments ayant une siccité de 80 %, il faut que la somme CaO+MgO soit supérieure à 18,75 % de la matière sèche.
Teneur en matière organique (en %) [MO]		SI [MO] <25 ALORS $y =$ $[\text{MO}]/25$ SINON $y=1$	(*)	« Plus-est-mieux » Les amendements organiques basiques doivent au minimum avoir une MO supérieure à 20 % de la matière brute. Pour que ce critère soit atteint pour des sédiments de siccité 80 %, il faut que la MO soit supérieure à 25 % de la matière sèche.
Teneur maximum parmi Ntotal, P ₂ O ₅ total, K ₂ Ototal (en %) [max(NPK)]		SI [max(NPK)] <3 ALORS $y =$ $[\text{max}(\text{NPK})]/3$ SINON $y=1$	(*)	« Plus-est-mieux » Les engrais doivent avoir un élément nutritif majeur (N, P ₂ O ₅ , K ₂ O) supérieur à 3 %.

(*) L'indice d'adéquation est calculé en utilisant le meilleur score parmi les trois critères retenus pour cette application.

Nota : Chaque critère est caractéristique d'un type de matière fertilisante, à savoir soit d'un amendement basique (CaO+MgO), soit d'un amendement organique (%MO) soit d'un engrais (maximum entre N, P₂O₅, K₂O). L'indice d'adéquation est donc déterminé en tenant compte du type de matière fertilisante dont les caractéristiques des sédiments se rapprochent le plus.

1.1.5. Cas de la teneur en eau

Un paramètre particulièrement important n'est pas pris en compte dans l'outil proposé. Il s'agit de la teneur en eau des sédiments fins. Comme rappelé dans les chapitres précédents, ce paramètre joue un rôle majeur pour toute une valorisation envisagée. Il impacte principalement deux aspects des opérations de valorisation des sédiments : le coût du transport et la mise en œuvre dans la filière.

De manière générale, tous les sédiments issus d'opérations de dragage ont une teneur en eau élevée voire fortement élevée. Ce paramètre n'est donc pas discriminant entre les sédiments. C'est pour cette raison qu'il n'est pas introduit comme critère indicateur dans la pré-orientation des sédiments.

Néanmoins, ce paramètre est incontournable et doit impérativement être pris en compte pour toutes les filières de valorisation. Le tableau 5-7 indique des gammes de teneurs en eau possibles pour mettre en œuvre les cinq filières étudiées.

Nous savons que différentes techniques de prétraitement permettent d'abaisser la teneur en eau des sédiments. Le coût et la durée de toute opération de déshydratation sont dépendants du procédé utilisé, des caractéristiques des sédiments, de la disponibilité et de l'emprise foncière...

Tableau 5-7. Gammes de teneurs en eau des sédiments pour la mise en œuvre dans les filières

<i>Filière considérée</i>	<i>Taux d'humidité souhaitable*</i>	<i>Commentaire</i>
<i>Matière première en cru de cimenterie</i>	<i>Matériau pelletable Si possible < 30 %</i>	<i>Le plus sec possible</i>
<i>Addition minérale pour bétons et mortiers</i>	<i>Si possible < 5 %</i>	<i>Le plus sec possible. Les installations sont prévues pour des matériaux secs</i>
<i>Matériau routier et assimilé</i>	<i>15 à 40 %</i>	<i>Selon l'optimum Proctor des mélanges</i>
<i>Matière première pour la fabrication de céramiques</i>	<i>Pressage : 2 à 8 % Extrusion : 15 à 25 % Coulage : 25 à 35 %</i>	<i>La quantité d'eau nécessaire varie selon le procédé de mise en forme</i>
<i>Valorisations agronomiques</i>	<i>Matériau de préférence pelletable</i>	<i>Différents moyens d'épandage peuvent être employés selon la teneur en eau. Des matériaux secs permettent un gain de temps, et d'énergie</i>

*Taux d'humidité : rapport du poids d'eau au poids total (m_{eau}/m_{totale})

1.2. APPLICATION AUX SEDIMENTS FINS DE BARRAGE ETUDIÉS

A présent défini, l'outil a été mis en pratique en considérant les caractéristiques des sédiments fins de barrage étudiés. Pour ce faire, les algorithmes qui décrivent les relations entre les critères indicateurs et les scores sont entrés dans une feuille de calcul de type « excel ». Les caractéristiques des sédiments déterminées lors de la phase de caractérisation, fournissent les données d'entrée. En sortie, les scores de tous les critères indicateurs des différentes filières ainsi que les indices d'adéquation sont évalués. Cette section présente et discute des résultats obtenus avec les sédiments fins de barrage étudiés.

Les cinq sédiments étudiés n'ont pas tous été caractérisés de manière complète et identique. Le sédiment DUR n'a pas fait l'objet d'analyses permettant de connaître sa composition minéralogique et sa composition chimique en éléments chimiques majeurs. Or, certains critères indicateurs sont basés sur ces paramètres. Par conséquent, il n'a pas été possible d'obtenir tous les indices d'adéquation pour ce sédiment.

1.2.1. Valorisation comme matière première en cru de cimenterie

Les scores des critères indicateurs pour les sédiments étudiés et les indices d'adéquation pour une valorisation en cru de cimenterie sont respectivement donnés sur la figure 5-4 et la figure 5-5.

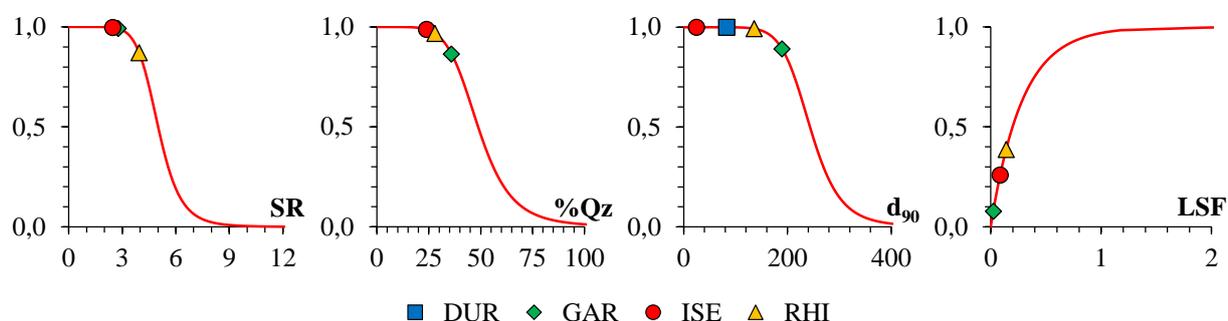


Figure 5-4. Scores des critères indicateurs des sédiments étudiés pour une valorisation comme matière première en cru de cimenterie

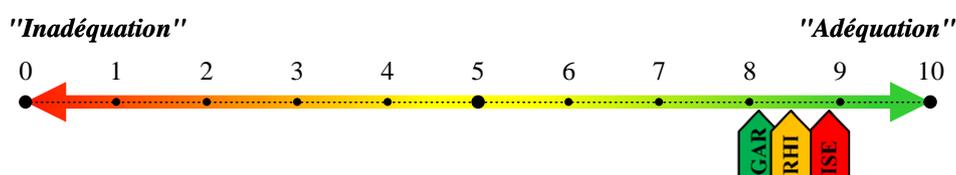


Figure 5-5. Indices d'adéquation des sédiments étudiés pour une valorisation en cru de cimenterie

Les trois sédiments aux caractéristiques complètes présentent des indices d'adéquation élevés (8,10 à 8,88), traduisant leur fort potentiel pour être utilisés comme matière première en cru de cimenterie. Un écart faible de 0,78 est observé pour ces sédiments. Le sédiment GAR a l'indice le plus faible qui s'explique par la quantité de quartz trop importante et une teneur en carbonates faible ayant pour conséquence d'attribuer un faible score pour le critère LSF. L'indice IA du sédiment ISE est le plus élevé démontrant une bonne similarité de ses caractéristiques avec celles des matières premières utilisées dans cette filière. On constate que le sédiment RHI possède le score le plus élevé pour le critère LSF, c'est aussi le sédiment le plus carbonaté. Mais toujours pour ce sédiment le score relatif au critère SR le pénalise. D'un point de vue minéralogique, cela se justifie par le fait que la quantité de quartz est proportionnellement trop importante par rapport aux minéraux argileux.

1.2.2. Valorisation comme addition minérale pour les bétons et mortiers

Les scores des critères indicateurs pour les sédiments étudiés et les indices d'adéquation pour une valorisation comme addition minérale pour les bétons et mortiers sont respectivement donnés sur la figure 5-6 et la figure 5-7.

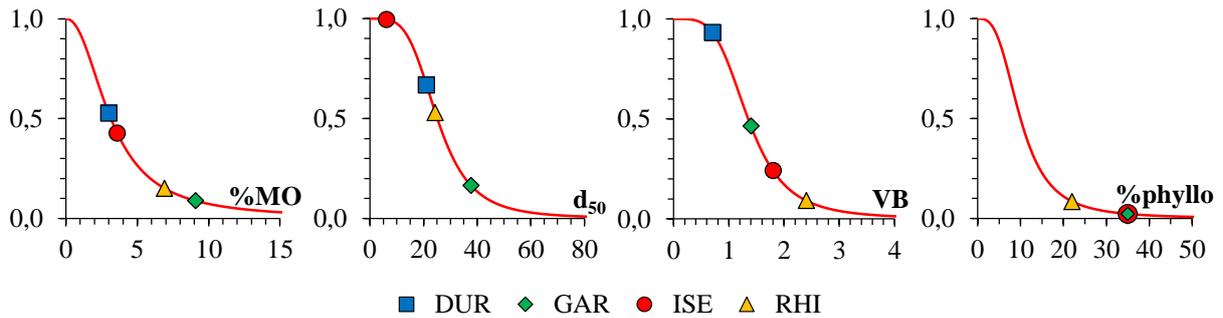


Figure 5-6. Scores des critères indicateurs des sédiments étudiés pour une valorisation comme addition minérale pour les bétons et mortiers

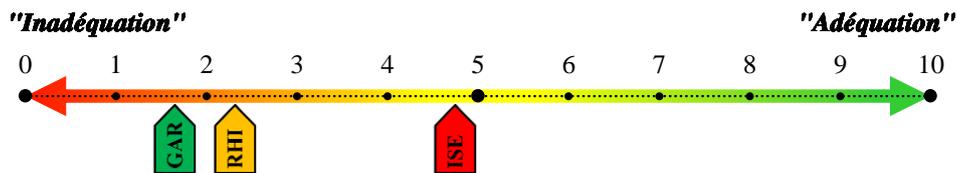


Figure 5-7. Indices d'adéquation des sédiments pour une valorisation dans les mortiers et bétons comme addition minérale (filler)

On note que le potentiel d'utilisation des sédiments fins étudiés comme addition minérale pour les bétons et mortiers paraît assez faible. Les deux sédiments contenant le plus de matières organiques, référencés GAR et RHI, fournissent les indices les plus faibles, respectivement 1,66 et 2,32. Le sédiment ISE a un potentiel d'utilisation plus élevé (IA=4,75), valeur approchant la moyenne, mais semble limité à cause de la présence de minéraux argileux en quantité significative. Enfin, bien qu'il ne soit pas possible de calculer l'indice d'adéquation du sédiment DUR, on peut penser, au regard des autres critères, qu'il aurait un potentiel supérieur aux autres sédiments étudiés. En effet, il contient peu de matières organiques et sa valeur au bleu est faible.

1.2.1. Valorisation comme matériau routier et assimilé

Les scores des critères indicateurs pour tous les sédiments étudiés et les indices d'adéquation pour une valorisation comme matériau routier et assimilé sont respectivement donnés sur la figure 5-8 et la figure 5-9.

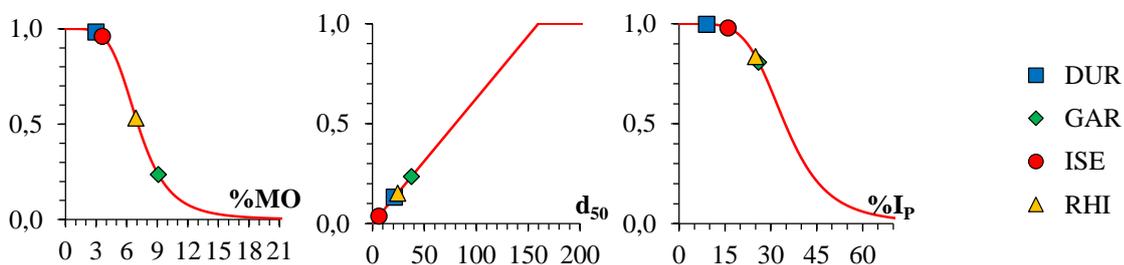


Figure 5-8. Scores des critères indicateurs des sédiments étudiés pour une valorisation comme matériau routier et assimilé

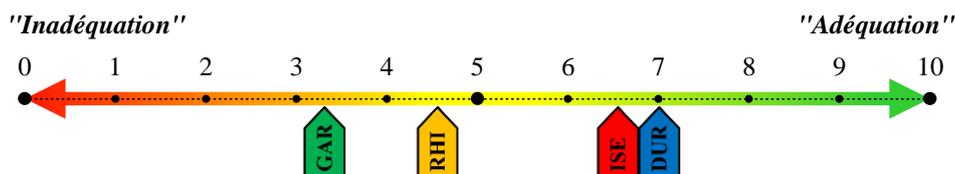


Figure 5-9. Indices d'adéquation des sédiments étudiés pour une valorisation comme matériau routier et assimilé

Les indices d'adéquation des sédiments étudiés évoluent de 3,32 à 7,02 pour cette filière de valorisation. Pour les quatre sédiments fins étudiés, il convient de rappeler et de constater que leur principale faiblesse est naturellement leur finesse. Pour une utilisation en matériau routier, il serait préférable qu'un squelette granulaire soit davantage présent. Le critère qui va différencier significativement les sédiments étudiés est la teneur en matières organiques. En effet, les sédiments GAR et RHI se distinguent des sédiments ISE et DUR avec ce critère. Par conséquent, il sera théoriquement plus facile d'utiliser les sédiments ISE et DUR.

Dans la pratique pour les applications visées dans cette filière, les sédiments fins doivent subir un traitement, classiquement à base de liants hydrauliques. Il est aussi envisageable d'ajouter un correcteur granulométrique afin de compenser leur principale faiblesse liée à leur finesse.

1.2.2. Valorisation comme matière première pour la fabrication de produits céramiques

Les scores des critères indicateurs pour les sédiments fins étudiés et les indices d'adéquation pour une valorisation comme matière première pour la fabrication de produits céramiques sont respectivement donnés sur la figure 5-10 et figure 5-11.

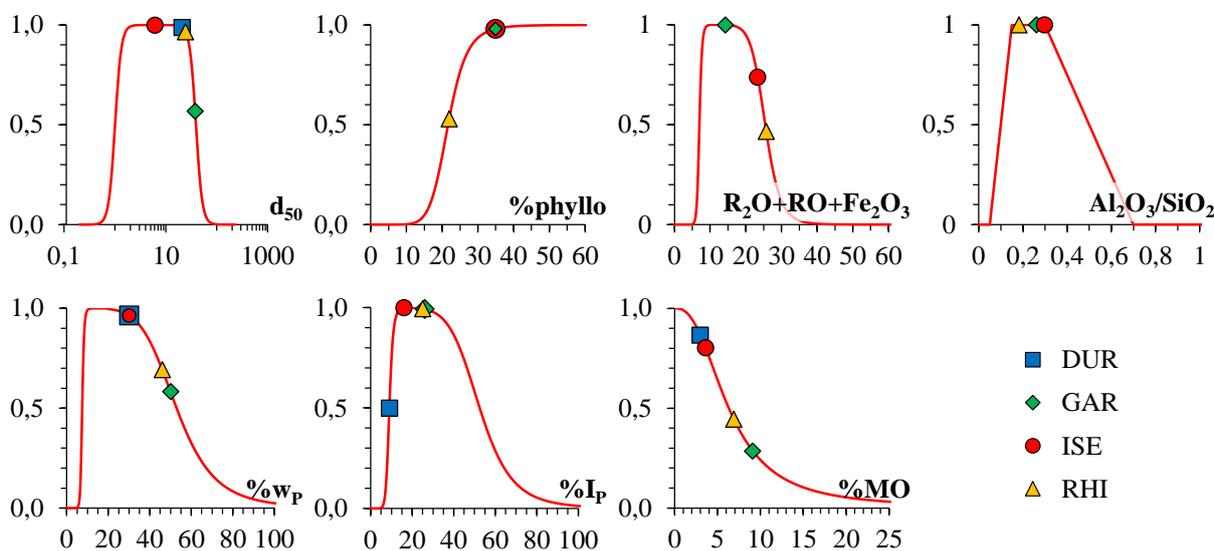


Figure 5-10. Scores des critères indicateurs des sédiments étudiés pour une valorisation comme matière première pour la fabrication de produits céramiques

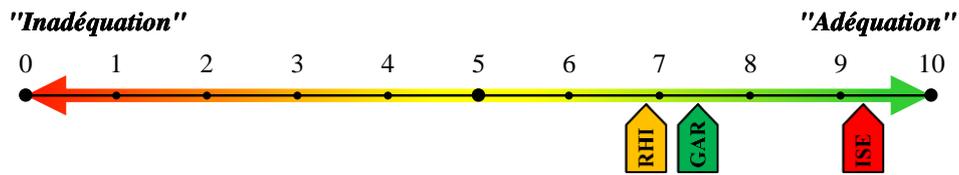


Figure 5-11. Indices d'adéquation des sédiments étudiés pour une valorisation comme matière première pour la fabrication de produits céramiques

La similarité observée entre les caractéristiques des sédiments fins de barrage étudiés et les matières premières utilisées en terre cuite fait que les indices d'adéquation sont relativement élevés. Le sédiment RHI a l'indice le plus faible (AI=6,86) qui s'explique par sa teneur en minéraux argileux et sa teneur en matières organiques. Quant au sédiment GAR, c'est la taille un peu trop élevée des particules et sa teneur en matières organiques qui affectent le potentiel d'utilisation de ce sédiment. Enfin, le sédiment ISE présente des caractéristiques intéressantes et particulièrement proches de celles relatives aux matières premières employées pour la fabrication de produits en terre cuite. Pour ce sédiment l'indice d'adéquation est le plus élevé (AI=9,26).

1.2.3. Valorisations agronomiques

Pour les valorisations agronomiques, il est impératif de prendre en compte la teneur en ETM. Des limites sont fixées dans les normes et la réglementation. Ces teneurs limites ont été énoncées dans le chapitre 2 dans le **tableau 2-51** et le **tableau 2-52**.

► Utilisation en reconstruction de sol

Les scores des critères indicateurs pour les sédiments fins étudiés et les indices d'adéquation pour une valorisation agronomique en reconstruction de sol sont respectivement donnés sur la figure 5-12 et la figure 5-13.

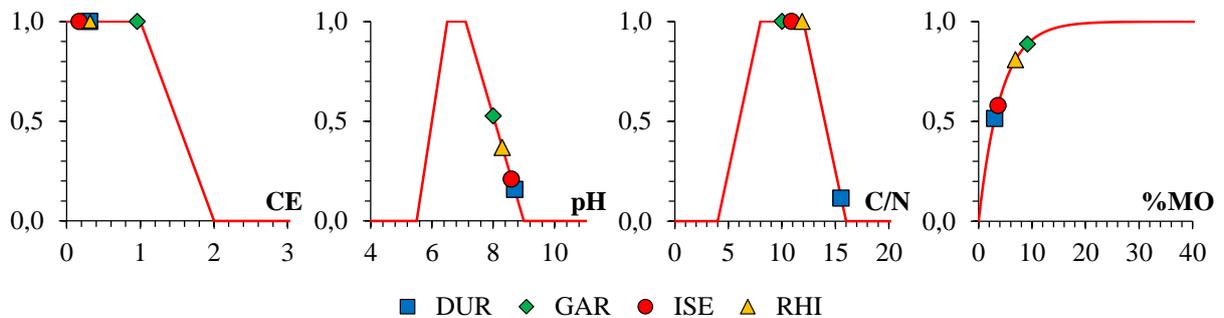


Figure 5-12. Indices d'adéquation des sédiments étudiés pour une valorisation agronomique en reconstruction de sol

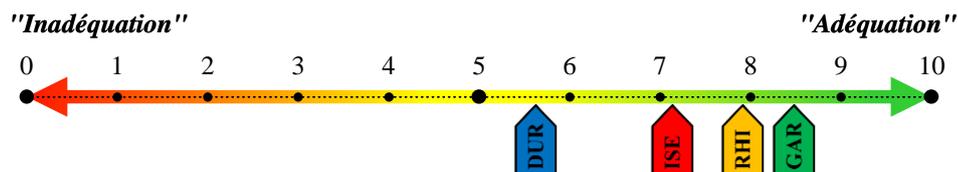


Figure 5-13. Indices d'adéquation des sédiments étudiés pour une valorisation en reconstruction de sol

Les indices d'adéquation pour cette application varient de 5,63 à 8,49 pour les sédiments fins de barrage étudiés. Le sédiment DUR présente l'indice le plus faible, valeur légèrement au-dessus de la

moyenne. Elle est justifiée par sa faible teneur en matières organiques, un pH trop basique et une teneur en carbone organique trop importante par rapport à la teneur en azote. La meilleure adéquation prévaut pour le sédiment GAR. Ce sédiment a l'indice le plus élevé grâce à une forte teneur en matières organiques et un pH plus neutre que les autres sédiments étudiés.

Notons par ailleurs que la conductivité électrique est inférieure à 1 mS/cm, et donc acceptable, pour tous les sédiments fins étudiés. Ce paramètre est particulièrement important dans l'application visée et mérite une attention particulière. Une conductivité trop élevée serait toxique pour les plantes ce qui aurait pour conséquence de rendre inutilisable les sédiments.

Un autre paramètre, qui n'a pas été introduit sous forme de critère, mais qui devra impérativement être pris en considération est l'absence d'adventices. Leur présence pourrait aussi rendre les sédiments inaptes.

► Utilisation en épandage agricole

Les scores des critères indicateurs pour les sédiments fins étudiés et les indices d'adéquation pour une valorisation agronomique en épandage agricole sont respectivement donnés sur la figure 5-14 et la figure 5-15.

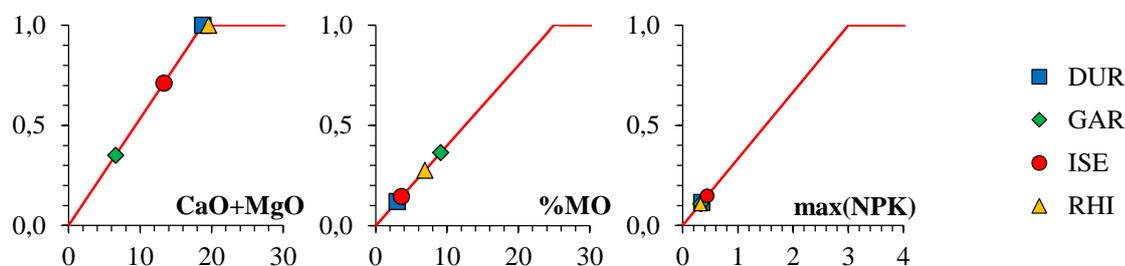


Figure 5-14. Indices d'adéquation des sédiments étudiés pour une valorisation agronomique en épandage agricole

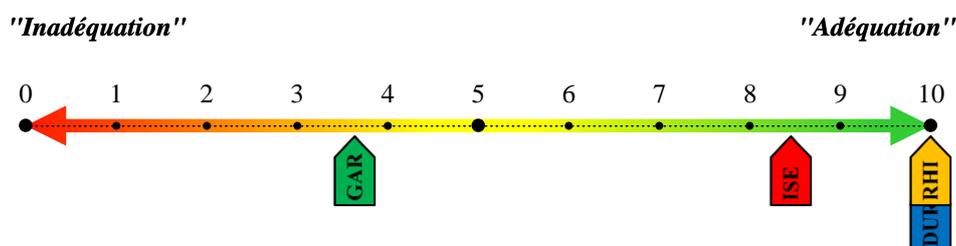


Figure 5-15. Indices d'adéquation des sédiments étudiés pour une valorisation agricole (épandage)

Concernant cette dernière utilisation, l'indice d'adéquation est calculé en utilisant le meilleur score parmi les trois critères retenus. Chaque critère est caractéristique d'un type de matière fertilisante, à savoir soit d'un amendement basique (CaO+MgO), soit d'un amendement organique (%MO) soit d'un engrais (maximum entre N, P₂O₅, K₂O). L'indice d'adéquation est donc déterminé en prenant en compte le type de matière fertilisante dont les caractéristiques des sédiments se rapprochent le plus.

Pour les sédiments DUR, RHI et ISE, l'indice d'adéquation est calculé à partir du critère indicateur CaO+MgO. Parmi ces trois sédiments, GAR et RHI obtiennent la note maximum parce qu'ils satisfont une exigence de la norme relative aux amendements basiques.

Pour le sédiment GAR, l'indice d'adéquation est calculé à partir du critère « teneur en matières organiques ». Bien que ce sédiment ait la teneur en MO la plus élevée, elle reste trop faible par rapport aux exigences de la norme relative aux amendements organiques. Ce sédiment est utilisable mais ne bénéficie donc pas d'un atout rendant son utilisation particulièrement intéressante.

1.2.4. Conclusions sur l'application de la démarche aux sédiments fins étudiés

Cet outil a été conçu avec pour objectif de pré-orienter les sédiments fins vers des filières de valorisation selon leurs caractéristiques. Néanmoins des études complémentaires seront nécessaires pour valider la faisabilité d'une utilisation de sédiments dans les filières visées.

Cette première approche permet de mettre en avant les atouts et les défauts des caractéristiques que peuvent présenter les sédiments fins pour une valorisation. Les indices d'adéquation obtenus sont rappelés dans le tableau 5-8.

Les tendances des résultats obtenus avec l'outil d'évaluation de l'adéquation technique sont confirmées les observations effectuées lors des essais en laboratoire pour les filières minérales.

Pour une utilisation comme matière première en cimenterie, nous avons vu que les caractéristiques des sédiments étudiés étaient adaptées pour qu'ils soient intégrés à hauteur de 20 à 30 % dans des crus pour la fabrication de clinker. Les valeurs des indices d'adéquation mettent effectivement en évidence que la filière est adaptée. Parmi les sédiments étudiés, le sédiment ISE était un peu plus adapté car il pouvait être utilisé en proportion assez importante du cru et ne nécessitait qu'un ajout faible de matière correctrice. Au travers de l'outil, on observe bien que ce sédiment est un peu plus adapté que les deux autres, son indice d'adéquation étant plus élevé.

Pour une utilisation comme filler, les essais en laboratoire avaient montré que les sédiments étudiés avaient des performances inférieures aux additions minérales normalisées. Les valeurs obtenues à l'aide de l'outil sont faibles, traduisant bien que les caractéristiques des sédiments fins étudiés correspondent relativement peu aux caractéristiques des additions minérales pour le béton. Notons que le sédiment ISE a un indice d'adéquation plus élevé que les autres sédiments dans cette filière. Or, les résultats des essais en laboratoire ont montré que ce sédiment était plus adapté que les sédiments GAR et RHI. En effet, les indices d'activité à 28 jours étaient plus élevés et ce sédiment n'était pas à l'origine de retard de prise des mortiers.

Pour une utilisation comme matériau routier et assimilé, les résultats des essais en laboratoire ont montré que les sédiments étudiés parvenaient à atteindre les performances minimales à condition de faire l'objet d'un traitement adapté. Les valeurs obtenues avec l'outil d'évaluation vont de 3,32 à 7,02. Cela indique bien qu'une utilisation peut être envisagée mais que les caractéristiques des sédiments ne sont pas idéales. C'est notamment le cas pour les sédiments GAR et RHI, où leurs teneurs en MO rendent plus délicate leur utilisation. Par conséquent, on observe bien des indices d'adéquation plus faibles. Enfin, notons que le sédiment DUR a l'indice d'adéquation le plus élevé (IA=7,02) mais que les essais en laboratoire n'ont pas démontré une plus grande aptitude que les autres sédiments pour cette filière.

Pour une utilisation comme matière première pour la fabrication de terre cuite, les résultats obtenus avec l'outil d'évaluation confirment les observations réalisées grâce aux essais en laboratoire. En effet, le sédiment ISE, avec un indice d'adéquation très élevé (IA=9,26), présentait des propriétés adaptées pour cette filière. Les essais en laboratoire avaient démontré que le sédiment RHI était utilisable mais qu'il devait être mélangé avec des matières plastiques pour être mis en forme. On constate que l'indice d'adéquation pour ce sédiment moins adapté est plus faible (IA=6,86).

Tableau 5-8. Indices d'adéquation des sédiments étudiés pour les différentes filières

<i>Filière envisagée</i>	<i>DUR</i>	<i>GAR</i>	<i>ISE</i>	<i>RHI</i>	<i>Moyenne</i>
<i>Matière première pour la fabrication de clinker</i>	-	8,11	8,89	8,46	8,49
<i>Addition minérale pour le béton</i>	-	1,66	4,75	2,32	2,91
<i>Matériaux routiers et assimilés</i>	7,02	3,32	6,56	4,57	5,37
<i>Matière première pour l'industrie céramique</i>	-	7,43	9,26	6,86	7,85
<i>Valorisation Epandage agricole</i>	10,00	3,64	7,11	10,00	7,69
<i>agronomique Reconstruction de sol</i>	5,63	8,49	7,14	7,92	7,30
<i>Moyenne des indices d'adéquation</i>	7,55	5,44	7,29	6,69	

On observe qu'en moyenne, les filières avec les indices d'adéquation les plus élevés concernent la valorisation en matière première pour le cru de cimenterie et pour la fabrication de céramiques. D'un point de vue pratique, nous avons vu au chapitre précédent que les sédiments peuvent substituer une fraction plus importante de matières premières dans la filière céramique que dans la filière ciment. Pour ces deux filières potentielles, il est nécessaire de disposer d'installations industrielles à proximité pour envisager une mise en œuvre opérationnelle.

La filière avec, en moyenne, les indices d'adéquation les plus faibles est relative à la valorisation comme addition minérale dans les bétons et mortiers. Considérant les caractéristiques que présentent généralement des sédiments fins de barrage, une valorisation des sédiments bruts dans cette filière semble délicate.

On observe bien que le sédiment qui présente en moyenne, les meilleurs indices d'adéquation est le sédiment DUR. Mais la valeur moyenne ainsi calculée pour ce sédiment n'intéresse pas la totalité des filières, sa caractérisation ne permettant pas de déterminer tous les critères. C'est le sédiment ISE qui présente la moyenne des indices la plus élevée, toutes filières considérées.

1.3. LIMITES ET PERSPECTIVES

Il est important de noter que pour toute utilisation, cet outil a été conçu pour des sédiments fins de barrage, avec pour objectif leur pré-orientation vers des filières de valorisation à terre. Son utilité est de cibler les qualités et les défauts des sédiments fins au regard des voies de valorisation envisagées. Il se base sur un nombre réduit de paramètres.

Le potentiel de valorisation des sédiments fins de barrage est déterminé grâce à des indices d'adéquation. Ces indices permettent d'identifier simplement, à l'aide de « notes », le potentiel technique d'utilisation des sédiments dans les filières de valorisation préconisées. D'une manière générale, l'utilisation d'indices peut être discutée. Le principal élément de discussion concerne le fait qu'ils agglomèrent l'information la rendant plus facile à gérer mais d'un autre côté, en combinant les indicateurs, cette simplification s'accompagne plus ou moins d'une perte de l'information. Pour un utilisateur de l'outil, il faut avoir ceci à l'esprit.

De plus, l'utilisateur doit savoir que pour aboutir à cet outil, des critères indicateurs ont été sélectionnés et définis. Des choix ont été proposés mais ils peuvent être discutés. Certaines propositions ont été faites en tenant compte des avis d'experts. Selon leurs parcours scientifiques, leurs domaines de compétence, leurs expériences... ces professionnels de par la pratique, vont avoir parfois une sensibilité ou appréciation différente pour les aspects techniques. La phase d'interprétation s'appuie sur des éléments provenant de diverses sources (littérature scientifique, guides, normes,...) étant ni prévues pour les sédiments ni pour être employées dans un tel outil. Les données techniques concernant les matières premières que l'on souhaite substituer sont peu disponibles. Ceci peut avoir pour conséquence de rendre difficile le jugement des valeurs mesurées et d'affecter la qualité de l'interprétation. L'attribution de score et de coefficients de pondération est donc une opération délicate ayant impliqué des choix. Enfin, pour la majorité des filières, des paramètres extérieurs, qui ne dépendent pas des caractéristiques des sédiments, mériteraient d'être pris en compte. Il s'agit par

exemple des propriétés des sols et des besoins des plantes pour un épandage agricole, les caractéristiques des matériaux auxquels seront mélangés les sédiments dans un cru de cimenterie, etc.

Afin d'améliorer l'outil, des connaissances supplémentaires peuvent permettre de perfectionner le choix des critères indicateurs. De même, les courbes de score (algorithmes) comme les coefficients de pondération des indices peuvent être affinés. Cela peut être réalisé grâce à des avis d'experts supplémentaires, des retours d'expériences et davantage de données concernant les sédiments fins et surtout concernant les matières premières couramment utilisées dans les filières de valorisation.

Enfin, un développement de l'outil peut aussi concerner l'ajout de filières de valorisation à celles déjà préconisées en utilisant le cadre méthodologique proposé.

1.4. PROPOSITION D'UNE CARACTERISATION PERMETTANT D'ACCEDER AU JEU DE DONNEES MINIMUM

Afin de pouvoir mettre en place la démarche précédemment décrite, il est nécessaire de caractériser les sédiments fins de barrage. Cette section est la traduction opérationnelle de la démarche. En effet, une caractérisation minimale est proposée pour les sédiments fins dont une gestion à terre est envisagée. Elle a pour objectif de lister les essais et analyses nécessaires pour construire les critères indicateurs et appliquer la démarche aboutissant aux indices d'adéquation renseignant sur l'aptitude des sédiments fins de barrage à être utilisés dans les différentes filières de valorisation.

Des essais et analyses complémentaires sont proposés. Ils permettent d'accéder à des informations rapidement indispensables si l'on souhaite mettre en œuvre une filière de valorisation. Les essais sont regroupés selon deux grands types de caractérisation, l'une « minérale » et l'autre « agronomique ».

Pour la partie « minérale », il est recommandé que la caractérisation comporte les éléments suivants :

- l'analyse granulométrique ;
- la détermination des limites d'Atterberg et de la valeur au bleu ;
- la détermination de la teneur en matière organique / teneur en carbone organique total ;
- la détermination de la composition en éléments majeurs (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O , MgO , P_2O_5 , TiO_2 , sulfates et soufre total) ;
- la détermination et semi-quantification de la composition minéralogique globale et des minéraux argileux ;

Pour la partie « agronomique », il est recommandé de compléter la caractérisation « minérale » par les analyses suivantes :

- la mesure du pH et de la conductivité ;
- la détermination de l'azote total et minéral ;
- la détermination de la valeur neutralisant et de la solubilité carbonique ;
- la mesure de la capacité d'échange cationique (CEC) ;
- la détermination de la germination des graines adventices viables ;
- la mesure des teneurs en éléments phytotoxiques (ETM et CTO) ;
- la détermination des teneurs en éléments nutritifs (P_2O_5 assimilable et K_2O , CaO , MgO , NaO échangeable) ;
- la détermination des oligoéléments cuivre, fer, manganèse et zinc biodisponible, du bore et du molybdène assimilable.

En caractérisant ainsi les sédiments fins à l'aide de ces paramètres, il est possible d'avoir une vision de leur potentiel de valorisation. La caractérisation est proposée dans la logique des travaux de la thèse, en portant un intérêt prioritaire à la « fraction valorisable ». Cette caractérisation devra être complétée par d'autres paramètres qui tiendront compte dans le cas de sédiments fins peu ou contaminés, des aspects environnementaux, notamment avec des essais de lixiviation.

2. ADEQUATION SPATIALE

Dans la partie précédente, nous avons constaté que deux des filières de valorisation pressenties, possèdent des indices d'adéquation en moyenne plus élevés. Elles concernent l'utilisation des sédiments fins en matière première en cru de cimenterie et pour la fabrication de céramiques de type terre cuite. La mise en œuvre de ces voies de valorisation implique de prendre en compte le tissu industriel local.

Dans le contexte d'une gestion durable à terre des sédiments issus de dragages, il faut que les filières de valorisation techniquement adaptées soient à une distance raisonnable du lieu d'extraction. Pour une gestion exclusive à terre, le transport est une phase incontournable qui peut être réalisée selon différents modes (routier, fluvial, ferroviaire). Le développement de filières de valorisation nécessite alors d'intégrer les notions de distances entre gisements et sites de valorisation.

Cette prise en considération des distances impose une identification géographique des sites pouvant utiliser des sédiments fins. Ceci permettra de mettre en avant des opportunités locales de valorisation et créer des synergies entre les acteurs, possédant des gisements de sédiments fins et pouvant utiliser ces matériaux naturels et renouvelables.

Pour apporter des réponses à cette prise en compte, un travail a été mené conjointement à ces travaux de thèse. Cette section, qui s'attache à identifier et à présenter des destinations potentielles pour les sédiments fins de barrage, rapporte pour une part des résultats obtenus par Faure [2014].

2.1. METHODOLOGIE

2.1.1. Filières étudiées

Selon les filières, les acteurs en capacité de prendre en charge les sédiments fins vont être différents. Toutefois, chacune des activités économiques, a un maillage territorial qui lui est propre.

Parmi les cinq filières pressenties, deux ont été retenues pour leur meilleure aptitude à valoriser les sédiments. Elles font l'objet de cette section. Il s'agit de la valorisation comme matière première pour la fabrication de clinker et pour la fabrication de céramiques de type terre cuite. Comme démontré précédemment, ces deux filières peuvent utiliser des sédiments fins mais ceci implique une synergie avec un site industriel. Pour ce faire, les principales usines de ces deux types d'industries ont été identifiées et géo référencées.

2.1.2. Outils utilisés

Pour afficher, traiter et analyser les données spatialisées, deux logiciels de géomatique ont été utilisés : ArcGIS 10 d'Esri et QGIS 2.0.

Le principe de base de l'étude est fondé sur la connaissance du lieu d'implantation des usines pouvant assurer la valorisation des sédiments. Cela permet d'identifier le site géographique le plus opportun et d'identifier les zones pour lesquelles les filières de valorisation paraissent territorialement les plus adaptées. Autrement dit, cette approche doit permettre d'identifier les « zones favorables » pour la mise en œuvre des filières.

Les données utilisées dans cette section, concernant différents types d'industries, ont plusieurs origines. Les données concernant les principales usines de fabrication de terre cuite ont été transmises par le CTMNC. Les données relatives aux cimenteries sont issues de BRGM [2009] et Global Cement [2012] puis ont été actualisées. Enfin, les données relatives aux ouvrages hydroélectriques exploités par EDF proviennent de l'entreprise.

Une analyse de proximité a été réalisée une fois les données relatives aux industries acquises et intégrées dans des « fichiers de forme » (*shapefiles*). Deux outils d'analyse SIG ont été utilisés. Il s'agit de (i) la création de polygones proximaux (polygones de Voronoï) et (ii) la création d'iso distances routières à partir des usines.

La création de polygones de Voronoï définit des entités surfaciques qui divisent l'espace disponible et les attribuent à l'entité ponctuelle la plus proche. En d'autres termes, la zone à l'intérieur

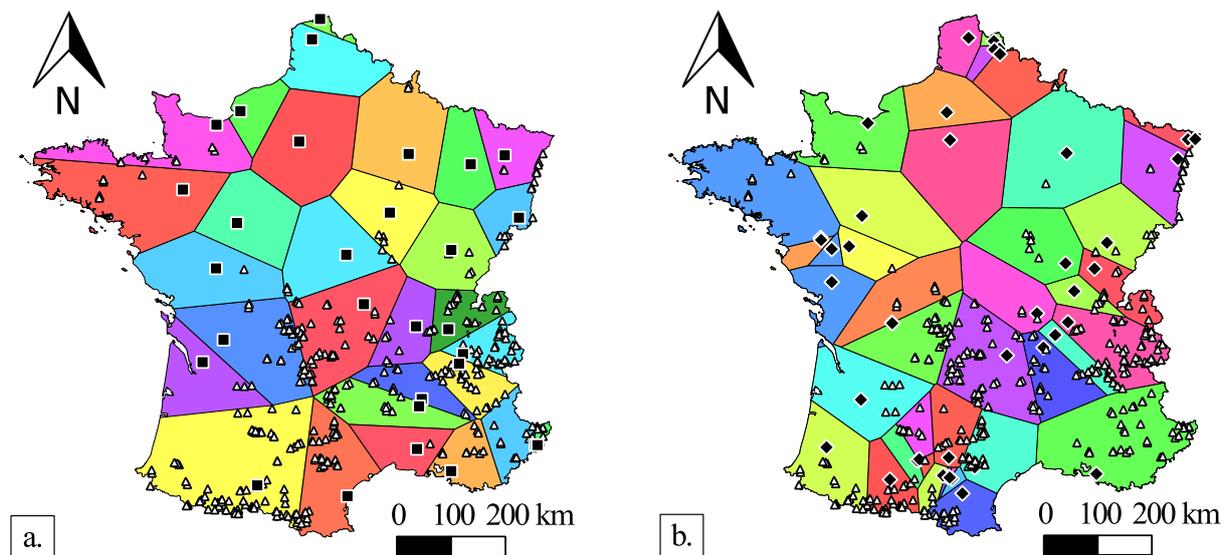
d'un polygone donné est plus proche du point de ce polygone que tout autre. Les polygones représentent en quelque sorte la « zone d'influence » pour une usine donnée. En positionnant les retenues hydroélectriques, on obtient efficacement l'installation la plus proche.

La deuxième analyse consiste à utiliser le SIG en considérant le réseau routier existant. L'extension *Business analyst* développée par l'éditeur Esri a été utilisée pour réaliser ce traitement. Il s'agit d'une extension dédiée au géomarketing qui, grâce à des bases de données fournies et régulièrement actualisées, est capable de renseigner une entreprise sur ses potentialités de développement en intégrant les réseaux de transport, la clientèle, les zones de chalandise, les sites de production et de stockage, etc. Le module *Trade area* de cette extension a été employé pour la création d'iso distances routières.

2.1. RESULTATS DES ANALYSES SIG

2.1.1. Polygones de Voronoï

Rappelons que la surface couverte par les entités ponctuelles a été divisée en zones proximales. Ces zones représentent des surfaces complètes dont tout emplacement est plus proche de son point en entrée associé que de tout autre point en entrée. La figure 5-16 présente les zones pour les deux types d'industries visées.



Légende

△ Ouvrages exploités par EDF ■ Cimenteries ◆ Industries terre cuite

Figure 5-16. Polygones de Voronoï pour (a) l'industrie cimentière et (b) l'industrie de la terre cuite

En positionnant les retenues hydroélectriques sur les mêmes cartes, on observe clairement quelle est l'installation la plus proche de chaque retenue. Il est d'ailleurs possible de lister, pour chaque usine représentée, les barrages qui sont dans sa « zone d'influence ».

Notons que cette analyse n'est basée que sur la localisation des différents sites industriels, sans considérer les traits de côtes. Cela peut entraîner quelques situations aberrantes. C'est par exemple le cas dans le nord de la Bretagne pour les polygones de Voronoï relatifs aux cimenteries.

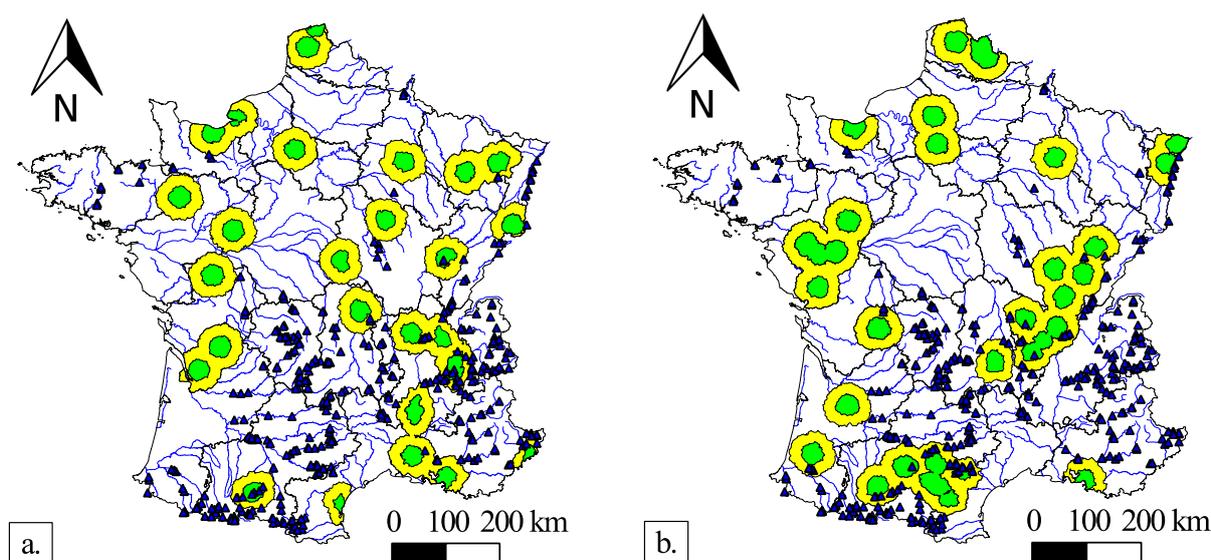
Cette démarche permet de « sectoriser » le territoire français, voire des territoires à un niveau infra. Elle peut ouvrir la voie à des travaux de réflexion par lots au sein desquels tous les ouvrages hydrauliques pourraient voir leurs sédiments valorisés dans une même fabrique, sous réserve d'adéquation technique.

2.1.2. Distances selon le réseau de transport routier

Le réseau routier a été pris en compte afin de mieux considérer les distances réelles qui ont un sens sur le plan opérationnel et économique.

Des aires d'iso distances routières ont été calculées en utilisant l'outil *Trade area* de l'extension *Business analyst* pour ArcGIS 10.2. Les calculs pour deux distances (25 et 50 km) ont été illustrés et représentés sur la figure 5-17.

Même s'il est difficile de fixer des seuils formels, la distance maximale acceptable est de l'ordre de 50 km. En effet, lorsque l'on se réfère au transport de granulats, il est admis que 50 km est une valeur limitante pour la rentabilité du transport routier [DREAL Rhône-Alpes, 2013].



Légende

▲ Ouvrages exploités par EDF — Cours d'eau □ Limites régionales
 Aires dont une usine a distance routière inférieure à : ■ 25 km ■ 50 km

Figure 5-17. Iso distances routières pour (a) l'industrie cimentière et (b) l'industrie de la terre cuite

Grâce à ce type de représentation, on obtient une visualisation plus claire des barrages dont les sédiments pourraient faire l'objet d'une valorisation ; les usines étant à une distance « raisonnable » par le réseau de transport routier que peuvent emprunter des poids lourds entre 25 et 30 tonnes.

On constate sur la figure 5-17b que l'adéquation spatiale entre des usines de fabrication de terre cuite et les ouvrages hydroélectriques est plus importante dans le sud-ouest de la France. En effet, il y a une concentration importante d'usines et de barrages, notamment dans le bassin versant de la Garonne. De plus, la production de produits en terre cuite dans cette zone représente presque un quart de la production nationale.

Une fois les aires d'iso distances créées, il est possible d'établir la liste des retenues hydroélectriques dont les sédiments, sous réserve de présenter les caractéristiques adéquates, pourraient faire l'objet d'une valorisation du fait d'une distance aux installations inférieure à 25 ou 50 km par la route. Le tableau 5-9 dénombre les barrages distants de moins de 25 et 50 km par la route des usines de terre de cuite et des cimenteries. On observe que le nombre de barrages situés à des distances « très raisonnables » (< 25 km) est relativement limité.

Tableau 5-9. Nombre de barrages exploités par EDF distants de moins de 25 et 50 km d'une cimenterie ou d'une usine de fabrication de produits en terre cuite

<i>Industrie</i>	<i>Nombre de barrages inférieur à</i>	
	<i>25 km</i>	<i>50 km</i>
<i>Ciment</i>	<i>10</i>	<i>33</i>
<i>Terre cuite</i>	<i>9</i>	<i>55</i>

La distance maximale acceptable retenue dans cette étude, de 50 km, est fixée en se référant au transport de granulats. La gestion à terre des sédiments fins de barrage mériterait de faire l'objet d'analyses de coûts dédiées à ce cas particulier. Cela impliquerait notamment de prendre en compte des aspects économiques tels que le coût des diminutions des capacités de stockage en eau des retenues (réduction de la production d'électricité liée à la sédimentation) et la comparaison du coût lié au transport par rapport à celui pour aller vers une installation de stockage de déchets adaptée aux caractéristiques des sédiments. Selon les cas, des distances de transport acceptables pourraient probablement aller au-delà de 50 km.

Dans les cas présentés, seul le mode de transport routier a été abordé. Ce mode de transport a pour intérêt d'être flexible, de limiter les ruptures de charge et de pouvoir être utilisé dans tous les cas ; tous les sites industriels permettant la valorisation étant desservis par le réseau routier.

Toutefois, d'autres modes de transport sont envisageables, notamment le transport fluvial et ferroviaire. Ces deux modes sont moins émetteurs de GES par tonne-kilomètre parcourue. Cependant, ces modes de transport moins flexibles impliquent généralement des ruptures de charge pouvant entraîner un coût supplémentaire.

CONCLUSION DU CHAPITRE

Grâce au travail de recherche bibliographique, intégrant littérature scientifique, normes, guides techniques, ainsi que les expériences menées en laboratoire et la prise en considération d'avis d'experts, un cadre méthodologique a été développé aboutissant à un outil d'évaluation de l'adéquation technique entre les caractéristiques des sédiments fins de barrage et les spécifications des filières de valorisation.

Cet outil a été conçu et utilisé à partir des caractéristiques des sédiments fins de barrage étudiés. Les tendances des résultats obtenus avec l'outil d'évaluation de l'adéquation technique confirment les observations effectuées lors des essais en laboratoire.

Le sédiment DUR a la meilleure moyenne des indices d'adéquation mais sa caractérisation incomplète n'a pas permis de calculer l'indice d'adéquation pour toutes les filières. Sa forte teneur en carbonates est un atout pour une valorisation en cru de cimenterie mais aussi pour une valorisation agricole. De plus, sa faible teneur en MO est favorable pour une valorisation comme filler et comme matériau routier. Cependant, les essais en laboratoire n'ont pas démontré une plus grande aptitude que les autres sédiments pour cette filière.

Le sédiment ISE est assez bien adapté pour l'ensemble des filières. Il l'est particulièrement pour une valorisation dans l'industrie de la terre cuite, notamment grâce à sa finesse et sa richesse en minéraux argileux.

Le sédiment GAR est pénalisé par sa forte teneur en MO pour les « filières minérales », excepté le ciment. Mais cette teneur n'est pas suffisamment importante pour être un réel atout dans les « filières agronomiques ». La proportion relativement importante de minéraux argileux, composant ce sédiment paraît intéressante pour une valorisation dans la fabrication de produit en terre cuite. Mais les phyllosilicates apportent de la plasticité, plasticité qui reste néfaste pour une valorisation en matériau routier et plus encore comme filler.

Le sédiment RHI, a un potentiel limité par sa teneur en matière organique. Cela conduit aux mêmes conséquences que pour le sédiment GAR, mais dans une moindre mesure. Toutefois, la forte teneur en calcium et magnésium confère à ce sédiment un intérêt pour une valorisation agricole. Enfin, la teneur en minéraux argileux, moins importante que les sédiments ISE et GAR, le pénalise pour une

valorisation en fabrication de céramique. Cela confirme parfaitement les observations réalisées grâce aux essais en laboratoire.

Quelques recommandations générales peuvent être proposées concernant l'adéquation entre les caractéristiques des sédiments et les valorisations potentielles :

- Pour une utilisation comme matière première dans la fabrication de clinker, une très large gamme de sédiments peut être utilisée. C'est principalement leur proportion dans le cru qui va varier selon leurs caractéristiques, notamment chimiques. Des sédiments avec une teneur en carbonates importante pourront être utilisés en plus grande quantité. Au-delà du problème de l'eau, une teneur en quartz élevée peut fortement limiter leur proportion dans le cru. De plus, si des grains de quartz ont un diamètre assez important, supérieur à 200 µm, ils peuvent entraîner une usure plus rapide des broyeurs. Au final, pour faciliter cette utilisation, il est préférable que les sédiments fins soient riches en carbonates et/ou minéraux argileux, pauvres en quartz et aient une faible teneur eau.
- Pour une utilisation comme filler dans les mortiers ou bétons, les caractéristiques généralement rencontrées pour les sédiments fins sont peu adaptées. En effet, pour cette application, il est préférable que les sédiments soient fins et que les teneurs en matière organique et en minéraux argileux soient très faibles. Une mise en œuvre de cette filière est donc assez délicate.
- Pour une utilisation comme matériau routier et assimilé, il est préférable que les sédiments aient une faible teneur en matière organique. En quantité importante, cette teneur va rendre compliqués et donc onéreux les traitements. Selon leur quantité et leur nature, les minéraux argileux peuvent aussi être pénalisants pour cette filière. La présence d'une fraction granulométrique sableuse facilite la mise en œuvre.
- Pour une utilisation comme matière première dans la fabrication de terre cuite, il est préférable que les sédiments soient très fins, avec une très grande quantité de minéraux argileux. Il faut que la teneur en matière organique reste modérée et que les carbonates ne soit pas sous la forme de gros grains.
- Pour une utilisation agronomique, les caractéristiques recherchées vont différer selon l'application envisagée. Pour une utilisation agricole, une forte teneur en carbonates et/ou en matière organique est favorable. Pour une préparation d'anthroposol construit à base de sédiments, il faut impérativement que la conductivité électrique soit inférieure à 2 mS/cm et que le pH soit proche de 7. Une teneur en matière organique est aussi un atout pour une utilisation dans cette filière.

Il apparaît à l'analyse des résultats obtenus avec les sédiments étudiés que des valorisations comme matière première pour la fabrication de clinker et/ou de céramiques de type terre cuite sont mieux adaptées.

Les sédiments fins présentent des caractéristiques minéralogiques analogues aux matières premières couramment utilisées dans ces deux filières. Un intérêt important dans la gestion durable des sédiments à terre est de rapprocher « sites de gisement » et « sites de valorisation ». Pour nos deux filières, une analyse SIG fait apparaître qu'un nombre limité de retenues hydroélectriques est situé à proximité des sites industriels.

La pérennité des filières de valorisation implique nécessairement d'intégrer des notions de distances entre gisements et sites de valorisation. Ainsi, l'analyse spatiale permet de faire émerger des opportunités de valorisation des sédiments. Elle met aussi en évidence que certaines voies de valorisation ne peuvent être envisagées en raison de la distance qui sépare un site d'extraction de sédiments, des filières de valorisation.

Mais aborder la territorialisation dans la gestion à terre des sédiments permet de s'ancrer dans des logiques d'avenir que sont l'économie circulaire et l'écologie industrielle. Il s'agit plus d'une vraie prise en compte des nouveaux axes adoptés par le législateur dans la gestion de déchets en privilégiant clairement les solutions de traitement et de valorisation locales [CE, 2014].

Une problématique qui émerge alors est d'aller au-delà de cette simple mise en parallèle des deux notions en ne constituant qu'un seul outil d'aide à la décision intégrateur capable de prendre en compte à la fois l'adéquation technique des sédiments fins dragués dans un barrage X avec une filière de valorisation Y et la possibilité industrielle locale de prise en charge des matériaux.

Chapitre 6
**CONCLUSION GENERALE
ET PERSPECTIVES**

1. CONCLUSION GENERALE

Ces travaux ont concerné l'étude de cinq filières de valorisation potentielles pour les sédiments fins des retenues hydroélectriques, à savoir en cimenterie, dans la fabrication de mortier et de béton, en matériau routier et assimilé, en matériau céramique et en valorisation agronomique. Après avoir mis en évidence les spécifications d'entrée dans ces filières, un ensemble d'essais à l'échelle du laboratoire a été conduit sur des sédiments fins provenant de quatre retenues hydroélectriques. Ces essais ont permis d'établir les caractéristiques des sédiments et d'estimer leur aptitude à être employés dans les filières investiguées. Un outil a été conçu pour évaluer l'adéquation entre les sédiments fins de barrage et les voies de valorisation afin de pré-orienter les sédiments vers les filières les plus adaptées.

1.1. CARACTERISTIQUES DES SEDIMENTS

Une connaissance approfondie des caractéristiques des sédiments fins est indispensable pour optimiser la probabilité pour mieux cibler et trouver une ou plusieurs voies de valorisation. Ainsi, les sédiments fins de barrage ont fait l'objet de caractérisations « minérale et géotechnique » et « agronomique » en vue d'être valorisés. Il a pu être mis en évidence des essais de caractérisation et des analyses en découlant que :

- les diamètres médians des grains vont de 6,1 μm à 37,7 μm pour les sédiments étudiés avec un passant à 63 μm allant de 74 à 100 % ;
- les principaux minéraux qui constituent les sédiments sont le quartz, les carbonates et les phyllosilicates (essentiellement des minéraux argileux). Les semi-quantifications indiquent que le quartz représente 24 à 36 %, la calcite 4 à 24 % et les phyllosilicates 22 à 35 % pour les sédiments étudiés ;
- le cortège de minéraux argileux est dominé par l'illite et la chlorite dans la plupart des cas étudiés. Ces deux familles représentent approximativement 47 à 100 % des minéraux argileux dans le cas des sédiments fins de barrage étudiés ;
- les teneurs en matière organique sont comprises entre 3,0 et 9,1 % ;
- les indices de plasticité vont de 9 à 26 % et les valeurs au bleu de 0,7 à 2,4 g/100g de sédiments. Ces paramètres sont fortement influencés par la nature et la quantité de minéraux argileux et des matières organiques ;
- les compositions chimiques en éléments majeurs sont liées à la minéralogie. La silice (SiO_2) est la plus abondante dans les sédiments étudiés (43,1 à 56,3 %). L'alumine (Al_2O_3) et l'oxyde de calcium (CaO) sont respectivement présents sur des intervalles de 7,9 à 14,7 % et 4,13 à 18,43 % selon les sédiments étudiés ;
- les valeurs de pH mesurées sont toutes légèrement basiques et varient de 8,0 à 8,7. La conductivité électrique est comprise dans une gamme allant de 0,31 à 0,96 mS/cm.

1.2. FILIERES DE VALORISATION

Parmi les filières retenues, une mise en œuvre à l'échelle du laboratoire a été réalisée pour quatre d'entre elles. Les sédiments fins de barrage ont été employés, seuls ou comme composants dans des mélanges avec d'autres matériaux couramment utilisés, comme :

- matière première dans un cru pour la fabrication de clinker ;
- addition minérale dans des mortiers ;
- matériau routier traité aux liants hydrauliques ;
- matière première argileuse pour la fabrication de matériau céramique.

Si les résultats des essais de valorisation confirment qu'il est possible d'utiliser ces sédiments fins de barrage, il n'en demeure pas moins que le niveau d'aptitude à leur emploi dans telle ou telle filière, est fortement conditionné par leurs caractéristiques.

Dans les crus de cimenteries, les sédiments peuvent apporter la quantité d'argile voire de calcaire nécessaire sous forme de mélanges binaire (calcaire/sédiment) ou ternaire (calcaire/sédiment/bauxite). Les taux d'incorporation ont varié d'environ 20 à 30 % de sédiments secs selon le type de mélange et de sédiment. Les clinkers obtenus présentent des caractéristiques chimiques et minéralogiques similaires à des clinkers ordinaires.

Dans des mortiers, les sédiments ont pu être utilisés comme addition minérale selon deux taux de substitution de ciment : 10 et 25 %. L'incorporation de sédiments fins est à l'origine de demandes en eau des mortiers relativement élevées. Mais les demandes en eau élevées contribuent à diminuer les résistances mécaniques des mortiers substitués. De plus, la présence de matières organiques semble avoir pour conséquence un retard de la prise. Les indices d'activité à 28 jours, pour 25 % de substitution de ciment, vont de 0,53 à 0,61 et ne permettent pas d'obtenir des performances équivalentes à celles des additions normalisées de type calcaire ou siliceux. On peut retenir cependant qu'une incorporation de sédiments fins de barrage dans certains mortiers est envisageable.

Pour le réemploi des sédiments de barrage traités en matériau routier ou assimilé, l'étude visait à évaluer les performances mécaniques des sédiments après une stabilisation aux liants classiques à dosage faible ou économique. Deux formulations ont été testées : l'une avec un dosage de 3 % de chaux et 3 % de ciment et la seconde un dosage de 6 % de ciment. La seconde formulation avec 6 % de ciment, est plus efficace pour l'ensemble des sédiments au regard des résistances mécaniques. Le critère de traficabilité (valeur seuil de 1 MPa) et le critère d'insensibilité à l'eau sont satisfaits. Les résultats obtenus sont encourageants pour envisager des valorisations matière des sédiments de barrage dans des applications géotechniques telles que des couches de forme, pistes cyclables, voies piétonnes, remblais stabilisés, etc.

Pour la fabrication de produits céramiques, deux procédés de mise en forme ont été considérés, l'un à partir d'une suspension (coulage en moule en plâtre) et l'autre à partir d'une pâte plastique (extrusion). Dans les deux cas, les sédiments ont permis de fabriquer des pièces céramiques. Selon leurs propriétés, les sédiments ont, soit pu être utilisés seuls ou soit nécessité l'apport d'argile, notamment afin de permettre une mise en forme acceptable. Pour certains produits uniquement à base de sédiments fins, façonnés par extrusion et cuits à 1 050 °C, les caractéristiques mesurées, *i.e. une résistance à la flexion de 9,7 MPa, une porosité de 41,2 %, une absorption d'eau de 30,6 % et une conductivité thermique de 0,45 W/m.K*, sont dans les gammes observées pour les briques en terre cuite. Les travaux menés confirment qu'une utilisation dans cette filière est possible.

1.3. ADEQUATION SEDIMENTS - FILIERES

Grâce au travail de recherche bibliographique, intégrant littérature scientifique, normes, guides techniques, ainsi que les expériences menées en laboratoire et la prise en considération d'avis d'experts, un cadre méthodologique a été développé aboutissant à un outil d'évaluation de l'adéquation technique entre les caractéristiques des sédiments fins de barrage et les spécifications des filières de valorisation.

L'adéquation technique entre un sédiment et une filière se traduit par une note comprise entre 0 et 10 appelée « indice d'adéquation ». Les indices d'adéquation sont des moyennes pondérées de plusieurs scores interprétant des critères indicateurs relatifs aux voies de valorisation. Ainsi, les indices d'adéquation contribuent à pré-orienter les sédiments vers les filières de valorisation les plus adaptées.

Pour utiliser cet outil d'évaluation de l'adéquation technique, il est nécessaire de disposer au préalable d'un jeu de données minimum caractérisant les sédiments fins dont la valorisation est envisagée. A cet effet, une caractérisation a été proposée. Elle regroupe les essais nécessaires pour disposer d'un ensemble de données minimum et les paramètres techniques qu'il convient de connaître si une gestion à terre des sédiments fins est envisagée.

En utilisant l'outil d'évaluation sur le cas des sédiments étudiés, il apparaît que les filières dans lesquelles l'utilisation de sédiments fins de barrage est techniquement la plus adaptée, concernent l'utilisation des sédiments fins en matière première en cru de cimenterie et pour la fabrication de

céramique de type terre cuite. En effet, les indices d'adéquation sont en moyenne les plus élevés (8,85/10 et 7,85/10) pour ces voies de valorisation.

Comme ces deux filières impliquent fortement la prise en compte du tissu industriel, cet aspect a été considéré et a donné lieu à un travail spécifique. Il a consisté à identifier géographiquement les sites d'accueil où les sédiments fins peuvent être valorisés. Il est nécessaire d'intégrer les notions de distances entre gisements et sites de valorisation. Ce travail contribue aussi à mettre en avant des opportunités locales de valorisation et à créer des synergies entre les acteurs possédant les gisements de sédiments fins et les acteurs pouvant utiliser ces matériaux naturels et renouvelables.

2. PERSPECTIVES

A partir de ces travaux, plusieurs axes de recherche et de développement peuvent être évoqués. Ils recouvrent plusieurs aspects : la mise en place de filières robustes et pérennes de valorisation, l'amélioration et la validation de l'outil décisionnel proposé et l'implication des acteurs locaux avec prise en compte des critères de gestion, d'économie et sociétaux.

2.1. DEVELOPPEMENT DES FILIERES DE VALORISATION

Dans les travaux réalisés, il a été choisi de travailler prioritairement sur l'aspect technique des filières de valorisation matière pour des sédiments fins avec des faibles concentrations en éléments traces métalliques. Une perspective d'étude concerne l'adéquation des filières de valorisation pour les sédiments ayant des concentrations plus élevées en contaminants anthropiques. Quel serait alors l'incidence de la présence d'éléments et composés traces polluants sur les filières de valorisation présentement envisagées ? Où se situeraient les difficultés dans la mise en œuvre de la filière en relation avec la nature et la concentration de polluants et quels seraient les traitements complémentaires à effectuer pour accomplir cette filière ?

Les retours d'expériences favorisent la mise en place des filières plus robustes. Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse concernent des études de faisabilité à l'échelle du laboratoire. Il paraît logique et intéressant de poursuivre ces travaux à une échelle plus grande approchant la vraie grandeur à l'aide de pilotes semi-industriels en intégrant le savoir-faire pratique.

Pour toutes les filières de valorisation investiguées, la teneur en eau des sédiments extraits doit être réduite pour envisager une valorisation. Elle impacte principalement deux aspects des opérations de valorisation des sédiments : le coût du transport et la mise en œuvre dans la filière. Ce paramètre est incontournable et doit impérativement être pris en compte pour toutes les filières de valorisation. Plusieurs aspects peuvent faire l'objet d'études. Ils concernent l'optimisation des techniques de déshydratation, le comportement au cours du séchage des sédiments fins selon leur nature et l'instrumentation pour réaliser des profils de mesures sur des couches épaisses de sédiments fins à teneur en eau élevée.

Parmi les cinq filières retenues, la mise œuvre d'essais de valorisation pour la filière agronomique n'a pas été faite. Une des principales raisons est la maîtrise du temps. En effet, la durée des essais nécessaires aux études agronomiques requiert le plus souvent de long mois voire des années. A ce titre, la filière agronomique constitue à elle seule, une voie d'études spécifique. Néanmoins, l'application qui paraît la plus prometteuse est la valorisation des sédiments comme terre végétale. Les besoins en terre de couverture sont importants en zones urbaines en particulier pour répondre à des projets d'aménagement. Le mode d'approvisionnement classique, à partir des terres agricoles situées en périphérie des villes, est de plus en plus discuté et actuellement remis en question. Devant cette raréfaction de terres de couverture disponibles et pour certaines grandes aires urbaines, il faut aller chercher ces terres de plus en plus loin qui deviennent un matériau de plus en plus cher. Ces terres de couverture pourraient être substituées en partie par des sédiments. Ces derniers semblent posséder des propriétés chimiques similaires à celles des terres usuellement utilisées en couverture. Des incertitudes existent cependant quant à leur capacité à se restructurer. Des mélanges avec des composts pourraient constituer une solution alternative à ce problème posé. Des travaux de recherche et développement en ce sens méritent d'être menés sur la capacité des sédiments à retrouver une structure physique

semblable à un sol pour l'élaboration d'anthroposols construits à base de sédiments fins de barrage. Un projet de thèse portant sur cette thématique a été initié.

Concernant la filière des ciments, nous avons bien constaté que les sédiments présentent une bonne aptitude pour être utilisés dans un cru de cimenterie pour la fabrication de clinker. A ce sujet, on peut aussi noter le faible nombre de publications scientifiques liées à ce thème. Une perspective de recherche et développement pourrait concerner l'utilisation de sédiments argileux pour la fabrication de liants hydrauliques. Comme les sédiments fins de barrage étudiés sont fortement argileux, il est raisonnable de penser, qu'un traitement thermique adapté conduisant à un état structural plus désorganisé, pourrait développer le caractère pouzzolanique du sédiment calciné. Dans ce cas, l'utilisation de sédiments fins comme composant dans des ciments serait techniquement envisageable. Ce caractère pouzzolanique serait par application, aussi un atout pour une valorisation dans des bétons et mortiers. Un projet de thèse est en cours de proposition, l'objet porte sur l'étude de la capacité d'un sédiment à se substituer à la fraction argileuse de la matière première de l'industrie des liants hydrauliques.

2.2. DEVELOPPEMENT DE L'OUTIL DECISIONNEL

A ce stade des travaux de recherche effectués et à partir des résultats obtenus, un outil d'évaluation de l'adéquation technique entre les caractéristiques des sédiments et les spécifications des filières de valorisation est proposé. Il s'agit d'un outil « prototype » dans la mesure où il est nécessaire de le valider et de le développer. Plusieurs actions seraient à mener pour perfectionner et rendre opérationnel cet outil :

- Dans sa forme actuelle, il convient de le valider à partir de données relatives à de nouveaux sédiments de barrage.
- L'ajout de filières de valorisation à celles étudiées dans cet outil en utilisant la méthodologie proposée, paraît essentiel pour élargir le champ d'application. L'objectif est alors d'accroître le nombre de filières vers lesquelles les sédiments fins pourraient être pré-orientés.
- L'amélioration de l'outil pour les filières déjà établies passe par une meilleure sélection des critères indicateurs, une définition plus fine des courbes de score et l'affinement des coefficients de pondération. Un perfectionnement peut être réalisé grâce à des avis supplémentaires d'experts, des analyses sur des retours d'expériences, un ensemble de données plus conséquent relatifs aux sédiments fins comme sur les matières premières couramment utilisées dans les filières de valorisation.
- Cet outil d'évaluation pourrait constituer un élément ou « une brique » dans le cadre de la construction d'un outil décisionnel plus complet, intégrant par exemple des critères relatifs à des aspects socio-économiques et/ou environnementaux.
- Tout en s'appuyant sur la démarche de conception proposée pour évaluer le potentiel de valorisation des sédiments fins de barrage, cet outil pourrait être proposé pour d'autres actions de valorisation relatives aux déchets et coproduits industriels.

2.3. S'INSCRIRE DANS L'ECONOMIE CIRCULAIRE

Une démarche de développement durable consiste à initier des actions qui contribuent à faire correspondre les offres aux demandes de matériaux à l'échelle locale. En d'autres termes, c'est favoriser les synergies au sein d'un territoire entre « fournisseur de sédiments » et « utilisateurs potentiels ». Pour développer l'utilisation des sédiments fins de barrage comme matière première, il faut faire un inventaire des gisements potentiels, en évaluer les volumes ainsi que les caractéristiques des sédiments.

Par ailleurs, il est important de rappeler aux acteurs industriels ayant la capacité de valoriser des sédiments fins de barrage, outre les aspects techniques et économiques, des intérêts environnementaux peuvent être mis en avant au niveau de l'image de l'entreprise. En effet, transformer des déchets en

ressources constitue aujourd'hui une réponse pertinente et concrète à deux des grands enjeux contemporains : la raréfaction des matières premières et la protection de l'environnement.

Alors que progresse la demande en matières premières, leurs gisements s'épuisent et leurs prix augmentent par voie de conséquence. Le remplacement des ressources naturelles dans leurs applications par des matériaux alternatifs devient alors un enjeu de pérennité et de compétitivité pour de nombreuses entreprises et territoires.

Aussi, la valorisation de sédiments fins extraits, inscrit les acteurs dans une logique d'économie circulaire. Ce type de projet innovant, impliquant l'utilisation de ressources minérales alternatives, peut alors être valorisé pour l'entreprise au travers d'un axe de communication environnemental et ainsi contribuer à une meilleure acceptation locale de l'industrie.

BIBLIOGRAPHIE

REFERENCES NORMATIVES

- AASHTO M 145. Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes.
- ASTM C29. Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate.
- ASTM C62. Standard Specification for Building Brick (Solid Masonry Units Made From Clay or Shale).
- ASTM C109 / C109M. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens).
- ASTM C125-07 (2007). Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates.
- ASTM C150 / C150M. Specification for Portland Cement.
- ASTM C330. Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete.
- ASTM C595 / C595M. Specification for Blended Hydraulic Cements.
- ASTM C 642. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.
- ASTM D 2487. Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).
- BS 3882. Specification for topsoil and requirements for use.
- DIN 4226. Aggregates for concrete and mortar.
- DIN 38414-S4. German standard methods for the examination of water, waste water and sludge; sludge and sediments (group S); determination of leachability by water (S 4).
- EN 12390-8. Essais pour béton durci - Partie 8 : profondeur de pénétration d'eau sous pression.
- EN 14651. Méthode d'essai du béton de fibres métalliques - Mesurage de la résistance à la traction par flexion (limite de proportionnalité (LOP), résistance résiduelle).
- FD P18-457 - AFNOR (2005). Béton - Guide d'application des méthodes d'essais.
- GB/T2842-81. China National Standard. Test method for lightweight aggregates.
- ISO 8157 - AFNOR (1984). Matières fertilisantes - Vocabulaire.
- ISO 9277 - AFNOR (2010). Détermination de l'aire massique (surface spécifique) des solides par adsorption de gaz - Méthode BET.
- ISO 9286 - AFNOR (1997). Abrasifs en grains ou en roche - Analyse chimique du carbure de silicium.
- ISO 11269-2 - AFNOR (2012). Qualité du sol -- Détermination des effets des polluants sur la flore du sol -- Partie 2 : Effets des sols contaminés sur l'émergence et la croissance des végétaux supérieurs.
- NF CEN/TS 14405 AFNOR (2005). - Caractérisation des déchets - Essai de comportement à la lixiviation - Essai de percolation à écoulement ascendant (dans des conditions spécifiées).
- NF EN 196-1 - AFNOR (2006). Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances mécaniques.
- NF EN 196-2 - AFNOR (2006). Méthodes d'essais des ciments - Partie 2 : analyse chimique des ciments.
- NF EN 196-3 - AFNOR (2009). Méthodes d'essais des ciments - Partie 3 : Détermination du temps de prise et de la stabilité.
- NF EN 196-5 - AFNOR (2006). Méthodes d'essais des ciments - Partie 5 : essai de pouzzolanicité des ciments pouzzolaniques.
- NF EN 196-6 - AFNOR (2012). Méthodes d'essais des ciments - Partie 6 : détermination de la finesse.
- NF EN 197-1 - AFNOR (2012). Ciment - Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.
- NF EN 197-4 - AFNOR (2004). Ciment - Partie 4 : Composition, spécification et critères de conformité des ciments de haut fourneau et à faible résistance à court terme.
- NF EN 206-1 - AFNOR (2004). Béton - Partie 1 : spécification, performances, production et conformité.

- NF EN 206-1/CN - AFNOR (2012). Béton - Partie 1 : Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206-1.
- NF EN 413-1 - AFNOR (2012b). Ciment à maçonner - Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité.
- NF EN 450-1 - AFNOR (2012). Cendres volantes pour béton - Partie 1 : Définition, spécification et critères de conformité.
- NF EN 451-1 - AFNOR (2004). Méthode d'essai des cendres volantes Partie 1 : Détermination de la teneur en oxyde de calcium libre.
- NF EN 451-2 - AFNOR (1994) Méthode d'essai des cendres volantes - Partie 2 : détermination de la finesse par tamisage humide.
- NF EN 772-21 - AFNOR (2011). Méthodes d'essai des éléments de maçonnerie - Partie 21 : Détermination de l'absorption d'eau des éléments de maçonnerie en terre cuite et en silico-calcaire par absorption d'eau froide.
- NF EN 933-1 - AFNOR (2012). Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats Partie 1 : Détermination de la granularité — Analyse granulométrique par tamisage.
- NF EN 933-9 - AFNOR (2009). Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 9 : qualification des fines - Essai au bleu de méthylène.
- NF EN 933-10 - AFNOR (2009). Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats Partie 10 : Détermination des fines — Granularité des fillers (tamisage dans un jet d'air).
- NF EN 934-2+A1 - AFNOR (2012). Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Partie 2 : Adjuvants pour bétons - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage.
- NF EN 1008 - AFNOR (2003). Eau de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton.
- NF EN 1097-1 - AFNOR (2011). Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 1 : détermination de la résistance à l'usure (micro-Deval).
- NF EN 1097-2 - AFNOR (2010). Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques de granulats - Partie 2 : méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation.
- NF EN 1097-5 - AFNOR (2008). Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 5 : détermination de la teneur en eau par séchage en étuve ventilée.
- NF EN 1097-7 - AFNOR (2008). Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats Partie 7 : Détermination de la masse volumique absolue du filler — Méthode au pycnomètre.
- NF EN 1338 - AFNOR (2004). Pavés en béton - Prescriptions et méthodes d'essai.
- NF EN 1744-1 - AFNOR (2010). Essais visant à déterminer les propriétés chimiques des granulats Partie 1 : Analyse chimique.
- NF EN 12338 - AFNOR (1998). Qualité de l'eau - Dosage du mercure - Méthodes après enrichissement par amalgame.
- NF EN 12350-2 - AFNOR (2012). Essais pour béton frais - Partie 2 : essai d'affaissement.
- NF EN 12350-3 - AFNOR (2012). Essais pour béton frais - Partie 3 : essai Vébé.
- NF EN 12350-4 - AFNOR (2009). Essais pour béton frais - Partie 4 : indice de serrage.
- NF EN 12350-5 - AFNOR (2009). Essais pour béton frais - Partie 5 : essai d'étalement à la table à choc.
- NF EN 12390-8 - AFNOR (2012). Essais pour béton durci - Partie 8 : profondeur de pénétration d'eau sous pression.
- NF EN 12457-2 - AFNOR (2002). Caractérisation des déchets - Lixiviation - Essai de conformité pour lixiviation des déchets fragmentés et des boues - Partie 2 : essai en bûchée unique avec un rapport liquide-solide de 10 l/kg et une granularité inférieure à 4 mm (sans ou avec réduction de la granularité).

- NF EN 12620+A1 - AFNOR (2008). Granulats pour béton.
- NF EN 12879 - AFNOR (2000). Caractérisation des boues - Détermination de la perte au feu de la matière sèche.
- NF EN 12920+A1 - AFNOR (2008). Caractérisation des déchets - Méthodologie pour la détermination du comportement à la lixiviation d'un déchet dans des conditions spécifiées.
- NF EN 12945 - AFNOR (2008). Amendements minéraux basiques - Détermination de la valeur neutralisante - Méthodes par titrimétrie.
- NF EN 13041 - AFNOR (2012). Amendements du sol et supports de culture - Détermination des propriétés physiques - Masse volumique apparente sèche, volume d'air, volume d'eau, valeur de rétraction et porosité totale.
- NF EN 13055-1 - AFNOR (2002). Granulats légers - Partie 1 : Granulats légers pour bétons et mortiers.
- NF EN 13055-2 - AFNOR (2005). Granulats légers - Partie 2 : Granulats légers pour mélanges hydrocarbonés, enduits superficiels et pour utilisation en couches traitées et non traitées.
- NF EN 13139 - AFNOR (2009). Granulats pour mortiers.
- NF EN 13263-1+A1 - AFNOR (2009). Fumée de silice pour béton - Partie 1 : Définitions, exigences et critères de conformité.
- NF EN 13286-40 - AFNOR (2003). Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 40 : Méthode d'essai de détermination de la résistance à la traction directe des mélanges traités aux liants hydrauliques.
- NF EN 13286-41 - AFNOR (2003). Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 41 : Méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la compression des mélanges traités aux liants hydrauliques.
- NF EN 13286-42 - AFNOR (2003). Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 42 : Méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la traction indirecte des mélanges traités aux liants hydrauliques.
- NF EN 13286-49 - AFNOR (2004). Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 49 : Essai de gonflement accéléré pour sol traité à la chaux et/ou avec un liant hydraulique.
- NF EN 13639 - AFNOR (2004). Détermination du carbone organique total dans le calcaire.
- NF EN 14227-10 - AFNOR (2006). Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 10 à 14 : sol traité.
- NF EN 14227-13 - AFNOR (2006). NF EN 14227-13 - Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 13 : Sol traité au liant hydraulique routier.
- NF EN 14647 - AFNOR (2006). Ciment d'aluminates de calcium - Composition, spécifications et critères de conformité.
- NF EN 14651 - AFNOR (2007). Méthode d'essai du béton de fibres métalliques - Mesurage de la résistance à la traction par flexion (limite de proportionnalité (LOP), résistance résiduelle).
- NF EN 15167-1 - AFNOR (2006). Laitier granulé de haut-fourneau moulu pour utilisation dans le béton, mortier et coulis - Partie 1 : Définitions, exigences et critères de conformité.
- NF EN ISO 11885 - AFNOR (2009). Qualité de l'eau - Dosage d'éléments choisis par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-OES).
- NF EN ISO 18757 - AFNOR (2006). Céramiques techniques - Détermination de la surface spécifique (aire massique) des poudres céramiques par adsorption de gaz à l'aide de la méthode BET.
- NF EN ISO 29581-2 - AFNOR (2007). Méthodes d'essais des ciments - Analyse chimique des ciments - Partie 2 : analyse par spectrométrie de fluorescence X.
- NF ISO 10390 - AFNOR (2005). Qualité du sol - Détermination du pH.
- NF ISO 10693 - AFNOR (1995). Qualité du sol - Détermination de la teneur en carbonate - Méthode volumétrique.

- NF ISO 11263 - AFNOR (1995). Qualité du sol - Dosage du phosphore - Dosage spectrométrique du phosphore soluble dans une solution d'hydrogénocarbonate de sodium.
- NF ISO 11265 - AFNOR (1995). Qualité du sol - Détermination de la conductivité électrique spécifique.
- NF ISO 11274 - AFNOR (1998). Qualité du sol - Détermination de la caractéristique de la rétention en eau - Méthodes de laboratoire.
- NF ISO 11466 - AFNOR (1995). Qualité du sol - Extraction des éléments en traces solubles dans l'eau régale.
- NF ISO 13320-1 - AFNOR (2000). Analyse granulométrique - Méthodes par diffraction laser - Partie 1 : Principes généraux.
- NF ISO 13878 - AFNOR (1998). Qualité du sol - Détermination de la teneur totale en azote par combustion sèche (« analyse élémentaire »).
- NF ISO 14235 - AFNOR (1998). Qualité du sol - Dosage du carbone organique par oxydation sulfochromique.
- NF P11-300 - AFNOR (1992). Exécution des terrassements - Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.
- NF P15-314 - AFNOR (2006). Liants hydrauliques - Ciment prompt naturel.
- NF P15-317 - AFNOR (2006). Liants hydrauliques - Ciments pour travaux à la mer.
- NF P15-318 - AFNOR (2006). Liants hydrauliques - Ciments à teneur en sulfures limitée pour béton précontraint.
- NF P15-319 - AFNOR (2006). Liants hydrauliques - Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates.
- NF P15-431 - AFNOR (1994). Liants hydrauliques - Technique des essais - Détermination du temps de prise sur mortier normal.
- NF P15-433 - AFNOR (1994). Méthodes d'essais des ciments - Détermination du retrait et du gonflement.
- NF P18-501 - AFNOR (1992). Additions pour béton hydraulique – Fillers.
- NF P18-508 - AFNOR (2012). Additions pour béton hydraulique - Additions calcaires - Spécifications et critères de conformité.
- NF P18-509 - AFNOR (2012). Additions pour béton hydraulique - Additions siliceuses - Spécifications et critère de conformité.
- NF P18-513 - AFNOR (2012). Additions pour béton hydraulique - Métakaolin - Spécifications et critères de conformité.
- NF P18-576 - AFNOR (1990). Granulats - Mesure du coefficient de friabilité des sables.
- NF P94-048 - AFNOR (1996). Sols : Reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en carbonate - Méthode du calcimètre.
- NF P94-049-1 - AFNOR (1998). Sols : Reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Partie 1 : Méthode de la dessiccation au four à micro-ondes.
- NF P94-050 - AFNOR (1995). Sols : Reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Méthode par étuvage.
- NF P94-051 - AFNOR (1993). Sols : Reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Limite de liquidité à la coupelle / Limite de plasticité au rouleau.
- NF P94-052-1 - AFNOR (1995). Sols : Reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Partie 1 : Limite de liquidité - Méthode au cône de pénétration.
- NF P94-054 - AFNOR (1991). Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la masse volumique des particules solides des sols - Méthode du pycnomètre à eau.
- NF P94-055 - AFNOR (1993). Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d'un sol - Méthode chimique.

- NF P94-056 - AFNOR (1996). Sols : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique - Méthode par tamisage à sec après lavage.
- NF P94-068 - AFNOR (1998). Sols : Reconnaissance et essais - Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tâche.
- NF P 94-072 - AFNOR (1995). Sols : reconnaissance et essais - Essai scissométrique en laboratoire.
- NF P94-078 - AFNOR (1997). Sols : Reconnaissance et essais - Indice CBR après immersion - Indice CBR immédiat - Indice Portant Immédiat - Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR.
- NF P94-093 - AFNOR (1999). Sols : Reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor normal — Essai Proctor modifié.
- NF P94-100 - AFNOR (1999). Sols : reconnaissance et essais - Matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Essai d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement.
- NF P94-102-1 - AFNOR (2001). Sols : reconnaissance et essais - Sol traité au liant hydraulique, éventuellement associé à la chaux, pour utilisation en couche de forme - Partie 1 : Définition - Composition - Classification.
- NF P98-234-1 - AFNOR (1992). Essais relatifs aux chaussées - Comportement au gel des matériaux traités aux liants hydrauliques - Partie 1 : Essai de résistance au gel-dégel des graves et sables traités.
- NF U42-001 - AFNOR (1981). Engrais - Dénominations et spécifications.
- NF U42-001-1 - AFNOR (2011). Engrais - Dénominations et spécifications - Partie 1 : Engrais minéraux.
- NF U44-001 - AFNOR (2009). Amendements minéraux basiques - Dénominations et spécifications.
- NF U44-051 - AFNOR (2010). Amendements organiques - Dénominations, spécifications et marquage.
- NF U44-095 - AFNOR (2008). Amendements organiques - Composts contenant des matières d'intérêt agronomique, issues du traitement des eaux.
- NF U 44-175 - AFNOR (1992). Supports de culture - Détermination de la capacité de rétention pour l'eau, l'air et de la masse volumique apparente sèche - Application de la mesure du volume.
- NF U44-203/A1 - AFNOR (2005). Matières fertilisantes ayant des caractéristiques mixtes - Amendements minéraux basiques - Engrais - Dénominations et spécifications.
- NF U44-551 - AFNOR (2002). Supports de culture - Dénominations, spécifications, marquage.
- NF X31-107 - AFNOR (2003). Qualité du sol - Détermination de la distribution granulométrique des particules du sol - Méthode à la pipette.
- NF X31-108 - AFNOR (2002). Qualité des sols - Détermination des cations Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+ extractibles par l'acétate d'ammonium - Méthode par agitation.
- NF X31-120 - AFNOR (2003). Qualité des sols - Détermination du cuivre, du fer, du manganèse et du zinc - Extraction par l'acétate d'ammonium en présence d'EDTA.
- NF X31-122 - AFNOR (1999). Qualité des sols - Extraction et dosage du bore soluble à l'eau bouillante.
- NF X31-130 - AFNOR (1999). Qualité des sols - Méthodes chimiques - Détermination de la capacité d'échange cationique (CEC) et des cations extractibles.
- XP P94-047 - AFNOR (1998). Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d'un matériau - Méthode par calcination.
- XP P94-090-1 - AFNOR (1997). Sols : reconnaissance et essais - Essai oedométrique - Partie 1 : essai de compressibilité sur matériaux fins quasi saturés avec chargement par paliers.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 4Vaultx-Jardin (1998). *Valorisation agronomique des sédiments marins et fluviaux de la Rance - Etudes et expérimentations préalables - Rapport final*. 34 p.
- ADEME (2001). *Les boues d'épuration municipales et leur utilisation en agriculture*, Dossier documentaire ADEME, réf. n°3832, 58 p.
- Agostini F. (2006). *Inertage et valorisation des sédiments de dragage marins*. Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, 207 p.
- Alaeipirali R. (2014). *Valorisation matière de cendres volantes papetières additionnées de ressources naturelles*. Université de Caen Basse-Normandie, Rapport de master 2 recherche IGL, 45 p + annexes.
- Alonso R., Romero M., Rincón J.M., Viguri J.R., Andrés A. (2008). *Leaching behaviour of sintered contaminated marine sediments*. *Fresenius Environmental Bulletin*, 17, pp 1736-1743.
- Alvarez-Guerra M., Canis L., Voulvoulis N., Viguri J.R., Linkov I. (2010). *Prioritization of sediment management alternatives using stochastic multicriteria acceptability analysis*. *Science of The Total Environment*, vol. 408, pp 4354-4367. doi: 10.1016/j.scitotenv.2010.07.016.
- Alviset L. (1987). *Matériaux de terre cuite*, Technique de l'ingénieur, C 905.
- Andrews S.S., Karlen D.L., Cambardella C.A. (2004). *The Soil Management Assessment Framework : A Quantitative Soil Quality Evaluation Method*. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 68, pp 1945-1962. doi: 10.2136/sssaj2004.1945.
- Anger B., They F., Levacher D. (2012). *Implementation of a minimum basic characterization of fine sediments in construction material for practical purposes*. *Proceedings of the 11th Japan-Korean-France-Canada Joint Seminar on Geoenvironmental Engineering*, pp 113-120.
- ANTEA (1999). *Projet de végétalisation d'une partie du parc à cendres EDF de Blénod-lès-Pont à Mousson (54) à l'aide de boues de dragage de la Moselle - Etude de faisabilité*. réf A18127/A, 22 p.
- Antoni M. (2013). *Investigation of cement substitution by blends of calcined clays and limestone*. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 224 p.
- Aouad G., Laboudigue A., Gineys N., Abriak N.E. (2012). *Dredged sediments used as novel supply of raw material to produce Portland cement clinker*. *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, pp 788-793. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.02.008.
- Baron J., Ollivier J.-P. (1996). *Les Bétons : Bases et données pour leur formulation*. Eyrolles, 522 p. ISBN 2212013167.
- Been K. (1980). *Stress strain behaviour of a cohesive soil deposited under water*, Ph.D. Thesis, Oxford University.
- Behmanesh J. (2008). *Etude de la durabilité d'un sédiment, traité au ciment et additifs*. Thèse de doctorat, Université de Caen, 216 p.
- Belas N., Besseghier N., Mebrouki A., Bouhamou N. (2009). *Vers une protection de l'environnement en valorisant la vase draguée du barrage comme composant du béton*. *Matériaux & Techniques*, vol. 97, pp 231-240. doi: 10.1051/mattech/2009039.
- Benamara L., Ouhba K., Hamwi A. (2013). *Elaboration d'une pouzzolane de synthèse à partir des sédiments de barrage*. *Déchets Sciences et Techniques*, n°65, pp 41-44.
- Benkaddour M., Kazi Aoual F., Semcha A. (2009). *Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle*. *Revue Nature et Technologie*, pp 63-73.
- Benkadja R., Benhadouga M., Benkadja A. (2013). *Quantification des matières en suspension et valorisation des sédiments de dragage à l'échelle d'un bassin semi-aride : Cas du barrage du K'sob (Algérie)*. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 72, pp 523-531. doi: 10.1007/s10064-013-0516-1.
- Bernardo G., Marroccoli M., Nobili M., Telesca A., Valenti G.L. (2007). *The use of oil well-derived drilling waste and electric arc furnace slag as alternative raw materials in clinker production*. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 52, pp 95-102. doi: 10.1016/j.resconrec.2007.02.004.

- Bernes Cabanne C. (2009). *Valorisation agricole des sédiments de dragage des voies navigables*. Rapport de Stage, ENTPE, 148 p.
- Bernier G. (2004). *Formulation des bétons*. Techniques de l'ingénieur, référence C2210, 26p.
- Bhatty J.I. (1995). *Role of minor elements in cement manufacture and use*. Research and Development Bulletin RD109T, Portland Cement Association, 40 p.
- Bibi M., Chikouche M.A., Ait tahar K. (2008). Influence des ajouts d'argiles gréseuses ou/et vaseuses sur les propriétés des matériaux cimentaires. *Matériaux & Techniques*, vol. 96, pp 165-172. doi: 10.1051/mattech:2008043.
- Boch P.(2001), *Matériaux et processus céramiques*, Hermès Science, 287p. ISBN 2-7462-0191-7.
- Bogue R.H., Lerch W. (1934). *Hydration of Portland Cement Compounds*. Ind. Eng. Chem., vol. 26, pp 837-847. doi: 10.1021/ie50296a007.
- Bonduelle (2007). *Charte d'approvisionnement 2007*. 28 p. URL: www.bonduelle.com/download/charte-approvisionnement.pdf.
- Bonnet J-P., Gaillard J-M. (2001). *Céramiques silicatées*, dans Boch P., *Matériaux et processus céramiques*, Hermès Science, 287p. ISBN 2-7462-0191-7.
- Bortone G., Palumbo L. (2007). *Sustainable management of sediment resources sediment and dredged material treatment*. Elsevier, 209p. ISBN 978-0-444-51963-4.
- Boucard L. (2006). *Valorisation de sédiments fluviaux stabilisés*. Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, 206 p.
- Bouhamou N., Mebrouki A., Belas N., Aggoun S., Benaissa A., Kheirbek A. (2011). *Valorisation des déchets naturels dans l'élaboration des nouveaux bétons et matériaux de construction*. 20^{ème} Congrès Français de Mécanique, 29 aout – 2 septembre 2011, Besançon, 6p.
- Boulvain F. (2012). *Une introduction aux processus sédimentaires*. Cours en ligne, Université de Liège - Département de Géologie, URL : <http://www2.ulg.ac.be/geolsed/processus/processus.htm>.
- Bourabah M.A. (2012). *Comportement mécanique des sols fins - Application à la valorisation des sédiments de barrages en technique routière*. Thèse de doctorat, Université Abou-Bekr Belkaid – Tlemcen, 236p.
- Bourret J. (1997). *La valorisation agronomique des sédiments marins de la Rance*. Courrier de l'environnement de l'INRA, pp 66-69.
- Boutouil M. (1998). *Traitement des vases de dragage par solidification/stabilisation à base de ciment et additifs*. Thèse de doctorat, Université du Havre, 279 p. ISBN 2-9505787-4-8.
- Boutouil M., Ben Abdelghani F., Saussaye L., Maherzi W. (2011). *Étude du comportement des sédiments de dragage marins à l'essai d'aptitude au traitement*. 2^{ème} Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime, 22 - 24 novembre 2011, Tanger, Maroc, pp 141-144. Doi : 10.5150/cmcm.2011.030
- Boutouil M., Saussaye L. (2011a). *Influence de l'ajout d'un correcteur granulométrique sur les propriétés des sédiments traités aux liants hydrauliques*. European Journal of Environmental and Civil engineering, vol. 15, pp 229-238. doi: 10.3166/ejece.15.229-238.
- Boutouil M., Saussaye L. (2011b). *Influence de l'ajout d'un correcteur granulométrique sur les propriétés des sédiments traités aux liants hydrauliques*. Revue Paralia, vol. 4, pp 8.1-8.11. doi: 10.5150/revue-paralia.2011.008.
- Bray R.N. (2008). *Environmental aspects of dredging*. Taylor & Francis, 396 p. ISBN 978-0-203-89489-7.
- Brequel H., Gineys N., Iwaszko A., Lucion C. (2013). *Principes et conditions de fonctionnement de la plateforme expérimentale Solindus de traitement des produits de dragage*. Recyclage & Valorisation, n° 41 spécial, pp 54-60.
- Bridges T.S., Apitz S.E., Evison L., Keckler K., Logan M., Nadeau S., Wenning R.J. (2006). *Risk-based decision making to manage contaminated sediments*. Integrated Environmental Assessment and Management, vol. 2, pp 51-58. doi: 10.1002/ieam.5630020110.

- Brils J., de Boer P., Mulder J., de Boer E. (2014). *Reuse of dredged material as a way to tackle societal challenges*. *Journal of Soils and Sediments*, pp 1-4. doi: 10.1007/s11368-014-0918-0.
- Buchwald A., Hohmann M., Posern K., Brendler E. (2009). *The suitability of thermally activated illite/smectite clay as raw material for geopolymer binders*. *Applied Clay Science*, vol. 46, pp 300-304. doi: 10.1016/j.clay.2009.08.026.
- Camuzard J.-P. (2011). *L'exploitation des tangues ou le souvenir des savoirs oubliés*. *Bulletin de la société géologique et minéralogique de Bretagne*, pp 1-32.
- Cantegrit L., Nouvion-Dupray S. (2011). *Valorisation agronomique des sédiments de dragage de canaux - Première expérimentation en Saône et Loire*. Présentation orale, Congrès européen Ecotechnologies, 7-9 juin 2011, Lille.
- Cantegrit L., Eisenlohr L. (2012). *Potentialité de relargage en éléments inorganiques d'un complexe sol agricole-sédiments de dragage de canaux non contaminés*. Présentation orale, Intersol'2012, 27-30 mars 2012.
- Capilla X., Schwartz C., Bedell J.-P., Sterckeman T., Perrodin Y., Morel J.-L. (2006). *Physicochemical and biological characterisation of different dredged sediment deposit sites in France*. *Environmental Pollution*, vol. 143, pp 106-116. doi: 10.1016/j.envpol.2005.11.007.
- Cassat P., Moudilou E., Le Rolland B. (2011). *Method of treating marine sediments and use of the resulting solid product in mortars or concretes*, n° de brevet US20110185950A1, 12 p.
- CE (2014). *Vers une économie circulaire: programme «zéro déchet» pour l'Europe*, Communication de la commission au parlement européen, au conseil, au comité économique et social européen et au comité des régions, COM(2014) 398 final/2, 17 p. url : <http://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2014/FR/1-2014-398-FR-F2-1.pdf>
- CETMEF (2012). *Enquête « Dragage 2009 » - Synthèse des données*. n° ISRN R12-05, 39 p.
- Chahal H. (2013). *Etude du comportement hydromécanique des sédiments pollués par les PCB en interaction avec les géomatériaux pour un stockage hors site*. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 237 p.
- Charonnat Y. (1999). *Fabrication du béton hydraulique*. Techniques de l'ingénieur, ref C2225, 39p.
- Chen J.-H., Huang J.-S., Chang Y.-W. (2009). *A preliminary study of reservoir sludge as a raw material of inorganic polymers*. *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp 3264-3269. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.05.006.
- Chen H., Ma X., Dai H. (2010). *Reuse of water purification sludge as raw material in cement production*. *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, pp 436-439. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.02.009.
- Chen J.-H., Huang J.-S., Chang Y.-W. (2011). *Use of reservoir sludge as a partial replacement of metakaolin in the production of geopolymers*. *Cement and Concrete Composites*, vol. 33, pp 602-610. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2011.03.002.
- Chiang K.-Y., Chien K.-L., Hwang S.-J. (2008). *Study on the characteristics of building bricks produced from reservoir sediment*. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 159, pp 499 – 504. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.02.046.
- CIMBETON (2005a). *Ciments et bétons - L'essentiel*. Référence B51. 36 p.
- CIMBETON (2005b). *Les constituants des bétons et des mortiers - Fiches Techniques (Tome 1)*. Référence G10. 71 p.
- CIMBETON (2009). *Terrassement et assises de chaussées - Traitement des sols aux liants hydrauliques*. Référence CT70, Collection technique Cimbéton, 151 p.
- Colin D. (2003). *Valorisation de sédiments fins de dragage en technique routière*. Thèse de doctorat, Université de Caen, 182 p.
- Commission Européenne (2007). *Document de référence sur les meilleures techniques disponibles - Fabrication des produits céramiques*. Référence MB/FS/EIPPCB/CER, http://www.ineris.fr/ipcc/sites/default/files/files/cer_bref_1206_VF_0.pdf.

- Corté J.-F., Schaeffner M., Morel G., Quibel A., Joubert J.-P. (1992). *Présentation du nouveau guide technique Réalisation des remblais et des couches de forme*. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 182, pp 33-48.
- Coungny G. (1990). *Spécifications sur les matières premières argileuses pour la fabrication de granulats légers expanses*. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, vol. 41, pp 47-55. doi: 10.1007/BF02590206.
- CP/RAC (2008). *Manual of Pollution Prevention in the Cement Industry*. Regional Activity Centre for Cleaner Production (CP/RAC) - Mediterranean Action Plan, 268 p. URL: www.cprac.org/docs/cemento_ang.pdf.
- Cura J.J., Bridges T.S., McArdle M.E. (2004). *Comparative Risk Assessment Methods and Their Applicability to Dredged Material Management Decision-Making*. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, vol. 10, pp 485-503. doi: 10.1080/10807030490452160.
- Dalton J.L., Gardner K.H., Seager T.P., Weimer M.L., Spear J.C.M., Magee B.J. (2004). *Properties of Portland cement made from contaminated sediments*. Resources, Conservation and Recycling, vol. 41, pp 227-241. doi: 10.1016/j.resconrec.2003.10.003.
- Damidot D., Abriak N.-E., Dubois V., Zentar R., Mac Farlane F., Bulteel D., Junqua G., Kada H., Kamali S., Retif H., et al. (2006). *Guide technique régional relatif à la méthodologie de gestion des sédiments de dragage portuaire - Plan régional d'élimination des déchets industriels spéciaux (PREDIS) Nord-Pas-de-Calais*. 422 p.
- Dang T.A. (2011). *Valorisation des sédiments marins bretons comme matériaux de construction*. Thèse de doctorat, INSA de Rennes, 209 p.
- Davidovits J. (1991). *Geopolymers : inorganic polymeric new materials*, Journal of thermal analysis, vol. 37 (8), pp. 1633-1656. doi: 10.1007/BF01912193.
- Delaittre J. (2013). *Valorisation des sédiments : Etude de faisabilité complémentaire*. Rapport de projet de fin d'études, ENSCI, 18 p.
- Depelsenaire G. (2007). *Procédé de stabilisation de résidus minéraux contaminés par des métaux lourds et des composés organiques*. Intersol, 27-29 mars 2007, présentation orale.
- Dermatas D., Dutko P., Balorda-Barone J., Moon D.H. (2003). *Evaluation of engineering properties of cement treated Hudson River dredged sediments for reuse as fill materials*. J. Marine Environ. Eng., Vol. 7, pp 101-123.
- Detzner H, Schramm W, Doring U, Bode W (1998). *New technology of mechanical treatment of dredged material from Hamburg Harbour*. Water Science and Technology, vol. 37, pp 337-343.
- Dosi A., Bourchy A., Bolognesi J., Bonay E., Grabarski G., Guillermin D., Jouteux F., Merlen K., Cota Meza L. (2013). *Valorisation des sédiments : Etude exploratoire de leur insertion dans la filière céramique*. Rapport de projet de 2^{ème} année, ENSCI, 37 p.
- Douglas W.S., Maher A., Jafari F. (2005). *Analysis of environmental effects of the use of stabilized dredged material from New York/New Jersey Harbor, USA, for construction of roadway embankments*. Integrated Environmental Assessment and Management, vol. 1, pp 355-364. doi: 10.1897/1551-3793(2005)1[355:AOEEOT]2.0.CO;2.
- DREAL Nord - Pas-de-Calais (2012). *Sédiments - Gestion à terre - Quelle réglementation ?*. 12 p. url : http://www.nord-pas-de-calais.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/dreal_2012_sediments.pdf.
- DREAL Rhône-Alpes (2013). *Cadre régional « matériaux et carrières » - Phase 4 : Transport*. 88 p. ISBN 978-2-11-129814-9.
- Driscoll S.B.K., Wickwire W.T., Cura J.J., Vorhees D.J., Butler C.L., Moore D.W., Bridges T.S. (2002). *A Comparative Screening-Level Ecological and Human Health Risk Assessment for Dredged Material Management Alternatives in New York/New Jersey Harbor*. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, vol. 8, pp 603-626. doi: 10.1080/20028091057105.
- Duan Z. (2008). *Caractérisation, stabilisation et solidification de sédiments fins marins*. Thèse de doctorat, Université de Caen Basse-Normandie, 145 p.

- Dubois V. (2006). *Etude du comportement physico-mécanique et caractérisation environnementale des sédiments marins – Valorisation en technique routière*. Thèse de doctorat, ENSM de Douai, 291 p.
- Dubois V., Abriak N.E., Zentar R., Ballivy G. (2009). *The use of marine sediments as a pavement base material*. Waste Management, vol. 29, pp 774-782. doi: 10.1016/j.wasman.2008.05.004.
- Dubrulle-Brunaud C. (2007). *Les sédiments fins dans un système macrotidal actuel (continuum Seine-Baie de Seine) : caractérisations géochimiques et minéralogiques, identification des sources*. Thèse de doctorat, Université de Rouen, 332 p.
- Eades J.L., Grim R.E. (1966). *A quick test to determine lime requirements for lime stabilization*. Highway Research Record, pp 61-72.
- EDF (1997). *Gestion des dépôts des ouvrages hydrauliques - Tome 1 : Recueil des connaissances*. Document interne, EDF.
- EDF/IME (2010). *Conception et gestion durable des barrages en Méditerranée - Rapport régional sur la gestion des sédiments dans les barrages en méditerranée*. Rapport de l'atelier régional organisé par l'Institut Méditerranéen de l'Eau, 13 - 14 décembre 2010, Marseille (France), 245 p.
- EDF (2011). *L'usine marémotrice de la Rance : plus de 40 ans d'exploitation au service d'une production d'électricité renouvelable sans CO₂*. Dossier de presse, 12p.
- EDF (2011). *Analyse du cycle de vie du kWh hydraulique EDF*. ref n° H-E22-2010-01295-FR, Document interne, EDF R&D, 66 p.
- El Fgaier F., Lafhaj Z., Chapiseau C. (2013). *Use of clay bricks incorporating treated river sediments in a demonstrative building: Case study*. Construction and Building Materials, vol. 48, pp 160-165. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.030.
- Emmel T. (2002). EP 1 170 266 B1. *Blähfähiges Stoffgemisch zur Herstellung eines Leichtgranulats (Expandable Raw Mixture for Producing Light Weight Aggregates)*, European Patent Office, 9th January, 2002.
- Environnement Magazine (2012). *Du mobilier urbain avec des sédiments fluviaux*, n°1711.
- ESCOPE/ASCAL (2008). *Suivi de la végétalisation du parc à cendres de la centrale thermique EDF à Blénod-lès-Pont-à-Mousson - Rapport provisoire*, 73p.
- Fall M., Rangeard D., Jaubertie R., Rendell F., Molez L. (2009). *Traitement de vase fluviale en vue d'une utilisation routière*. 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, 12-14 octobre 2009, ENSET Oran (Algeria), pp 263-270.
- Fantozzi G., Le Galet S., Nièpce J.-C. (2011). *Science & Technologies Céramiques*. EDP Sciences / GFC. 834 p. ISBN 978-2-7598-0428-3.
- Faure A. (2014). *Opportunités géographiques de valorisation pour les sédiments de barrage gérés à terre*. Mémoire de stage de fin d'études d'ingénieur AgroParisTech, EDF R&D, 100 p.
- Favier A. (2013). *Mécanisme de prise et rhéologie de liants géopolymères modèles*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 246 p.
- Feng T.-W., Lee J.-Y., Lee Y.-J. (2001). *Consolidation behavior of a soft mud treated with small cement content*. Engineering Geology, vol. 59, pp 327-335. doi: 10.1016/S0013-7952(01)00021-7.
- Fernandez Lopez R. (2009). *Calcined of clayey soils as a potential replacement for cement in developing countries*. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 153 p.
- Ferone C., Colangelo F., Cioffi R., Montagnaro F., Santoro L. (2012). *Use of reservoir clay sediments as raw materials for geopolymer binders*. Advances in Applied Ceramics, doi: 10.1179/1743676112Y.0000000064.
- Ferreira V. (2003). *Valorisation agricole des sédiments marins de la Rance : Bilan des premières opérations et perspectives agronomiques*. Rapport de stage, ENSAR, 50 p.
- Flament P., Vandeneede V., Brequel H., Iwaszko A., Lardot V. (2013). *Traitement et valorisation céramique des fines de sédiments de dragage pollués*. Recyclage & Valorisation, n° 41 spécial, pp 28-35.

- Foucher J.M. (2003). *Etude de valorisation des sédiments de dragage du chenal de la Seine en technique routière*. Rapport DESS Gelipode, Université de Caen Basse-Normandie, 89 p.
- Frar I., Allal L.B., Ammari M., Azmani A. (2014). *Utilisation des sédiments de dragage portuaire comme matière première dans la fabrication des briques en terre cuite*. Journal of Materials and Environmental Science, vol. 5, pp 390-399.
- Gadayev A., Kodess B. (1999). *By-product materials in cement clinker manufacturing*. Cement and concrete research, vol. 29, pp 187-191.
- Gineys N. (2011). *Influence de la teneur en éléments métalliques sur les propriétés techniques et environnementales du ciment Portland*. Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Douai, 180 p.
- Gippini E. (1969). *Contribution à l'étude des propriétés de moulage des argiles et des mélanges optimaux*. L'industrie céramique, n°619, pp 423-435.
- Global Cement (2012). *Global Cement Directory 2012*, 164 p.
- Göl C. (2006). *Production of ceramic tiles by using marine sludge additives*. MSc Thesis, Izmir Institute of Technology, 94 p.
- Gouré-Doubi H., Lecomte-Nana G., Théry F., Peyratout C., Anger B., Levacher D. (2014). *Characterization and valorization of dam sediment in ceramic materials*, (soumis à la revue).
- Hamer K., Karius V. (2002). *Brick production with dredged harbour sediments. An industrial-scale experiment*. Waste Management, vol. 22, pp 521-530, doi: 10.1016/S0956-053X (01)00048-4.
- Hamer K., Hadelér A., Muschalla T., Schröter J., Timmer G. (2003). *Light Weight Aggregates made from Dredged Harbour Sediments*. J Soils & Sediments, vol. 3, pp 284-291. doi: 10.1065/jss2003.04.077.
- Hansbo S. (1957). *A New Approach to the Determination of the Shear Strength of Clay by the Fall-cone Test*. Royal Swedish Geotechnical Institute, 46 p.
- Hewlett P. (2003). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete (Fourth Edition)*. Butterworth-Heinemann, 1092 p. ISBN 0750662565.
- Holtz R.D., Kovacks W.D. (1991). *Introduction à la géotechnique*. Éditions de l'École polytechnique de Montréal, 836 p. ISBN 978-2-553-00222-9.
- Holtzapffel T. (1985). *Les minéraux argileux. Préparation. Analyse diffractométrique et détermination*. Société géologique du Nord, n° 12, 136 p.
- Hong G.H., Kim S.H., Suedel B.C., Clarke J.U., Kim J. (2010). *A decision-analysis approach for contaminated dredged material management in South Korea*. Integrated Environmental Assessment and Management, vol. 6, pp 72-82. doi: 10.1897/IEAM_2009-033.1.
- Horckmans L., Nielsen P., Van Cleemput J., Dockx J. (2013). *VAMORAS - Valorization of mechanically dewatered dredged sediments*. 8th International SedNet conference, 6-9 November 2013, Lisbon, Portugal.
- Huang C., Pan J.R., Sun K.D., Liaw C.T. (2001). *Reuse of water treatment plant sludge and dam sediment in brick-making*. Water Sci. Technol., vol. 44, pp 273-277.
- Jauberthie R., Rendell F., Rangeard D., Molez L. (2010). *Stabilisation of estuarine silt with lime and/or cement*. Applied Clay Science, vol. 50, pp 395-400. doi: 10.1016/j.clay.2010.09.004.
- JOCE (1999). *Directive n° 1999/31/CE du 26/04/99 concernant la mise en décharge des déchets*. Journal officiel des Communautés européennes n° L 182 du 16 juillet 1999.
- JOCE (2003). *Décision n° 2003/33/CE du 19/12/02 établissant des critères et des procédures d'admission des déchets dans les décharges, conformément à l'article 16 et à l'annexe II de la directive 1999/31/CE*. Journal officiel des Communautés européennes L 11 du 16 janvier 2003.
- JORF (1919). *Loi du 16/10/19 relative à l'utilisation de l'énergie hydraulique*. Journal Officiel de la République Française du 18 octobre 1919.
- JORF (1992). *Loi n° 92-3 du 03/01/92 sur l'eau*. Journal Officiel de la République Française n° 3 du 4 janvier 1992.

- JORF (1994). *Arrêté du 22/09/94 relative aux exploitations de carrières et aux installations de premier traitement des matériaux de carrières*. Journal Officiel de la République Française n° 246 du 22 octobre 1994.
- JORF (1998a). *Arrêté du 08/01/98 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n° 97-1133 du 08/12/97 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées*. Journal Officiel de la République Française n°26 du 31 Janvier 1998.
- JORF (1998b). *Arrêté du 02/02/98 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation*. Journal Officiel de la République Française n° 52 du 3 mars 1998.
- JORF (1999). *Arrêté du 21 décembre 1998 relatif à l'homologation des matières fertilisantes et des supports de culture*. Journal Officiel de la République Française n°36 du 12 février 1999.
- JORF (2000). *Arrêté du 03/04/2000 relatif à l'industrie papetière*. Journal Officiel de la République Française n° 139 du 17 juin 2000.
- JORF (2003). *Arrêté du 27 juin 2003 portant application aux granulats et enrochements du décret n° 92-647 du 8 juillet 1992 concernant l'aptitude à l'usage des produits de construction, modifié par le décret n° 95-1051 du 20 septembre 1995*. Journal Officiel de la République Française n°167 du 22 juillet 2003.
- JORF (2003). *Arrêté du 30/12/02 relatif au stockage de déchets dangereux*. Journal Officiel de la République Française n° 90 du 16 avril 2003.
- JORF (2006). *Arrêté du 09/08/06 relatif aux niveaux à prendre en compte lors d'une analyse de rejets dans les eaux de surface ou de sédiments marins, estuariens ou extraits de cours d'eau ou canaux relevant respectivement des rubriques 2.2.3.0, 4.1.3.0 et 3.2.1.0 de la nomenclature annexée au décret n° 93-743 du 29 mars 1993*. Journal Officiel de la République Française n° 222 du 24 septembre 2006.
- JORF (2006a). *Loi n° 2006-1772 du 30/12/06 sur l'eau et les milieux aquatiques*. Journal Officiel de la République Française n° 303 du 31 décembre 2006 et rectificatif n° 17 du 20 janvier 2007.
- JORF (2006b). *Arrêté du 09/08/06 relatif aux niveaux à prendre en compte lors d'une analyse de rejets dans les eaux de surface ou de sédiments marins, estuariens ou extraits de cours d'eau ou canaux relevant respectivement des rubriques 2.2.3.0, 4.1.3.0 et 3.2.1.0 de la nomenclature annexée au décret n° 93-743 du 29 mars 1993*. Journal Officiel de la République Française n° 222 du 24 septembre 2006.
- JORF (2008). *Arrêté du 30/05/08 fixant les prescriptions générales applicables aux opérations d'entretien de cours d'eau ou canaux soumis à autorisation ou à déclaration en application des articles L. 214-1 à L. 214-6 du code de l'environnement et relevant de la rubrique 3.2.1.0 de la nomenclature annexée au tableau de l'article R. 214-1 du code de l'environnement*. Journal Officiel de la République Française n° 147 du 25 juin 2008.
- JORF (2010a). *Arrêté du 28/10/10 relatif aux installations de stockage de déchets inertes*. Journal Officiel de la République Française n° 265 du 16 novembre 2010.
- JORF (2010b). *Décret n° 2010-369 du 13/04/10 modifiant la nomenclature des installations classées*. Journal Officiel de la République Française n° 87 du 14 avril 2010.
- JOUE (2003). *Règlement (CE) n°2003/2003 du parlement européen et du conseil du 13 octobre 2003 relatif aux engrais*. Journal Officiel de l'Union Européenne n°L304/1 du 21/11/2003.
- Kamali S., Bernard F., Abriak N.E., Degrugilliers P. (2008). *Marine dredged sediments as new materials resource for road construction*. Waste Management, vol. 28, pp 919-928. doi: 10.1016/j.wasman.2007.03.027.
- Karius V., Hamer K. (2001). *pH and grain-size variation in leaching tests with bricks made of harbour sediments compared to commercial bricks*. Science of The Total Environment, vol. 278, 73-85 pp, doi: 10.1016/S0048-9697(00)00889-5.
- Keller P., Bouchard J.-P. (1983). *Etude bibliographique de l'alluvionnement des retenues par des sédiments fins - Mécanismes physiques et moyens de lutte*. Ref n° H-E40-1983-00926-FR, EDF R&D, 79 p.

- Khadraoui S. (2013). *Etude des caractéristiques géomécaniques et hydrauliques de sédiments de barrage*. Rapport de stage, Laboratoire M2C, 67 p.
- Kham-Khoep A., Jigorel A. (1997). *Etude de la stabilisation à la chaux et au ciment des sédiments de l'estuaire de la Rance - Site expérimental de Lyvet*. Rapport INSA Rennes, 66 p.
- Kiker G.A., Linkov I., Bridges T.S. (2007). *Integrating Comparative Risk Assessment and Multicriteria Decision Analysis*. Dans « Environmental Security in Harbors and Coastal Areas », pp 37-51. ISBN : 978-1-4020-5800-4.
- Kikuchi R. (2001). *Recycling of municipal solid waste for cement production: pilot-scale test for transforming incineration ash of solid waste into cement clinker*. Resources, Conservation and Recycling, vol. 31, pp 137-147. doi: 10.1016/S0921-3449(00)00077-X.
- Kim J., Kim S.H., Hong G.H., Suedel B.C., Clarke J. (2010). Multicriteria decision analysis to assess options for managing contaminated sediments: Application to Southern Busan Harbor, South Korea. *Integrated Environmental Assessment and Management*, vol. 6, pp 61-71. doi: 10.1897/IEAM_2009-032.1.
- Kornmann M., Lafaurie P., Andriamitantoa L., Dorgeret I., Dupont O., Laurent G., Panlenzuela D., Perrin P., Volland T., Wojewodka C. (2005). *Matériaux de construction en terre cuite - Fabrication et propriétés*. Ed. Septima, 275 p. ISBN 2-904845-32-1.
- Kornmann M. (2006). *La courbe de Bigot revisitée*. L'industrie céramique et verrière, n°1005, pp 44-54.
- Kornmann M. (2009). *Matériaux de terre cuite - Matières de base et fabrication*. Techniques de l'ingénieur, ref C905, 26 p.
- Kozlova S., Shimanovich S. and Meyer C. (2002). *Decontamination and solidification by adding a lime-based binder, letting the mixture cool to room temperature, and adding a chelating agent; also producing filler from the product and adding it to concrete*. US 20040158114.
- Krausová K. (2013). *Vers de nouvelles matrices minérales pour l'immobilisation et la valorisation des déchets ultimes de l'incinération des déchets ménagers*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 269 p.
- Kübler, B. (1968). *Evaluation quantitative du métamorphisme par la cristallinité de l'illite. Etat des progrès réalisés ces dernières années*. Bulletin du Centre de Recherche de Pau - SNPA, vol. 2, pp 385-397.
- Kynch G.F. (1952). *A theory of sedimentation*, Faraday Society Transactions, 48, pp. 166-176.
- Lafhaj Z., Saliceto A., Cohen Solal L., Coudray Y., Trung Truc H., Le Guen B., Federico A. (2007). *The use of the Novosol process for the treatment of polluted marine sediment*. Journal of Hazardous Materials, vol. 148, 606-612 pp.
- Lafhaj Z., Samara M., Agostini F., Boucard L., Skoczylas F., Depelsenaire G. (2008). *Polluted river sediments from the North region of France: Treatment with Novosol® process and valorization in clay bricks*. Construction and Building Materials, vol. 22, pp 755-762.
- Laronne J. B., (2000). *Sédimentation et barrages : Implications géomorphologiques, économiques et environnementales du comblement des réservoirs. Relation avec les extractions de matériaux fluviaux*. Aménagement et nature, n°136, pp. 101-111.
- Lauters F., Laperrousaz E., Camenen B., Coz J.L., Thollet F., Némery J., Delinares M. (2012). *Vers une gestion sédimentaire durable de l'aménagement hydro-électrique Arc-Isère*. La Houille Blanche, pp 19-25. doi: 10.1051/lhb/2012003.
- Lautrin D. (1989). *Utilisation pratique des paramètres dérivés de l'essai au bleu de méthylène dans les projets de génie civil*. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°160, pp 53-65.
- La Voix Du Nord (2012a). *À Sita Nord, le recyclage des déchets appliqué à la fabrication du béton*. LaVoixduNord.fr, <<http://www.lavoixdunord.fr/region/a-sita-nord-le-recyclage-des-dechets-applique-a-la-jna35b0n512162>> (consulté le 15/06/2012).
- La Voix Du Nord (2012b). *Vers des bétons plus écologiques ? L'espoir est au fond du canal*. <http://www.lavoixdunord.fr/economie/vers-des-betons-plus-ecologiques-l-espoir-est-au-fond-jna0b0n525666> (consulté le 19/06/2012).

- Lemée F. (2006). *Traitement par alcali-activation de sédiments fins marins, non contaminés et à faible teneur en eau. Mise au point d'un procédé de stabilisation*. Thèse de doctorat, Université de Caen, 187 p.
- Lemière B., Michel P., Jacob J., Haouche L., Laboudigue A. (2012). *L'outil d'aide à la décision GeDSeT: évaluer les impacts et bénéfices de différentes options de gestion des sédiments*. Recyclage et Valorisation (Société de l'Industrie Minérale), n° 36, pp 52-58.
- Lemière B., Michel P., Alary C., Haouche L., Brequel H., Jacob J., Gineys N., Laboudigue A. (2013). *Novel scenarios for sustainable waterway sediments management deduced from a decision-support tool*. Proceedings of the 8th International SedNet conference, 6-9 novembre 13, Lisbonne, Portugal, p 24.
- LeMoniteur.fr (2014). *Du mobilier en béton à base de granulats recyclés*. <<http://www.lemoniteur.fr/183-recherche-developpement/article/actualite/23592877-du-mobilier-en-beton-a-base-de-granulats-recycles30/01/2014>> (consulté le 05/02/2014).
- Le Roux A., Unikowski Z. (1980). *Mise en évidence de l'influence des fines argileuses dans les granulats à béton*. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°110, pp 101-108.
- Lesueur D., Puiatti D., Herrier G. (2011). *Chaux aérienne - Applications en Génie Civil*. Technique de l'ingénieur, C5445, 14p.
- Levacher D., Colin D., Peroni A.P., Duan Z., Sun L. (2006). *Recyclage et valorisation de sédiments fins de dragage à usage de matériaux routiers*. IX^{èmes} Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, 12-14 septembre 2006, Brest, pp 603-612.
- Levacher D., Dhervilly P. (2010). *Déshydratation mécanisée in situ de sédiments fraîchement dragués ou mis en dépôts : le projet SEDIGATE I*. XI^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, 22-25 juin 2010, Les Sables d'Olonne, pp 859-868 doi:10.5150/jngcgc.2010.093-L.
- Levacher D., Sanchez M. (2011). *Characterization of marine sediments for a reuse in land disposal and embankment*. European Journal of Environmental and Civil engineering, vol. 15, pp 167-178. doi: 10.3166/ejece.15.167-178.
- Levacher D., Sanchez M., Duan Z., Liang Y. (2011). *Valorisation en unité pilote de sédiments méditerranéens : étude des caractéristiques géotechniques et de la perméabilité*. Revue Paralia, vol. 4, pp 4.1-4.20. doi: 10.5150/revue-paralia.2011.004.
- Liang Y., Levacher D., Cherifi N. (2011). *Amélioration du comportement mécanique de sédiments stabilisés au ciment par un renforcement à base de fibres*. II^{ème} Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime, Tanger, Maroc, pp 199-204. doi:10.5150/cmcm.2011.043.
- Liang Y. (2012). *Co-valorisation de sédiments et de sols fins par apport de liants et de fibres*. Thèse de doctorat, Université de Caen, 194 p.
- Limeira J. (2011). *The beneficial use of dredged marine sand as an alternative material for concrete*. Thèse de doctorat, Polytechnic University of Catalonia, 185p.
- Linkov I., Sahay S., Kiker G., Bridges T., Seager T.P. (2005). *Multi-Criteria Decision Analysis: A Framework for Managing Contaminated Sediments*. Strategic Management of Marine Ecosystems, Springer, pp 271-297. ISBN : 978-1-4020-3157-1.
- Linkov I., Satterstrom F.K., Yatsalo B., Tkachuk A., Kiker G.A., Kim J., Bridges T.S., Seager T.P., Gardner K. (2007). *Comparative assessment of several multi-criteria decision analysis tools for management of contaminated sediments*. Environmental Security in Harbors and Coastal Areas, Springer, pp 195-215. ISBN 978-1-4020-5800-4.
- Lin Y., Zhou S., Li F., Lin Y. (2012). *Utilization of municipal sewage sludge as additives for the production of eco-cement*. Journal of Hazardous Materials, vol. 213-214, pp 457-465. doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.02.020.
- MacDonald D.D., Ingersoll C.G., Berger T.A. (2000). *Development and Evaluation of Consensus-Based Sediment Quality Guidelines for Freshwater Ecosystems*. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, vol. 39, pp 20-31. doi: 10.1007/s002440010075.
- Magnan J.-P., Mieussens C., Soyeux B., Vautrain J. (1985). *Essais œdométriques*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Méthodes d'essai LCP, n°13, 83 p. ISBN 2-7208-3130-1.

- Maher A., Bennert T., Jafari F., Douglas W., Gucunski N. (2004). *Geotechnical properties of stabilized dredged material from New York-New Jersey Harbor*. Transportation Research Record, vol. 1874, pp 86-96. doi: 10.3141/1874-10.
- Maherzi W., Saussaye L., Boutouil M. (2012). *Aptitude au traitement et comportement mécanique des sédiments de dragage*. XII^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, 12-14 juin 2012, Cherbourg, France, pp 1059-1066. Doi : 10.5150/jngcgc.2012.116-M.
- Malavoi J.-R., Garnier C.-C., Landon N., Recking A., Baran P. (2011). *Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière*. ONEMA, 216 p.
- MATE (1997). Critères et méthodes d'évaluation de l'écotoxicité des déchets, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE), décembre 1997, 19 pp.
- Mazouzi W., Kacimi L., Cyr M., Clastres P. (2011). *Fabrication d'un ciment bélitique réactif par un procédé hydrothermal en utilisant une vase de barrage hydraulique*. pp 7.
- MEDDE (1999). *Circulaire du 17/12/98 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement - Arrêté ministériel du 2 février 1998 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation, modifié par l'arrêté du 17 août 1998*. Bulletin officiel du ministère chargé de la protection de l'environnement n° 99/2 p. 117-126.
- MEDDE (2002). Note juridique sur la gestion des sédiments extraits des cours d'eau et canaux. Note juridique du 18 septembre 2002, 7 p.
- MEDDE (2011). *Circulaire du 24/12/10 relative aux modalités d'application des décrets n° 2009-1341, 2010-369 et 2010-875 modifiant la nomenclature des installations classées exerçant une activité de traitement de déchets*. BO du MEDDE n° 1 du 25 janvier 2011.
- Mezencevova A., Yeboah N.N., Burns S.E., Kahn L.F., Kurtis K.E. (2012). *Utilization of Savannah Harbor river sediment as the primary raw material in production of fired brick*. Journal of Environmental Management, vol. 113, pp 128-136. doi: 10.1016/j.jenvman.2012.08.030.
- Michel F., Courard L. (2006). *Apport de la granulométrie laser dans la caractérisation physique des fillers calcaires*. 7^{ème} Journées Scientifiques du regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton, 19-20 juin 2006, Toulouse, France, pp 40-49.
- Migniot C. (1989). *Tassement et rhéologie des vases. Première partie*. La Houille Blanche, pp 11-29. doi: 10.1051/lhb/1989001.
- Millrath K. (2003). *Modifying concrete matrices with beneficiated dredged material or other clayey constituents*, Thèse de doctorat, Columbia University, 134 p.
- Miraoui M. (2010). *Mise en œuvre d'une démarche de prétraitement et de traitement des sédiments de dragage en vue d'une valorisation dans le génie civil*. Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Douai, 225 p.
- Miraoui M., Zentar R., Abriak N.-E. (2012). *Road material basis in dredged sediment and basic oxygen furnace steel slag*. Construction and Building Materials, vol. 30, pp 309-319. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.11.032.
- Monshi A., Asgarani M.K. (1999). *Producing Portland cement from iron and steel slags and limestone*. Cement and Concrete Research, vol. 29, pp 1373-1377. doi: 10.1016/S0008-8846(99)00028-9.
- Moore D.M., Reynolds R.C. (1989). *X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals*. Oxford University Press, 360 p. ISBN 9780195051704.
- Mouvet C. (2013). *Test du protocole d'écotoxicologie (critère H14) pour l'évaluation du caractère dangereux de sédiments destinés à une gestion à terre. Rapport final*. BRGM, référence RP-61420-FR, 51 p.
- Najet E. (2013). *Formulation de liant aluminosilicaté de type géopolymère à base de différentes argiles Tunisiennes*. Thèse de doctorat, Université de Limoges, 182 p.

- Nguyen T.B. (2008). *Valorisation des sédiments de dragage traités par le procédé NOVOSOL® dans des matériaux d'assises de chaussée - Comportement mécanique et environnemental*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 248 p.
- Obana M., Levacher D., Dhervilly P. (2010). *Durability properties of marine sediment stabilized by pozzolan and alkali activated binders*. XI^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil Les Sables d'Olonne, 22-25 juin 2010. pp 887-894 doi:10.5150/jngcgc.2010.096-O.
- Oen A.M.P., Sparrevik M., Barton D.N., Nagothu U.S., Ellen G.J., Breedveld G.D., Skei J., Slob A. (2010). *Sediment and society: an approach for assessing management of contaminated sediments and stakeholder involvement in Norway*. Journal of Soils and Sediments, vol. 10, pp 202-208. doi: 10.1007/s11368-009-0182-x.
- OFEV (2005). *Guide - Elimination des déchets dans les cimenteries*, Office fédéral de l'environnement, VU-3002-F, 30 p. url : <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00444/index.html?lang=fr>.
- OFRIR2 (2013). *Catégories de matériaux - Sédiment de dragage*. <<http://ofrir2.ifsttar.fr/materiaux/categories-de-materiaux/materiaux-naturels-hspec/sediment-de-dragage/>> (consulté le 09/12/2013).
- OJEC (2000). *Directive 2000/60/EC of the European parliament and of the council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy*. Official Journal of the European Communities, n° 327.
- OJEU (2008). *Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives*. Official Journal of the European Union n° L 312.
- Pan J.R., Huang C., Kuo J.-J., Lin S.-H. (2008). *Recycling MSWI bottom and fly ash as raw materials for Portland cement*. Waste Management, vol. 28, pp 1113-1118. doi: 10.1016/j.wasman.2007.04.009.
- Paute J.L., Mace Y. (1968). *Le pénétromètre de consistance - Evaluation de la consistance des sols fins*. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°33, pp 105-116.
- PIANC (2009). *Dredged material as a resource*. Report n° 104, 54p. ISBN 978-2-87223-171-3.
- Pliskin L. (1992). *Le béton*. Culture & Technique, n°26, pp 58-64.
- Pliskin L. (1993). *La Fabrication du ciment*. Eyrolles, 213 p. ISBN 9782212011968.
- Puertas F., García-Díaz I., Barba A., Gazulla M.F., Palacios M., Gómez M.P., Martínez-Ramírez S. (2008). *Ceramic wastes as alternative raw materials for Portland cement clinker production*. Cement and Concrete Composites, vol. 30, pp 798-805. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2008.06.003.
- R&V (2012). *Sédiments portuaires de Dunkerque, drague sur la route*. Recyclage et Valorisation, n°38, pp 8-11. ISSN : 1792-9020
- Remini B. (2006). *Valorisation de la vase des barrages - Quelques exemples Algériens*. Larhyss Journal, vol. 05, pp 75-89.
- Rey F. (1999). *Etude physico-mécanique et environnementale du composite vase-chaux et additifs*. Thèse de doctorat, Université de Caen, 272 p.
- Riley C.M. (1951). *Relation of Chemical Properties to the Bloating of Clays*. Journal of the American Ceramic Society, vol. 34, pp 121-128. doi: 10.1111/j.1151-2916.1951.tb11619.x.
- Rodriguez O., Kacimi L., López-Delgado A., Frías M., Guerrero A. (2013). *Characterization of Algerian reservoir sludges for use as active additions in cement: New pozzolans for eco-cement manufacture*. Construction and Building Materials, vol. 40, pp 275-279. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.10.016.
- Romero M., Andrés A., Alonso R., Viguri J., Rincón J.M. (2008). *Sintering behaviour of ceramic bodies from contaminated marine sediments*. Ceramics International, vol. 34, pp 1917-1924.
- Romero M., Andrés A., Alonso R., Viguri J., Rincón López J.M. (2009a). *Valorisation of contaminated marine sediments to produce ceramic construction materials*. 1st spanish national conference on advances in materials recycling and eco-energy, Madrid, Spain, 12-13 novembre 2009. pp 45-48.

- Romero M., Andrès A., Alonso R., Viguri J., Rincón J.M. (2009b). *Phase evolution and microstructural characterization of sintered ceramic bodies from contaminated marine sediments*. Journal of the European Ceramic Society, vol. 29, pp 15-22. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2008.04.038.
- Samara M. (2007). *Valorisation des sédiments fluviaux pollués après inertage dans la brique cuite*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 139p.
- Samara M., Rozière E., Khokhar M., Loukili A., Skoczylas F. (2008). *Valorisation des sédiments traités dans les bétons autoplaçants*. XXVI^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil, 4-6 juin 2008, Nancy, 9p.
- Samara M., Lafhaj Z., Chapiseau C. (2009). *Valorization of stabilized river sediments in fired clay bricks: Factory scale experiment*. Journal of Hazardous Materials, vol. 163, pp 701-710. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.07.153.
- Sanchez M., Grovel A. (1993). *Modélisation du tassement sous poids propre des couches de vase molle et saturée, sur un fond imperméable*. La Houille Blanche, pp 29-34. doi: 10.1051/lhb/1993002.
- Sanchez M. (2000). *Dynamique des sédiments fins en milieu marin et agitation portuaire*, Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Caen, 82p. + annexes.
- Sannier L. (2008). *Limites et performances des caractéristiques mécaniques et environnementales de sédiments marins contaminés traités par liant hydraulique - Application au pilote SEDI.MAR.D. 83*. Mémoire de stage de master II « génie côtier », Université de Caen, 106 p.
- Sannier L., Levacher D., Jourdan M. (2009). *Approche économique et validation de méthodes de traitements aux liants hydrauliques de sédiments marins contaminés*. Revue Paralia, vol. 2, pp s2.1-s2.15. doi: 10.5150/revue-paralia.2009.s02.
- Sano K. (2012). *Application of site investigation technologies to dam sediments*. Rapport de stage, Laboratoire M2C, 25 p.
- Scheffler A., Roth T., Ahlf W. (2014). *Sustainable decision making under uncertainty: a case study in dredged material management*. Environmental Sciences Europe, vol. 26, 12 p. doi:10.1186/2190-4715-26-7.
- Schlosser F. (2003). *Eléments de mécanique des sols*. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 276 p. ISBN 2-85978-104-8.
- Schneider M., Romer M., Tschudin M., Bolio H. (2011). *Sustainable cement production -present and future*. Cement and Concrete Research, vol. 41, pp 642-650. doi: 10.1016/j.cemconres.2011.03.019.
- Schoon J., Van der Heyden L., Eloy P., Gaigneux E.M., De Buysser K., Van Driessche I., De Belie N. (2012). *Waste fibrecement: An interesting alternative raw material for a sustainable Portland clinker production*. Construction and Building Materials, vol. 36, pp 391-403. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.095.
- Schoon J., De Buysser K., Van Driessche I., De Belie N. (2013). *Feasibility study on the use of cellular concrete as alternative raw material for Portland clinker production*. Construction and Building Materials, vol. 48, pp 725-733. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.083.
- Schorcht F., Kourti I., Scalet B.M., Roudier S., Delgado Sancho L. (2013). *Best available techniques (BAT) reference document for the production of cement, lime and magnesium oxide Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (integrated pollution prevention and control)*. Publications Office of the European Union, 475 p. ISBN 978-92-79-32944-9, doi:10.2788/12850.
- Schouten C.J., Rang M.C. (1989). *Ceramic processing of polluted dredged mud*. Hydrobiologia, vol. 176-177, pp 419-430. doi: 10.1007/BF00026576.
- Scordia P.-Y. (2008). *Caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 189p.
- SEDIBET (2010). *Utilisation des SEDIments inertes et de fines dans la conception de nouveaux BETon - Rapport final*. 209p.
- Seklaoui-Oukid O., Rangeard D., Jauberthie R., Bouhraoua A. (2012). *Influence de la température sur un sédiment de barrage*. Journées AUGC/IBPSA, 6-8 juin 2012, Chambéry, 10 p.

- Semcha A. (2006). *Valorisation des sédiments de dragage : Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug*. Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 167 p.
- SETRA (2007). *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application à la réalisation des assises de chaussées*. Guide technique. 82 p.
- SETRA (2011). *Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière - Evaluation environnementale - Guide méthodologique*, 28 p. ISBN 978-2-11-099173-7.
- SETRA-LCPC (1972). *Recommandations pour le traitement en place des sols fins*. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n°61, pp 49-73.
- SETRA-LCPC (1992). *Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR) - Guide technique - Fascicules I : principes généraux - Fascicules II : annexes techniques*. Référence D9233.
- SETRA-LCPC (2000). *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques : application à la réalisation des remblais et des couches de forme*. Guide technique, 240 p. ISBN 2720838101 9782720838101.
- SETRA-LCPC (2000). *Étude et réalisation des remblais sur sols compressibles*. Guide technique. 83 p. ISBN 2-11-091783-0.
- SETRA-LCPC (2000). *Guide Technique - Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques : application à la réalisation des remblais et des couches de forme*. 240 p.
- SFIC (2001). *Rapport d'activité de l'industrie cimentière française - Année 2000*. Référence RA-G03-2000, Syndicat Français de l'Industrie Cimentière, 35 p.
- SFIC (2007). *Infociments 2007*. Rapport d'activité, Syndicat Français de l'Industrie Cimentière, 60 p.
- SFIC (2012a). *Infociments 2012 - l'essentiel. Statistiques de l'industrie cimentière française 2011*, Syndicat Français de l'Industrie Cimentière, 16 p.
- SFIC (2012b). *Infociments 2012 - La revue annuelle de l'industrie cimentière*. Syndicat Français de l'Industrie Cimentière, 32 p.
- Sheehan C., Harrington J., Murphy J. (2010a). *A technical assessment of topsoil production from dredged material*. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 54, pp 1377-1385. doi: 10.1016/j.resconrec.2010.05.012.
- Sheehan C., Harrington J., Murphy J. (2010b). *An environmental and economic assessment of topsoil production from dredge material*. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 55, pp 209-220. doi : 10.1016/j.resconrec.2010.09.011.
- Shih P.-H., Chang J.-E., Chiang L.-C. (2003). *Replacement of raw mix in cement production by municipal solid waste incineration ash*. *Cement and Concrete Research*, vol. 33, pp 1831-1836. doi: 10.1016/S0008-8846(03)00206-0.
- Shih P.-H., Chang J.-E., Lu H.-C., Chiang L.-C. (2005). *Reuse of heavy metal-containing sludges in cement production*. *Cement and Concrete Research*, vol. 35, pp 2110-2115. doi: 10.1016/j.cemconres.2005.08.006.
- Silitonga E. (2010). *Valorisation des sédiments marins contaminés par solidification/stabilisation à base de liants hydrauliques et de fumée de silice*. Thèse de doctorat, Université de Caen Basse-Normandie, 229 p.
- SIM (2012). *Sédiments portuaires de Dunkerque, drague sur la route*. *Recyclage et Valorisation*, n°38, septembre 2012, pp 8 - 11.
- SITA (2014). *SITA et Doublet pour développer la solution innovante et écologique C'Urban*. Dossier de presse du 29 janvier 2014, 17 p.
- SMOCS (2013). *Sustainable Management of Contaminated Sediments (SMOCS) – Guideline*. Baltic Sea Region Programme 2007-2013, 82 p. url : <http://smocs.eu/?download=SMOCS%20Guideline>.
- Sparrevik M., Barton D.N., Oen A.M.P., Sehkar N.U., Linkov I. (2011a). *Use of multicriteria involvement processes to enhance transparency and stakeholder participation at Bergen Harbor, Norway*. *Integrated Environmental Assessment and Management*, vol. 7, pp 414-425. doi: 10.1002/ieam.182.

- Sparrevik M., Linkov I. (2011b). *Use of life cycle assessments for improved decision making in contaminated sediment remediation*. Integrated Environmental Assessment and Management, vol. 7, pp 304-305. doi: 10.1002/ieam.172.
- Stegemann J. A., Cote P. L., (1992) *Protocole d'évaluation proposé pour les déchets solidifiés à base de ciment*. Série de la protection de l'environnement SPE3/HA/9, Environnement Canada, 66 p.
- Stengel P., Bruckler L., Balesdent J. (2009). *Le Sol*. Ed. Quae, 183 p. ISBN 978-2-7592-0301-7.
- Straumann H., Seveque J.-L., Faure F.-X. (2005). *Method for making construction elements incorporating sewage sludge*. Brevet, n° de publication EP 1571135.
- Sturgis, T.C., and Lee, C.R. (1999). *Manufactured soil screening test*, DOER Technical Notes Collection TN DOER-C6, U.S. Army Engineer Research and Development Center, 9 p.
- Sturgis, T.C, Lee, C.R, and Banks, H.C, Jr. (2001a). *Evaluation of Toledo Harbor Dredged Material for Manufactured Soil, Phase I: Greenhouse Bench-Scale Test*, Technical Report ERDC/EL TR-01-25, U.S. Army Engineer Research and Development Center, 31 p.
- Sturgis, T.C, Lee, C.R., Banks, H.C, Jr., Burchell, M.R., II, Johnson, K. (2001b). *Evaluation of manufactured soil using dredged material from New York/New Jersey Harbor Newton Creek Site; Phase I: Greenhouse bench-scale test*. ERDC/ELTR-01-35, U.S. Army Engineer Research and Development Center, 48 p.
- Sturgis, T.C., Lee, C.R., Banks, H.C., Jr., Johnson, K., Langan, J.P., Rees, S.I., and Dyess, C. (2002). *Evaluation of manufactured soil using dredged material from confined placement facilities in Mobile, Alabama; Phase I: Greenhouse bench-scale test*. Technical Report ERDC/ELTR-02-12, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, 58 p.
- Sumner M.E. (1999). *Handbook of soil science*. CRC Press, 2148 p. ISBN 978-0849331367.
- Tang C.-W., Chen H.-J., Wang S.-Y., Spaulding J. (2011). *Production of synthetic lightweight aggregate using reservoir sediments for concrete and masonry*. Cement and Concrete Composites, vol. 33, pp 292-300. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.10.008.
- Taylor H.F.W. (1997). *Cement Chemistry*. Thomas Telford Ltd, 480 p. ISBN 0727725920.
- Terzaghi K., Peck R.B. (1961). *Mécanique des sols appliquée aux travaux publics et au bâtiment*, Editions Dunod, Paris, 565p.
- Théry F., Anger B., Brochier V. (2013). *Caractérisations minimales à réaliser afin de pré-orienter les sédiments gérés à terre vers une voie de valorisation matière ou agronomique*. Rapport interne référence H-E22-2013-01478-FR, EDF R&D, 28 p.
- Thiéry V., Damidot D., Izoret L. (2013). *Les ciments : matériaux, procédés et analogues naturels*. Géochronique, pp 9-32.
- Tribout C. (2010). *Valorisation de sédiments traités en techniques routières : contribution à la mise en place d'un protocole d'acceptabilité*. Thèse de doctorat, INSA de Toulouse, 295 p.
- Tribout C., Husson B. (2011). *Use of treated sediments in road building techniques*. European Journal of Environmental and Civil Engineering, vol. 15, pp 197-213. doi: 10.1080/19648189.2011.9693318.
- Tribout C., Husson B., Nzihou A. (2012). *Valorisation de sédiments fluviaux pollués traités en assises de chaussée*. Matériaux & Techniques, doi: 10.1051/mattech/2012022.
- UNICEM (2012). *Les chiffres clés 2011 des industries de carrières et matériaux de construction*.
- VitaMines (2012). *Recycler sédiment fluviaux et déchets minéraux dans le mobilier urbain, c'est possible avec le département GCE !*, n°87.
- VNF (2008). *Guide dragage*. Guide technique, Voies Navigables de France, 75p.
- Wang D., Abriak N.E., Zentar R. (2011). *Mineralogy and compaction properties of dredged marine sediments*. II^{ème} Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime, Tanger, Maroc, pp 251-256 doi:10.5150/cmcm.2011.054.
- Wang H.-Y. (2009). *Durability of self-consolidating lightweight aggregate concrete using dredged silt*. Construction and Building Materials, vol. 23, pp 2332-2337. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.11.006.

- Weimer M., Dalton J., Gardner K., Magee B. (2002). *Beneficial Use of Contaminated Dredged Sediments in Portland Cement Manufacture*. ASCE Conference Proceedings, vol. 119, pp 7-7. doi: 10.1061/40680(2003)7.
- Wei Y.L., Yang J.C., Lin Y.Y., Chuang S.Y., Wang H.P. (2008). *Recycling of harbor sediment as lightweight aggregate*. Marine pollution bulletin, vol. 57, pp 867-872.
- Yang K.-H., Lo C.-W., Huang J.-S. (2013). *Production and properties of foamed reservoir sludge inorganic polymers*. Cement and Concrete Composites, vol. 38, pp 50-56. doi : 10.1016/j.cemconcomp.2013.03.017.
- Yeboah N.N., Mezencevova A., Phillips J.S., Burns S.E., Kustis K.E. (2011). *Investigating the Potential for Producing Fired Bricks from Savannah Harbor Dredged Sediment*. In Proceedings of the Geo-Frontiers 2011 Conference, Dallas, Texas, pp 128-138. doi:10.1061/41165(397)128.
- Zentar R., Dubois V., Abriak N.E. (2008). *Mechanical behaviour and environmental impacts of a test road built with marine dredged sediments*. Resources, Conservation and Recycling, vol. 52, pp 947-954. doi: 10.1016/j.resconrec.2008.02.002.
- Zri A. (2010). *Mise en place d'une nouvelle approche de formulation d'une matrice cimentaire à base de sable de dragage : application aux bétons de sables et granulats*. Thèse de doctorat, Ecole des mines de Douai, 201 p.

TABLE DES FIGURES

Figure 1-1. Modes de transport des particules dans un courant [Boulvain, 2012]	10
Figure 1-2. Diagramme de Hjulström [Boulvain, 2012]	10
Figure 1-3. Mécanismes de déposition [EDF, 1997].....	11
Figure 1-4. Principe de la logique par analyse inverse mise en place	17
Figure 1-5. Structure schématique du document	18
Figure 2-1. Formation des quatre phases principales du clinker dans la partie tournante du four [Baron et Ollivier, 1996]	25
Figure 2-2. Types de ciments selon l'EN 197-1 et les extensions potentielles	28
Figure 2-3. Fabrication du ciment d'après Baron et Ollivier [1996] et entrées potentielles des sédiments Entrée A : valorisation dans le cru ; Entrée B : valorisation comme constituant (après calcination)	29
Figure 2-4. Résistances à la compression des pâtes de ciments obtenues après 1, 2, 4, 7, 14, 28 et 58 jours de maturation [Aouad et al., 2012].....	38
Figure 2-5. Résistances mécaniques à la compression des pâtes de sédiments calcinés/ciment [Benamara et al., 2013].	40
Figure 2-6. Compositions et évolution de la résistance à la compression des mortiers à base de sédiments calcinés [Dang et al., 2013]	42
Figure 2-7. Localisation comparée des cimenteries et des ouvrages hydroélectriques exploités par EDF (données : BRGM [2009], Global Cement [2012]).....	43
Figure 2-8. Plage d'utilisation des différents types d'essais pour la mesure de la consistance [FD P 18-457] 1 - Affaissement ; 2 - Étalement (chocs) ; 3 - Maniabilité ; 4 - Temps Vébé ; 5 - Degré de compactage Terre humide (TH), très ferme (TF), ferme (F), plastique (P) très plastique (TP), mou (M), fluide (Fl), très fluide (TFI).....	50
Figure 2-9. Prototype de jardinière fabriquée à partir de sédiments fluviaux et de matériaux minéraux recyclés (à gauche) [VitaMines, 2012] et support de vélo modulable (à droite) [LeMoniteur.fr, 2014]	59
Figure 2-10. Coupe transversale d'une structure routière type	61
Figure 2-11. Classification du GTR des sols avec un Dmax inférieur à 50 mm [SETRA-LCPC, 1992]	63
Figure 2-12. Modification immédiate du comportement d'un sol argileux humide relative à l'introduction de chaux vive [SETRA-LCPC, 2000].....	65
Figure 2-13. Influence du traitement à la chaux sur les caractéristiques de compactage d'un sol (courbe Proctor) [CIMBETON, 2009]	65
Figure 2-14. Abaque de situation des matériaux de couche de forme traités [SETRA/LCPC, 2000]... ..	68
Figure 2-15. Mise en place des matériaux [Silitonga, 2010].....	75
Figure 2-16. Mise en place de la plate-forme expérimentale dans le port de Dunkerque [Damidot et al., 2006].....	76
Figure 2-17. Construction de la route « test » [Depelsenaire, 2007].....	76
Figure 2-18. Voie verte du Mont-Saint-Michel.....	77
Figure 2-19. Schéma des modèles structuraux [Moore et Reynolds, 1989].....	80
Figure 2-20. Familles argileuses [Holtzapffel, 1985].....	80
Figure 2-21. Organigramme général de fabrication d'une pièce céramique [Fantozzi et al., 2011].....	83
Figure 2-22. Evolution de la consistance d'un mélange de poudre minérale-eau en fonction de la quantité d'eau ajoutée [d'après Fantozzi et al., 2011]	84

Figure 2-23. Courbe de Bigot typique d'une argile à tuiles (humidité et retrait exprimés par rapport au matériau sec) [Kornmann, 2006].....	85
Figure 2-24. Représentation des différentes familles de céramiques conventionnelles [Bonnet dans Fantozzi et al., 2011]	87
Figure 2-25. Diagramme d'Augustinik (CTMNC).....	91
Figure 2-26. Classification des mélanges argileux d'après Gippini [1969].....	93
Figure 2-27. Représentation schématique de la production de briques et de granulats d'argile expansée [Hamer et Ulbricht dans Bortone et Palumbo, 2007]	95
Figure 2-28. Usine pilote d'Hambourg pour la fabrication de briques à partir de matériaux dragués [PIANC, 2009]	96
Figure 2-29. Extrusion de briques-éprouvettes avec des sédiments portuaires marocains [Frar et al., 2014].....	98
Figure 2-30. Construction d'une habitation témoin [El Fgaier et al., 2013]	99
Figure 2-31. Composition chimique limite du mélange argileux gonflant à la cuisson [Tang et al., 2011].....	102
Figure 2-32. Localisation comparée des principaux sites industriels de production de terre cuite et des ouvrages hydroélectriques exploités par EDF (données : CTMNC ; EDF)	105
Figure 2-33. Diagramme simplifié des textures du GEPPA (1963)[NF U44-551 - AFNOR, 2002] ..	109
Figure 2-34. Aspect de l'horizon Z (anthropique) constitué de sédiments argileux en mai 2003, [Ferreira, 2003].....	126
Figure 3-1. Localisation des quatre retenues hydroélectriques prélevées	133
Figure 3-2. (a) Extraction des sédiments fins dans la queue de retenue de Serre-Ponçon (b) Aspect visuel et conditionnement en bidons hermétiques des sédiments DUR	134
Figure 3-3. (a) Sédiment à l'intérieur du tube carotteur (b) Aspect visuel des sédiments GAR à la sortie de l'eau.....	134
Figure 3-4. (a) Barge utilisée, équipée d'une benne preneuse hydraulique ; (b) Aspect visuel des sédiments ISE avant essais d'identification	135
Figure 3-5. Matériel utilisé pour la campagne de prélèvement des sédiments RHI (a) Embarcation motorisée ; (b) Benne Van Veen	136
Figure 3-6. Distribution granulométrique des sédiments	138
Figure 3-7. Classification des sédiments sur le diagramme de Casagrande	141
Figure 3-8. Variation de la valeur au bleu en fonction de l'indice de plasticité I_p	141
Figure 3-9. Relation entre la teneur en matière organique et la masse volumique des grains des sédiments étudiés.....	143
Figure 3-10. Diffractogrammes caractéristiques des cortèges argileux composant les sédiments étudiés	149
Figure 3-11. Représentation graphique de la nature du cortège argileux des sédiments étudiés	150
Figure 3-12. Thermogramme obtenu avec le sédiment GAR.....	151
Figure 3-13. Thermogramme obtenu avec le sédiment ISE	152
Figure 3-14. Thermogramme obtenu avec le sédiment RHI	152
Figure 3-15. Colonnes de décantation en cours d'utilisation	153
Figure 3-16. Courbes de décantation de la série A (concentration initiale = 100 g/l)	154
Figure 3-17. Courbes de décantation de la série B (concentration initiale = 250 g/l)	154
Figure 3-18. Ordre de grandeur du coefficient de perméabilité selon la nature du sol	155
Figure 3-19. Variation du coefficient de perméabilité en fonction de la concentration	155
Figure 3-20. Relation indice de fluage $C\alpha$ et teneur en matières organiques de sédiments fins	157
Figure 3-21. Relation k-C issue des colonnes de décantation et des œdomètres	159

Figure 3-22. Cellule expérimentale pour la déshydratation naturelle [Sano, 2012]	160
Figure 3-23. Evolution de la cohésion non drainée en fonction de la teneur en eau mesurée avec (a) l'essai au cône et (b) l'essai scissométrique	161
Figure 3-24. Comparaison des valeurs de cohésion non drainée mesurées au fall-cone et au scissomètre	161
Figure 3-25. Nature des sédiments selon la classification des matériaux du GTR.....	172
Figure 3-26. Relation entre la teneur en argile, l'indice de plasticité et la nature des minéraux argileux [d'après Sumner, 1999]	173
Figure 3-27. Répartition granulométrique des sédiments étudiés et diagramme de Winkler.....	174
Figure 3-28. Diagramme Augustinik des compositions chimiques moyennes des terres cuites (CTMNC).....	175
Figure 3-29. Classification des sédiments étudiés selon le diagramme de Gippini [1969]	176
Figure 4-1. Relation entre LSF des sédiments et leurs proportions dans le cru (série K2)	192
Figure 4-2. Influence du module silicique sur l'ajout de matière correctrice en alumine (série K3)...	192
Figure 4-3. Evolution des résistances en compression pour les différents mortiers.....	198
Figure 4-4. Indices d'activité des mortiers à 28 jours.....	199
Figure 4-5. Suivi du gonflement des éprouvettes de mortiers conservées en eau à 20 °C	200
Figure 4-6. Suivi du retrait des éprouvettes de mortiers conservées à l'air à 20 °C et 50 % d'humidité	200
Figure 4-7. Opération de malaxage	204
Figure 4-8. Organisation des essais et conservation des éprouvettes.....	205
Figure 4-9. Evolution comparée des résistances en compression simple.....	205
Figure 4-10. Valeurs comparées de R_{C60} et de R_{CI}	206
Figure 4-11. Résistance à l'immersion au jeune âge des mélanges.....	206
Figure 4-12. Evolution de la résistance à la compression simple des mélanges sédiments de barrages / CVP	207
Figure 4-13. (a) Moule en plâtre utilisé pour la mise en forme d'objets simples de forme conique et (b) pièce crue à base de sédiment ISE.....	210
Figure 4-14. Exemple type d'un test de cuisson en four gradient avec des niveaux de température mesurés pour chaque zone.....	211
Figure 4-15. Aspect des pièces cuites à base de (a) sédiment ISE et de (b) sédiment RHI avec un ajout de 20 % d'argile RR40.....	211
Figure 4-16. Courbes dilatométriques des sédiments ISE et RHI	213
Figure 4-17. (a) Absorption d'eau et (b) conductivité thermique des tessons à base de sédiments fins de barrages	214
Figure 4-18. Relation entre la porosité et résistance mécanique des pièces cuites à base de sédiments	215
Figure 4-19. Examen au MEB des tessons à base de (a) sédiment RHI à 1125 °C et (b) à base de sédiment ISE à 1050 °C.....	215
Figure 4-20. Résistance en compression simple (en MPa) des éprouvettes de géopolymères après une cure de (a) 3 jours à 60 °C et 4 jours à température ambiante et de (b) 3 jours à 60 °C et 25 jours à température ambiante	220
Figure 5-1. Combinaison d'aspects à retenir pour une valorisation de sédiments fins	224
Figure 5-2. Schéma conceptuel de l'approche	225
Figure 5-3. Exemple de courbe de score	226
Figure 5-4. Scores des critères indicateurs des sédiments étudiés pour une valorisation comme matière première en cru de cimenterie	237

Figure 5-5. Indices d'adéquation des sédiments étudiés pour une valorisation en cru de cimenterie..	237
Figure 5-6. Scores des critères indicateurs des sédiments étudiés pour une valorisation comme addition minérale pour les bétons et mortiers.....	238
Figure 5-7. Indices d'adéquation des sédiments pour une valorisation dans les mortiers et bétons comme addition minérale (filler).....	238
Figure 5-8. Scores des critères indicateurs des sédiments étudiés pour une valorisation comme matériau routier et assimilé	238
Figure 5-9. Indices d'adéquation des sédiments étudiés pour une valorisation comme matériau routier et assimilé.....	239
Figure 5-10. Scores des critères indicateurs des sédiments étudiés pour une valorisation comme matière première pour la fabrication de produits céramiques	239
Figure 5-11. Indices d'adéquation des sédiments étudiés pour une valorisation comme matière première pour la fabrication de produits céramiques	240
Figure 5-12. Indices d'adéquation des sédiments étudiés pour une valorisation agronomique en reconstruction de sol.....	240
Figure 5-13. Indices d'adéquation des sédiments pour une valorisation en reconstruction de sol	240
Figure 5-14. Indices d'adéquation des sédiments étudiés pour une valorisation agronomique en épandage agricole.....	241
Figure 5-15. Indices d'adéquation des sédiments étudiés pour une valorisation agricole (épandage).	241
Figure 5-16. Polygones de Voronoï pour (a) l'industrie cimentière et (b) l'industrie de la terre cuite	246
Figure 5-17. Iso distances routières pour (a) l'industrie cimentière et (b) l'industrie de la terre cuite	247

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1-1. Impacts liés aux dépôts de sédiments dans les retenues hydroélectriques [Anger et al., 2012].....	12
Tableau 1-2. Niveaux relatifs aux éléments et composés traces de l'arrêté du 09/08/2006)	14
Tableau 1-3. Classement ICPE pour les sédiments gérés à terre [DREAL Nord - Pas-de-Calais, 2012]	15
Tableau 2-1. Composition chimique du cru (en % massique sur calciné) d'après CIMBETON [2005a]	23
Tableau 2-2. Notations adoptées par les cimentiers pour les oxydes majeurs.....	23
Tableau 2-3. Composition minéralogique du ciment Portland et propriétés des phases sur le ciment [Pliskin, 1993]	24
Tableau 2-4. Représentation simplifiée des 5 types de ciments courants et leurs compositions.....	27
Tableau 2-5. Matières premières pour la fabrication de clinker	28
Tableau 2-6. Intervalles préconisés pour les modules chimiques	30
Tableau 2-7.Exemple de composition d'un cru basé sur 4 composants [Hewlett, 2003].....	31
Tableau 2-8. Compositions chimiques courantes des matières premières et du cru pour la fabrication de clinker [CP/RAC, 2008 ; Schorcht et al., 2013]	31
Tableau 2-9. Exemples de valeurs limites pour des déchets utilisés comme matière première alternative dans différentes cimenteries.	33
Tableau 2-10.Exigences de la norme NF EN 197-1 relatives aux constituants des ciments	34
Tableau 2-11. Exigences mécaniques des trois classes de résistance des ciments courants	35
Tableau 2-12. Exigences chimiques définies en termes de valeurs caractéristiques [NF EN 197-1]....	36
Tableau 2-13. Teneurs en éléments majeurs des sédiments marins du port de New York/New Jersey (en pourcentage massique) [Weimer et al., 2002].....	37
Tableau 2-14. Analyses chimiques des sédiments fins de la retenue de Shiqma et des argiles locales "Kedma" utilisées en cimenterie [Laronne, 2000].....	38
Tableau 2-15. Teneurs en éléments majeurs des sédiments de la retenue de Fergoug [Mazouzi et al., 2011].....	39
Tableau 2-16. Analyse chimique des sédiments du barrage de Fergoug [Benamara et al., 2013].	40
Tableau 2-17. Composition chimique des matériaux argileux bruts, en %	41
Tableau 2-18. Composition minéralogique des matériaux argileux bruts, en %	41
Tableau 2-19. Résistances à la compression simple des mortiers et bétons à base de ciments composés de matériaux argileux calcinés	41
Tableau 2-20. Concentration en éléments majeurs des sédiments de Lyvet [Dang et al., 2013]	42
Tableau 2-21.Valeurs limites spécifiées applicables en France à la composition et aux propriétés des bétons [NF EN 206-1]	51
Tableau 2-22. Synthèse des spécifications chimiques et physiques pour les additions et fillers	53
Tableau 2-23. Essais menés sur l'expérimentation pilote suite aux travaux de laboratoire.....	57
Tableau 2-24. Critères pour décider de l'aptitude d'un sol au traitement au ciment ou à la chaux	67
Tableau 2-25. Performances à atteindre après traitement [SETRA/LCPC, 2000 ; SETRA, 2007].....	68
Tableau 2-26. Indice portant immédiat (IPI) minimum à obtenir à la mise en œuvre d'une couche de forme traitée selon le GTS [SETRA-LCPC, 2000]	69
Tableau 2-27. Synthèse des essais et des spécifications applicables pour un matériau routier.....	71
Tableau 2-28. Répartition de la production française en terre cuite en 2011, données FFTB	79
Tableau 2-29. Comparaison des propriétés des différentes argiles [Kornmann, 2009].....	82

Tableau 2-30. Influence de différents minéraux d'un mélange [Kornmann et al., 2005]	82
Tableau 2-31. Procédés de mise en forme des céramiques	85
Tableau 2-32. Principales réactions durant la cuisson [Kornman, 2009]	86
Tableau 2-33. Gammes des compositions chimiques et minéralogiques des matières premières argileuses utilisées dans l'industrie de la brique et de la tuile dans différents pays européens [Commission Européenne, 2007]	90
Tableau 2-34. Influence des éléments chimiques du mélange argileux, d'après Kornmann [2009]	92
Tableau 2-35. Exemples de compositions de mélanges argileux français d'après Kornmann et al. [2005]	94
Tableau 2-36. Limites courantes pour la composition des mélanges argileux pour la fabrication de terre cuite [Kornmann, 2009]	94
Tableau 2-37. Caractéristiques physiques des briques pleines fabriquées [Benkadja, 2013]	100
Tableau 2-38. Composition chimique du mélange argileux idéal gonflant à la cuisson [Riley, 1951]	100
Tableau 2-39. Composition chimique des composants entrant dans les mélanges de matière première et des mélanges utilisés pour la production de LWA (en % massique) [Hamer et al., 2003]	101
Tableau 2-40. Caractéristiques physiques des sédiments de la retenue de Shin-Men	102
Tableau 2-41. Analyse minéralogique des constituants du mélange et des granules cuits [Flament et al., 2013]	104
Tableau 2-42. Fonctions du sol et paramètres agronomiques associés [Théry et al., 2013]	109
Tableau 2-43. Composition et caractéristiques des fumiers et fientes [ADEME, 2001]	111
Tableau 2-44. Composition et caractéristiques des boues d'origine urbaine [ADEME, 2001]	111
Tableau 2-45. Composition et caractéristiques de trois types de composts à trois mois de compostage [ADEME, 2001]	111
Tableau 2-46. Définitions normalisées des principales dénominations	113
Tableau 2-47. Définition et spécification extrait de la norme NF U 44-001 pour les amendements calcaires simples	116
Tableau 2-48. Caractéristiques générales de 10 sédiments mis en dépôt [Capilla et al., 2006]	117
Tableau 2-49. Caractérisations pour les amendements basiques d'après la norme NF U 44-001	118
Tableau 2-50. Caractérisations pour les supports de culture d'après la norme NF U 44-551	118
Tableau 2-51. Teneurs limites en ETM [NF U 44-551]	118
Tableau 2-52. Teneurs limites en éléments-traces dans les boues [JORF, 1998a]	119
Tableau 2-53. Teneurs limites en éléments-traces métalliques dans les sols récepteurs [JORF, 1998a]	119
Tableau 2-54. Epanchage contrôlé : contraintes de mise en œuvre [JORF, 1998a]	120
Tableau 2-55. Paramètres agronomiques recherchés dans les sédiments de dragage [Cantegrit et Nouvion-Dupray, 2011]	121
Tableau 2-56. Synthèse des analyses des nutriments [Sheehan et al., 2010a]	122
Tableau 2-57. Caractéristiques agronomiques des cendres volantes et sédiments [ANTEA, 1999] ..	124
Tableau 2-58. Analyses des mélanges compostés (résultats exprimés sur la matière brute) [4Vaulx-Jardin, 1998]	125
Tableau 3-1. Sédiments étudiés, laboratoires et paramètres de caractérisation	137
Tableau 3-2. Données granulométriques des sédiments	138
Tableau 3-3. Finesse des sédiments étudiés	139
Tableau 3-4. Limites d'Atterberg des sédiments étudiés	140
Tableau 3-5. Valeurs au bleu des sédiments étudiés	142
Tableau 3-6. Teneurs en matières organiques des sédiments étudiés	142
Tableau 3-7. Masse volumique des particules solides des sédiments étudiés	143

Tableau 3-8. Résultats de l'analyse chimique des éléments majeurs des sédiments étudiés (exprimés sous forme d'oxydes en pourcentage massique)	144
Tableau 3-9. Teneurs en silice soluble des sédiments étudiés.....	144
Tableau 3-10. Résultats de l'analyse des éléments trace métallique et métalloïde des sédiments étudiés (en mg/kg de matière sèche).....	145
Tableau 3-11. Teneur en CaCO ₃ dans les sédiments étudiés	146
Tableau 3-12. Résultats de l'analyse minéralogique quantitative par diffraction des rayons X des sédiments étudiés (en % massique).....	147
Tableau 3-13. Détermination et semi-quantification des cortèges minéralogiques argileux des sédiments des retenues hydroélectriques.....	150
Tableau 3-14. Résultats de l'analyse thermogravimétrique des sédiments étudiés	151
Tableau 3-15. Interprétation des résultats de l'analyse thermogravimétrique des sédiments étudiés..	151
Tableau 3-16. Paramètres de tassement.....	156
Tableau 3-17. Propriétés hydrauliques et de consolidation des sédiments fins.....	158
Tableau 3-18. Synthèse des caractéristiques physico-chimiques et des propriétés des sédiments de barrage étudiés.....	163
Tableau 3-19. Signification agronomique des paramètres de caractérisation	165
Tableau 3-20. Caractéristiques agronomiques des sédiments étudiés	166
Tableau 3-21. Comparaison entre les compositions chimiques des sédiments étudiés et celles des matières traditionnelles.....	168
Tableau 3-22. Rappel de certaines caractéristiques physico-chimiques des sédiments étudiés	171
Tableau 3-23. Classification des sédiments.....	173
Tableau 3-24. Composition chimique en éléments majeurs des sédiments et limites courantes des mélanges argileux pour la fabrication de terre cuite.....	175
Tableau 3-25. Dénomination et spécification des types de support de culture se rapprochant des sédiments de barrage	179
Tableau 3-26. Concentration en ETM des sédiments de barrage étudiés.....	181
Tableau 3-27. Calcul des flux d'ETM et doses maxima théoriques	181
Tableau 3-28. Adéquation entre les caractéristiques des sédiments étudiés et les spécifications des filières de valorisation « minérales ».....	184
Tableau 3-29. Adéquation entre les caractéristiques des sédiments étudiés et les spécifications des applications agronomiques potentielles.....	185
Tableau 4-1. Sédiments, laboratoires et filières pressenties.....	188
Tableau 4-2. Compositions chimiques des matières premières traditionnelles utilisées (en % massique)	190
Tableau 4-3. Modules des composants des crus.....	190
Tableau 4-4. Composition des crus avant cuisson.....	191
Tableau 4-5. Résultats de l'analyse chimique et composition minéralogique potentielle des clinkers	193
Tableau 4-6. Résultats de l'analyse minéralogique semi-quantitative par DRX des clinkers	194
Tableau 4-7. Formulation des séries de mortier	197
Tableau 4-8. Caractérisation à l'état frais des mortiers.	197
Tableau 4-9. Dosage en liants des mélanges	203
Tableau 4-10. Performances à atteindre après traitement, pour les paramètres retenus dans cette étude en vue d'une utilisation en couche de forme d'après le GTS [SETRA-LCPC, 2000].	204
Tableau 4-11. Température de cuisson optimale.....	211
Tableau 4-12. Caractéristiques physico-mécaniques des pièces cuites à base de sédiments.	212
Tableau 4-13. Propriétés des échantillons cuits de briques à base de sédiments fins de barrages	214

Tableau 5-1. Matière première dans le cru de cimenterie	229
Tableau 5-2. Addition minérale pour les bétons et mortiers (filler)	230
Tableau 5-3. Matériaux routiers et assimilés.....	231
Tableau 5-4. Matière première pour l'industrie céramique (terre cuite)	232
Tableau 5-5. Valorisation agronomique – une utilisation pour confectionner des sols reconstitués...	234
Tableau 5-6. Valorisation agronomique – une utilisation agricole	235
Tableau 5-7. Gammes de teneurs en eau des sédiments pour la mise en oeuvre dans les filières.....	236
Tableau 5-8. Indices d'adéquation des sédiments étudiés pour les différentes filières.....	243
Tableau 5-9. Nombre de barrages exploités par EDF distants de moins de 25 et 50 km d'une cimenterie ou d'une usine de fabrication de produits en terre cuite	248

ANNEXES

ANNEXE 1 : CRITERES D'ADMISSION DES DECHETS DANS LES INSTALLATIONS DE STOCKAGE

Les conditions de stockage des déchets ont été cadrées par l'adoption de la directive 1999/31/CE du 26 avril 1999 [JOCE, 1999]. L'article 4 de cette directive définit trois catégories d'installations : les Installations de stockage des déchets inertes (ISDI), les Installations de Stockage des Déchets Non Dangereux (ISDND), les Installations de Stockage de Déchets Dangereux (ISDD). Les seuils d'admission dans ces installations de stockage sont basés sur des analyses sur le lixiviat des sédiments mais également sur les sédiments bruts. Le test de lixiviation doit être réalisé selon la norme NF EN 12457-2 avec un ratio liquide solide (L/S) de 10 l/kg. Les différents seuils d'admission sont donnés dans le tableau A1-1 ci-dessous.

Tableau A1-1. Critères d'admission des déchets dans les installations de stockage de déchets

Paramètres	Inertes [JORF, 2010a]	Non dangereux* [JOCE, 2003]	Dangereux [JORF, 2003].
Arsenic (As)	0,5	2	25
Baryum (Ba)	20	100	300
Cadmium (Cd)	0,04	1	5
Chrome (Cr)	0,5	10	70
Cuivre (Cu)	2	50	100
Mercure (Hg)	0,01	0,2	2
Molybdène (Mo)	0,5	10	30
Nickel (Ni)	0,4	10	40
Plomb (Pb)	0,5	10	50
Antimoine (Sb)	0,06	0,7	5
Sélénium (Se)	0,1	0,7	7
Zinc (Zn)	4	50	200
COT sur éluat **	500	800	1000
Chlorure ***	800	15000	25000
Fluorure	10	150	500
Sulfate ***	1000 *****	20000	50000
Indice phénols	1	/	/
FS (fraction soluble) ***	4000	60000	100000
BTEX (Benzène ; toluène, éthylbenzène et xylène)	6		
Hydrocarbures (C10 à C40)	500		
COT	30000****		
HAP	50		
PCB (7 congénères)	1		

* Le Conseil Européen a publié la décision 2003/33/CE [JOCE, 2003] établissant des critères et des procédures d'admission des déchets dans les décharges dans l'Union Européenne. Pour le moment, cette décision n'a pas fait l'objet d'une retranscription dans la réglementation française en ce qui concerne ces valeurs limites d'admission pour les ISDND. En l'attente de cette transposition, ce sont les valeurs seuils fixées dans les arrêtés préfectoraux de chaque site qui font référence. Ces valeurs limites sont généralement fournies par les exploitants de site sur simple demande. Le texte européen sert toutefois de base de travail pour de nombreux exploitants en France.

** Si le déchet ne satisfait pas à la valeur limite indiquée pour le carbone organique total sur éluat à sa propre valeur de pH, il peut aussi faire l'objet d'un essai de lixiviation NF EN 12457-2 avec un pH compris entre 7,5 et 8,0. Le déchet peut être jugé conforme aux critères d'admission pour le carbone organique total sur éluat si le résultat de cette détermination ne dépasse pas 500 mg/kg de MS.

***Si le déchet ne respecte pas au moins une des valeurs fixées pour le chlorure, le sulfate ou la fraction soluble, le déchet peut être encore jugé conforme aux critères d'admission s'il respecte soit les valeurs associées au chlorure et au sulfate, soit celle associée à la fraction soluble.

**** Pour les sols, une valeur limite plus élevée peut être admise par l'autorité compétente, à condition que la valeur limite de 500 mg/kg soit respectée pour le COT sur éluat pour L/S=10 l/kg, soit au pH du sol, soit pour un pH situé entre 7,5 et 8,0.

***** Si le déchet ne respecte pas cette valeur en sulfate, il peut être encore jugé conforme aux critères d'admission si la lixiviation ne dépasse pas les valeurs suivantes : 1 500 mg/l à un ratio L/S=0,1 l/kg et 6000 mg/kg de matière sèche à un ratio L/S=10 l/kg. Il est nécessaire d'utiliser l'essai de percolation NF CEN/TS 14405 pour déterminer la valeur lorsque L/S=0,1 l/kg dans les conditions d'équilibre initial ; la valeur correspondante) L/S=10 l/kg peut être déterminée par un essai de lixiviation NF EN 12457-2 ou par un essai de percolation NF CEN/TS 14405 dans les conditions approchant l'équilibre local.

ANNEXE 2 : CLASSIFICATION DES SOLS FINS SELON LE GTR

SOLS FINS

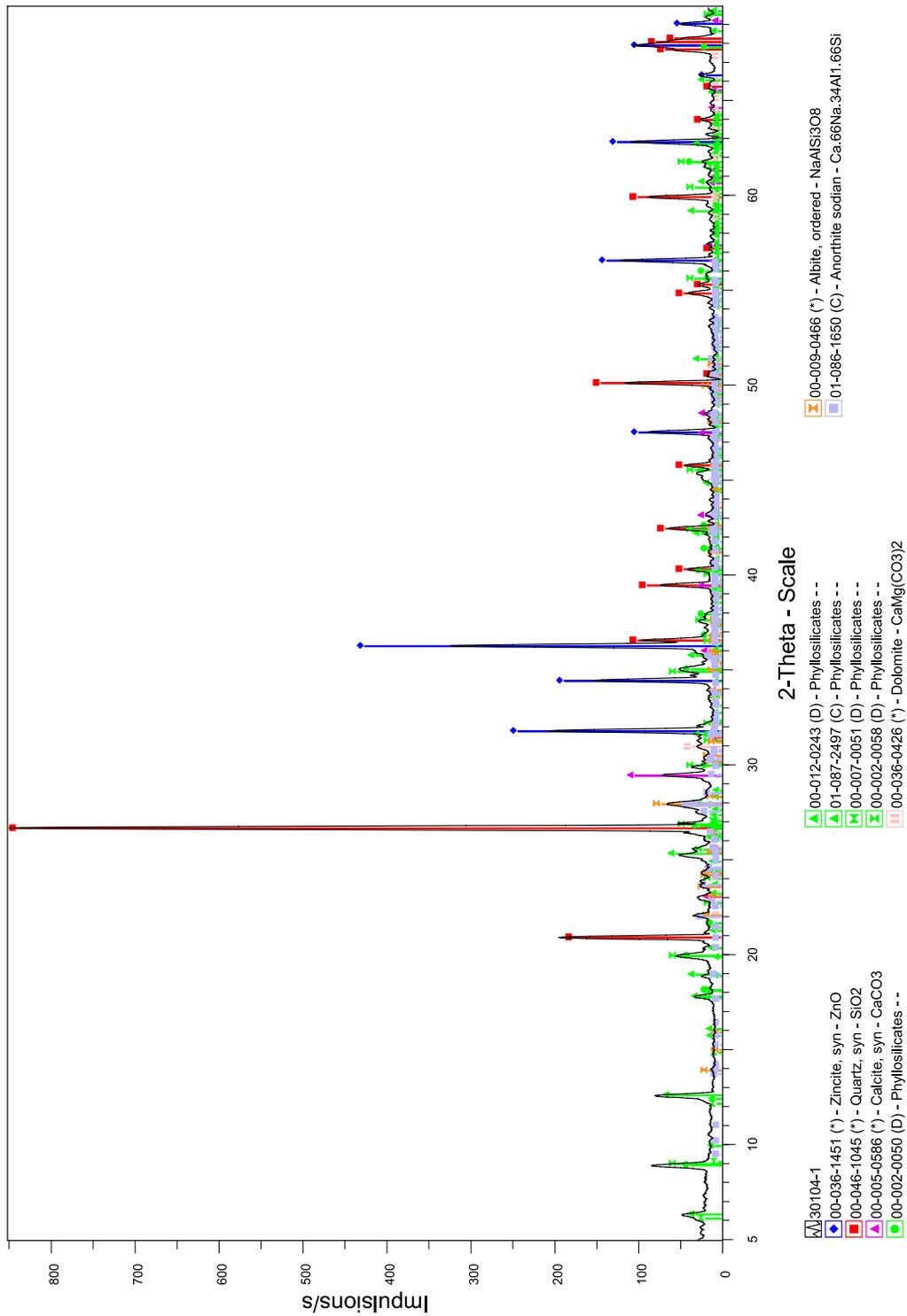
Classe A

Classement selon la nature			Classement selon l'état hydrique											
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Caractères principaux	Paramètres et valeurs de seuils retenus	Sous-classe								
D _{max} ≤ 50mm et tamisat à 80µm > 35 %	A	VBS ≤ 2,5 ou I _p ≤ 12	A ₁ Limon peu plastiques, loess, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...	Ces sols changent brutalement de consistance pour de faibles variations de teneur en eau, en particulier lorsque leur w _n est proche de w _{opt} . Le temps de réaction aux variations de l'environnement hydrique et climatique est relativement court, mais la perméabilité pouvant varier dans de larges limites selon la granulométrie, la plasticité et la compacité, le temps de réaction peut tout de même varier assez largement. Dans le cas de ces sols fins peu plastiques, il est souvent préférable de les identifier par la valeur de bleu de méthylène VBS, compte tenu de l'imprécision attachée à la mesure de l'Ip.	$PI \leq 3$ ou $w_n \geq 1,25 w_{opt}$ $3 < PI \leq 8$ ou $1,10 w_{opt} \leq w_n < 1,25 w_{opt}$ $8 < PI \leq 25$ ou $0,9 w_{opt} \leq w_n < 1,10 w_{opt}$ $0,7 w_{opt} \leq w_n < 0,9 w_{opt}$ $w_n < 0,7 w_{opt}$	A _{1h} A ₁ A _{1m} A _{1s}								
							A ₂ Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques, arènes...	Le caractère moyen des sols de cette sous-classe fait qu'ils se prêtent à l'emploi de la plus large gamme d'outils de terrassement (si la teneur en eau n'est pas trop élevée). Dès que l'Ip atteint des valeurs ≥ 12, il constitue le critère d'identification le mieux adapté.	$PI \leq 2$ ou $IC \leq 0,9$ ou $w_n \geq 1,3 w_{opt}$ $2 < PI \leq 5$ ou $0,9 < IC \leq 1,05$ ou $1,1 w_{opt} \leq w_n < 1,3 w_{opt}$ $5 < PI \leq 15$ ou $1,05 < IC \leq 1,2$ ou $0,9 w_{opt} \leq w_n < 1,1 w_{opt}$ $1,2 < IC \leq 1,4$ ou $0,7 w_{opt} \leq w_n < 0,9 w_{opt}$	A _{2h} A ₂ A _{2m} A _{2s}				
											A ₃ Argiles et argiles marnuses, limons très plastiques...	Ces sols sont très cohérents à teneur en eau moyenne et faible, et collants ou glissants à l'état humide, d'où difficulté de mise en oeuvre sur chantier (et de manipulation en laboratoire). Leur perméabilité très réduite rend leurs variations de teneur en eau très lentes, en place. Une augmentation de teneur en eau assez importante est nécessaire pour changer notablement leur consistance.	$PI \leq 1$ ou $IC \leq 0,8$ ou $w_n \geq 1,4 w_{opt}$ $1 < PI \leq 3$ ou $0,8 < IC \leq 1$ ou $1,2 w_{opt} \leq w_n < 1,4 w_{opt}$ $3 < PI \leq 10$ ou $1 < IC \leq 1,15$ ou $0,9 w_{opt} \leq w_n < 1,2 w_{opt}$ $1,15 < IC \leq 1,3$ ou $0,7 w_{opt} \leq w_n < 0,9 w_{opt}$	A _{3h} A ₃ A _{3m A_{3s}}
soils fins Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique.														

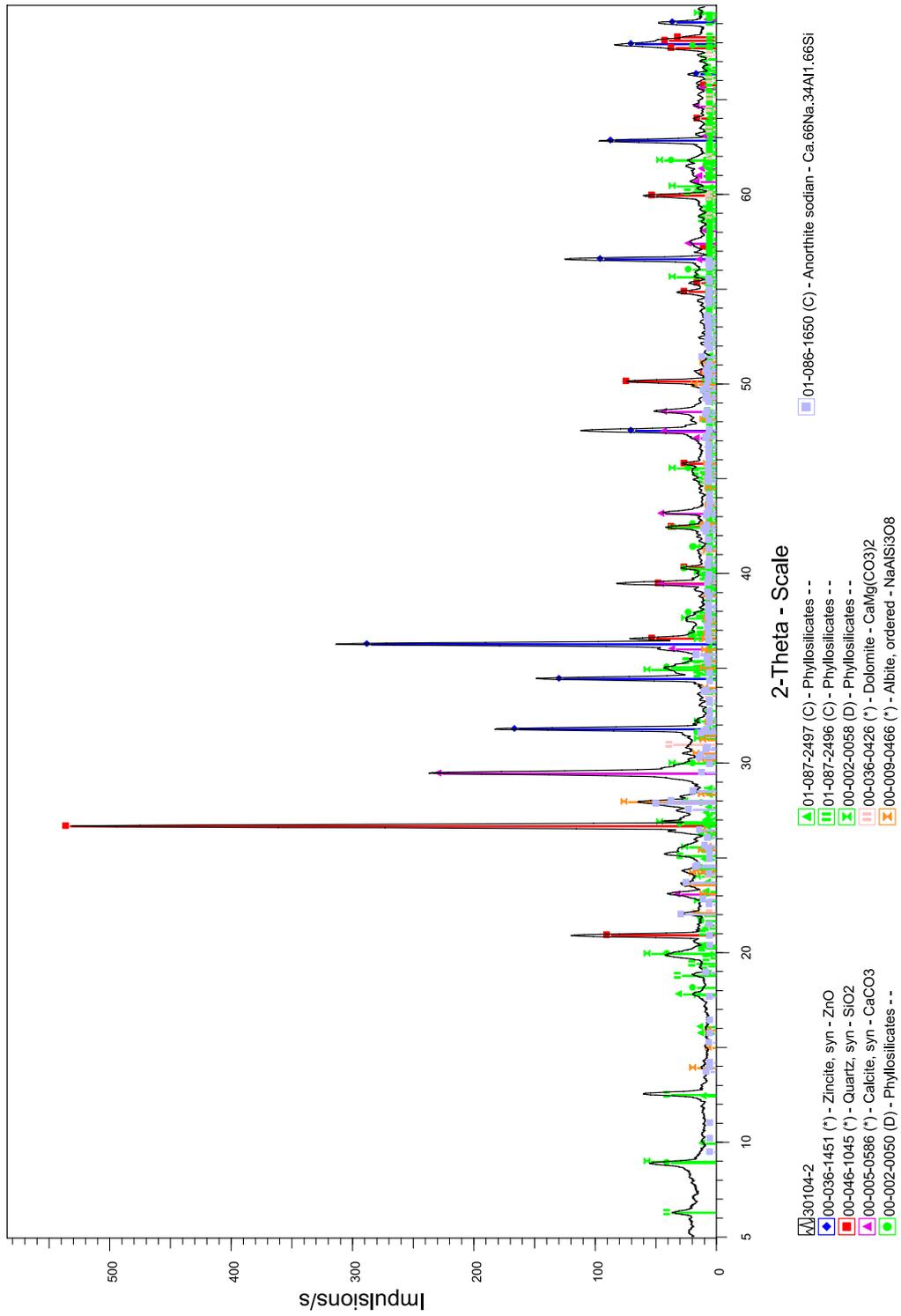
Les paramètres inscrits en caractères gras sont ceux dont le choix est à privilégier.

ANNEXE 3 : DIFFRACTOGRAMMES DES SEDIMENTS ETUDIES

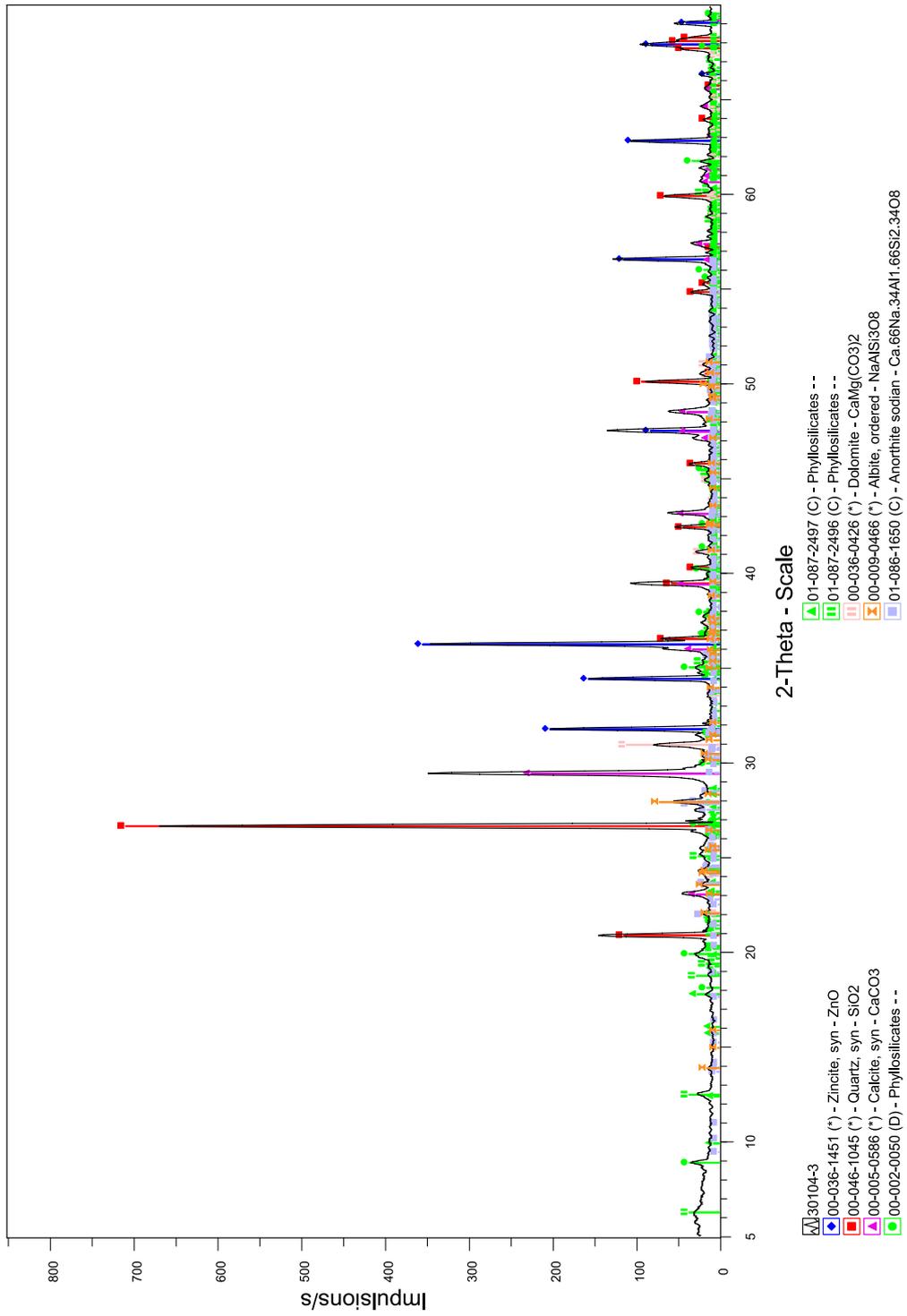
A3.1. DIFFRACTOGRAMME DU SEDIMENT GAR



A3.2. DIFFRACTOGRAMME DU SEDIMENT ISE



A3.3. DIFFRACTOGRAMME DU SEDIMENT RHI



ANNEXE 4 : TASSEMENT DES SEDIMENTS FINS

A4.1. DEFINITIONS

Le processus de tassement d'une vase se décompose en deux phases différentes :

- la sédimentation ou la décantation qui se produit en l'absence de contraintes effectives et qui correspond à une vase fluide ou suspension,
- la consolidation qui se produit en présence de contraintes effectives et qui correspond à un sol.

La première phase peut être modélisée à l'aide des théories de sédimentation comme celle de Kynch [1952] et la deuxième à l'aide des théories de consolidation issues de la mécanique des sols comme celle de Terzaghi et Peck [1961].

A4.2. EQUATIONS D'ETAT

L'état des sédiments fins est caractérisé en utilisant les quatre variables suivantes :

- Teneur en eau : $W\% = 100 \times \text{Masse de l'eau} / (\text{Masse des grains solides})$,
- Concentration : $C = \text{Masse des grains solides} / (\text{Volume total})$,
- Indice des vides : $e = \text{Volume des vides} / (\text{Volume des grains solides})$,
- Porosité : $n = \text{Volume des vides} / (\text{Volume total})$.

Si les sédiments sont saturés, la connaissance de l'une de ces quatre grandeurs, détermine les valeurs des trois autres. On peut notamment utiliser les relations suivantes :

$$C = \frac{\rho_o}{\rho_s} \frac{W\%}{100} \quad e = \frac{\rho_s}{C} - 1 = \frac{n}{1-n} \quad W\% = 100 e \frac{\rho_o}{\rho_s} \quad n = \frac{e}{1+e} = 1 - \frac{C}{\rho_s}$$

où ρ_s est la masse volumique de la phase solide et ρ_o , la masse volumique de l'eau.

A4.3. SEDIMENTATION OU DECANTATION DES SEDIMENTS FINS : RAPPELS SUR LA METHODE GRAPHIQUE UTILISEE

En l'absence de contraintes effectives, la vitesse de sédimentation ou de décantation V_s d'une vase reposant sur un fond imperméable (négative pour désigner une chute) sous l'action de son propre poids peut être calculée à l'aide de la relation de Been [1980] suivante :

$$V_s = - \frac{k}{\rho_s} \left[\frac{\rho_s}{\rho_o} - 1 \right] C \quad [1]$$

où :

ρ_s est la masse volumique de la phase solide ($\approx 2550 \text{ kg.m}^{-3}$ pour une vase organique), ρ_o est la masse volumique de l'eau ($\approx 1000 \text{ kg.m}^{-3}$), C est la concentration en matières sèches (rapport de la masse solide sur le volume total) et k est le coefficient de perméabilité.

Sachant que le coefficient de perméabilité d'un sédiment donné dépend de sa concentration, la théorie de sédimentation de Kynch [1952] est compatible avec la formulation de Been [1980]. Des travaux réalisés par Sanchez [2000] montrent que dans le cas de sédiments fins (vases molles), la relation entre k et C obéit fréquemment à la loi empirique suivante :

$$k = A_1 \exp\left(-A_2 \frac{C}{\rho_s}\right) \quad [2]$$

où A_1 (m s^{-1}) et A_2 sont des paramètres propres à chaque sédiment.

Les paramètres de la loi précédente peuvent être évalués directement à partir de courbes expérimentales de tassement par une méthode graphique développée par Kynch [1952] et modifiée par Sanchez et Grovel [1993].

L'essai à la colonne de tassement permet d'étudier ce processus avant l'apparition des contraintes effectives. Cet essai consiste en la mise en œuvre d'un mélange de vase homogène de concentration initiale C_i dans un tube transparent de diamètre extérieur de 60 mm, épais de 3 mm et de hauteur totale de 2 m.

Le suivi du niveau de la surface libre du mélange en fonction du temps permet de construire les courbes de tassement (figure A4-1). Ces courbes comprennent quatre étapes successives :

- de O à A, pendant cette étape dite de floculation, qui dure de quelques minutes à quelques heures, la vitesse de tassement en surface augmente graduellement vers une vitesse limite associée à la concentration initiale du mélange de vase (l'utilisation d'une origine corrigée permet d'ignorer cette étape dans les applications pratiques),
- de A à B, au cours de cette étape la concentration en surface reste constante et égale à la concentration initiale, la courbe de tassement est une droite, la pente de cette droite définit ainsi la vitesse de tassement associée à la concentration initiale,
- de B à C, la pente de la courbe de tassement diminue progressivement au fur et à mesure que la concentration en surface augmente,
- de C à D, on note, bien que difficilement, une diminution importante de la courbe de tassement correspondant à la présence de contraintes effectives sur l'ensemble de la colonne ; la consolidation primaire commence ici à partir du moment où la concentration en surface atteint une valeur C_o .

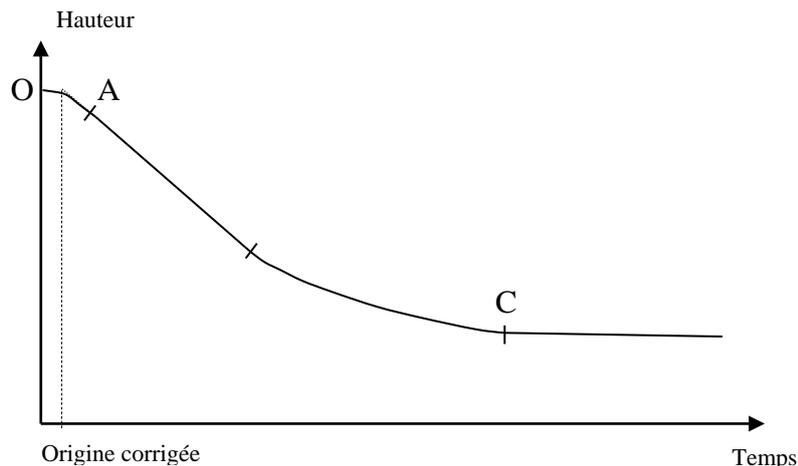


Figure A4-1. Diagramme illustrant une courbe de tassement classique.

La concentration C_o correspond à l'apparition des contraintes effectives, elle délimite une suspension d'un sol à structure continue tridimensionnelle et donc les phénomènes de décantation et de consolidation. La valeur de C_o peut être évaluée par la mesure de la concentration en surface dans une colonne de tassement en fin d'essai.

Selon la théorie de sédimentation de Kynch [1952], pendant ce processus, en coordonnées spatio-temporelles, les caractéristiques associées à chaque concentration sont des lignes de pente W constante, donnée par :

$$W(C) = \frac{d(V_s C)}{dC} = -V_s \left[A_2 \frac{C}{\rho_s} - 2 \right] \quad [3]$$

Le long de chaque ligne caractéristique à l'intérieur d'une colonne de tassement, la concentration C ($C_i \leq C \leq C_o$) est constante (figure A4-2).

Selon un modèle de tassement en absence de contraintes effectives [Sanchez et Grovel 1993], à l'intérieur d'une couche de vase en cours de tassement, le débit solide net $Q_{s/C}$ dépassant une concentration fixe C (par unité de surface horizontale) est donné par :

$$Q_{s/C} = (W - V_s)C = -V_s C \left[A_2 \frac{C}{\rho_s} - 1 \right] \quad [4]$$

Avec les équations précédentes, on peut modéliser la décantation d'une couche de sédiment fin initialement homogène pour des valeurs définies de la hauteur initiale et de la concentration initiale.

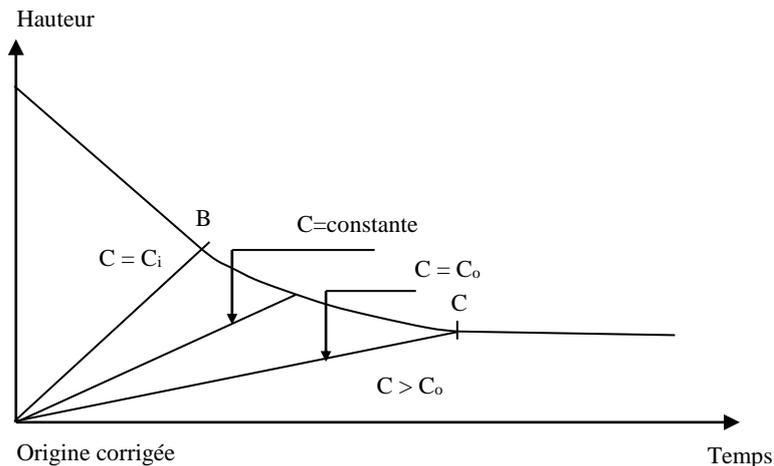


Figure A4-2. Diagramme illustrant l'évolution de la concentration en fonction du temps

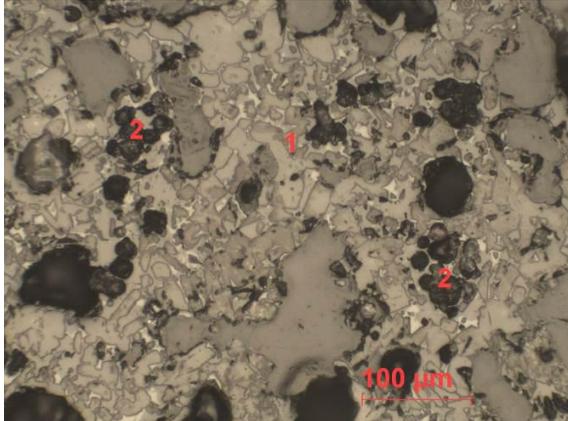
A4.4. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE RELATIVES A L'ANNEXE 4

- Been K. (1980). *Stress strain behaviour of a cohesive soil deposited under water*, Ph.D. Thesis, Oxford University.
- Kynch G.F. (1952). *A theory of sedimentation*, Faraday Society Transactions, 48, pp. 166-176.
- Sanchez M., Grovel A. (1993). *Modélisation du tassement sous poids propre des couches de vase molle et saturée, sur un fond imperméable*, La Houille Blanche, n°1, pp.29-34.
- Sanchez M. (2000). *Dynamique des sédiments fins en milieu marin et agitation portuaire*, Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Caen, 82 p. + annexes.
- Terzaghi K., Peck R.B. (1961). *Mécanique des sols appliquée aux travaux publics et au bâtiment*, Editions Dunod, Paris, 565 p

ANNEXE 5 : OBSERVATION DES CLINKERS EN MICROSCOPIE OPTIQUE EN LUMIERE REFLECHIE

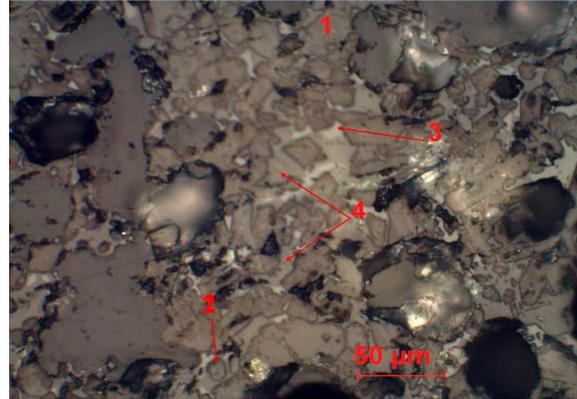
A5.1. PREMIERE SERIE (-K2)

► Echantillon GAR-K2



Microscopie optique en lumière réfléchie : Lumière naturelle

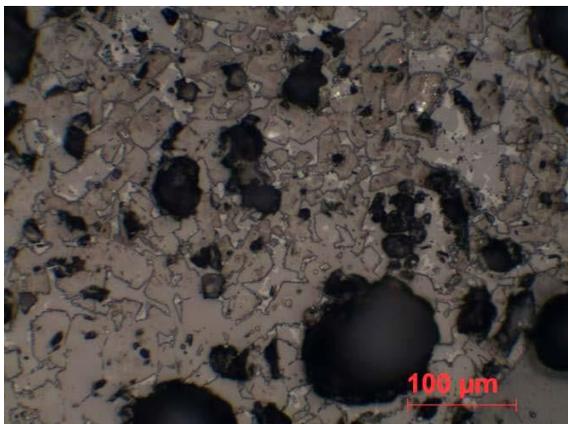
- 1 : grains de clinker,
- 2 : amas de chaux



Microscopie optique en lumière réfléchie : Lumière naturelle

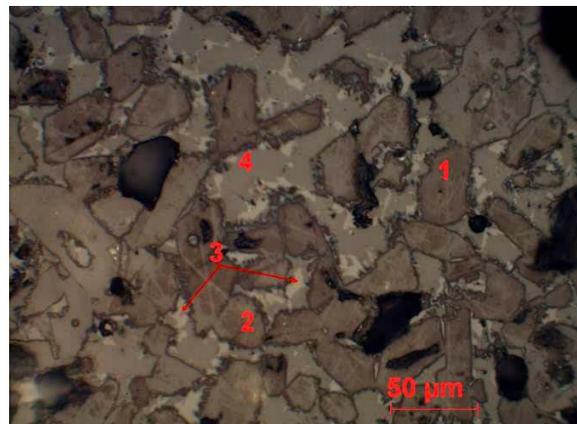
- 1 : cristal de C3S (silicate tricalcique),
- 2 : cristal de C2S (silicate bicalcique),
- 3 : phase interstitielle avec, en blanc, plage réfléchissante de C4AF (alumino-ferrite tétracalcique)
- 4 : plage grise de C3A (aluminate tricalcique)

► Echantillon ISE-K2



Microscopie optique en lumière réfléchie : Lumière naturelle

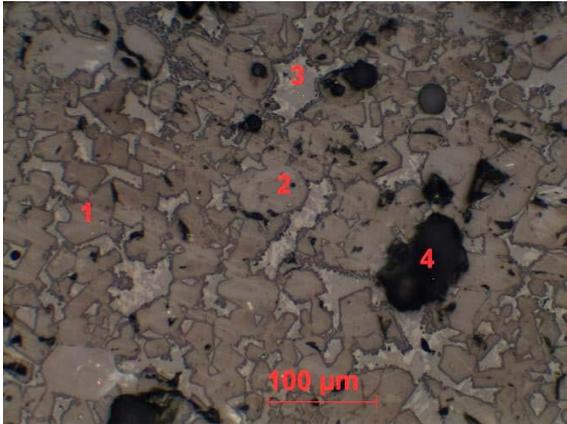
Aspect des grains de clinker



Microscopie optique en lumière réfléchie : Lumière naturelle

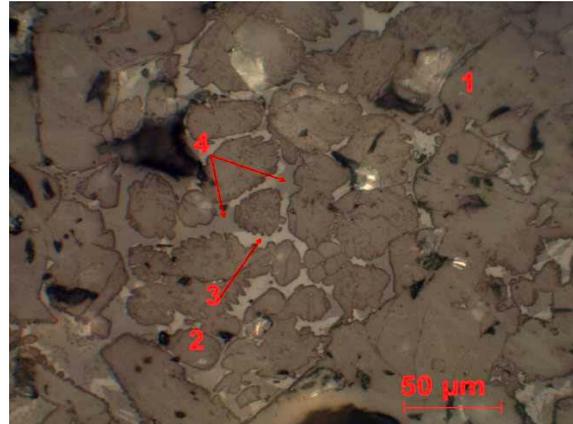
- 1 : cristal de C3S (silicate tricalcique),
- 2 : cristal de C2S (silicate bicalcique),
- 3 : phase interstitielle avec, en blanc, plage réfléchissante de C4AF (alumino-ferrite tétracalcique)
- 4 : plage grise de C3A (aluminate tricalcique)

► **Echantillon RHI-K2**



Microscopie optique en lumière réfléchi : Lumière naturelle

- 1 : cristal de C3S (silicate tricalcique),
- 2 : cristal de C2S (silicate bicalcique),
- 3 : phase interstitielle,
- 4 : porosité

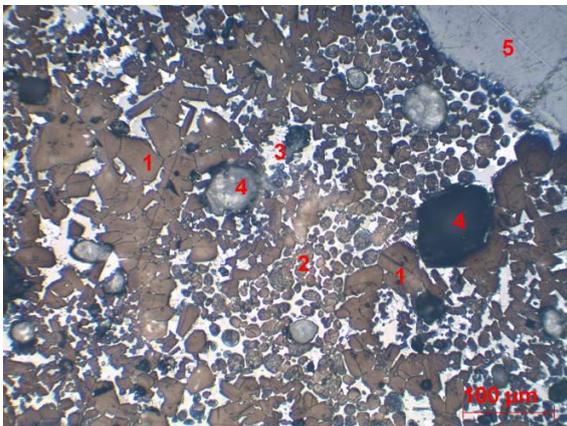


Microscopie optique en lumière réfléchi : Lumière naturelle

- 1 : cristal de C3S (silicate tricalcique),
- 2 : cristal de C2S (silicate bicalcique),
- 3 : phase interstitielle avec, en blanc, plage réfléchissante de C4AF (alumino-ferrite tétracalcique)
- 4 : plage grise de C3A (aluminate tricalcique)

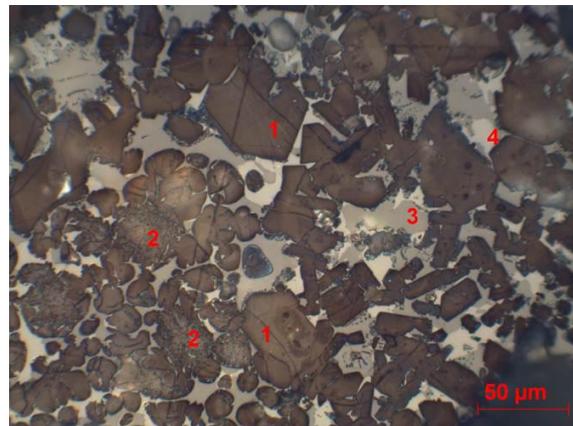
A5.2. DEUXIEME SERIE (-K3)

► **Echantillon GAR-K3**



Microscopie optique en lumière réfléchi : Lumière naturelle

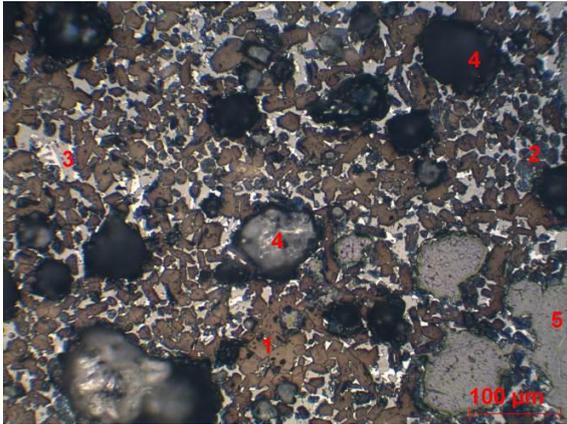
- 1 : cristaux de C3S (silicate tricalcique),
- 2 : cristaux de C2S (silicate bicalcique),
- 3 : phase interstitielle,
- 4 : porosité,
- 5 : résine d'imprégnation



Microscopie optique en lumière réfléchi : Lumière naturelle

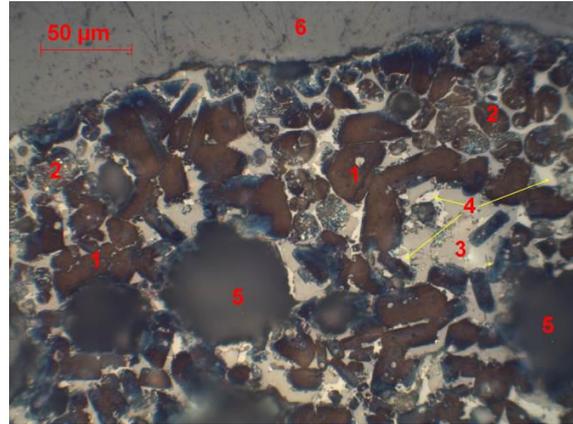
- 1 : cristaux de C3S (silicate tricalcique),
- 2 : cristaux de C2S (silicate bicalcique),
- 3 et 4 : phase interstitielle avec, (3) plage grise de C3A (aluminate tricalcique) et en blanc (4), plage réfléchissante de C4AF (alumino-ferrite tétracalcique)

► **Echantillon ISE-K3**



Microscopie optique en lumière réfléchié :
Lumière naturelle

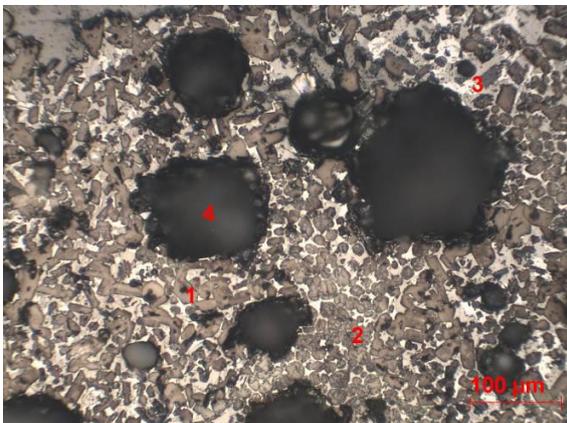
- 1 : cristaux de C3S (silicate tricalcique),
2 : cristaux de C2S (silicate bicalcique),
3 : phase interstitielle,
4 : porosité



Microscopie optique en lumière réfléchié :
Lumière naturelle

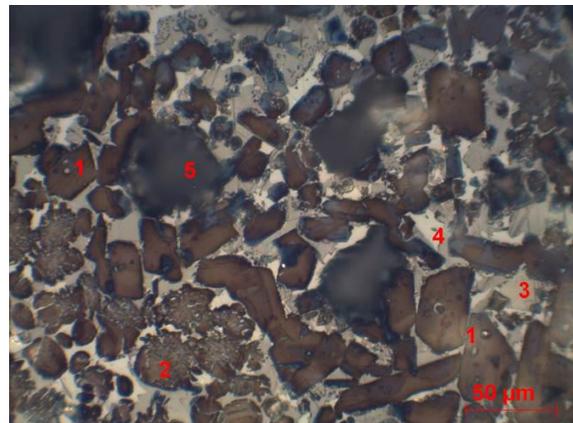
- 1 : cristaux de C3S (silicate tricalcique),
2 : cristaux de C2S (silicate bicalcique),
3 et 4 : phase interstitielle avec, (3) plage grise
de C3A (aluminat tricalcique) et (4) en blanc,
plage réfléchissante de C4AF (alumino-ferrite
tétracalcique)
5 : porosité

► **Echantillon RHI-K3**



Microscopie optique en lumière réfléchié : Lumière
naturelle

- 1 : cristaux de C3S (silicate tricalcique),
2 : cristaux de C2S (silicate bicalcique),
3 : phase interstitielle,
4 : porosité

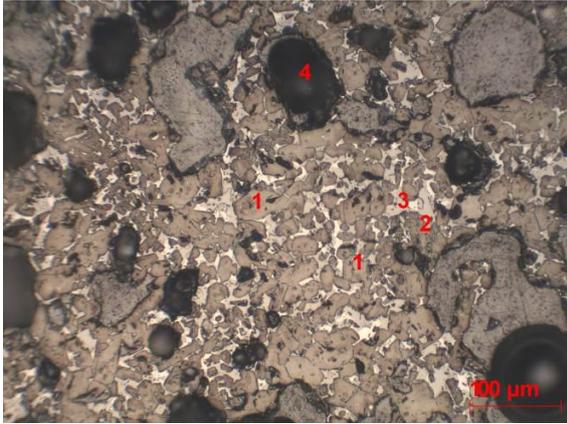


Microscopie optique en lumière réfléchié : Lumière
naturelle

- 1 : cristal de C3S (silicate tricalcique),
2 : cristal de C2S (silicate bicalcique),
3 : phase interstitielle avec, en blanc, plage
réfléchissante de C4AF (alumino-ferrite
tétracalcique)
4 : plage grise de C3A (aluminat tricalcique)
5 : porosité

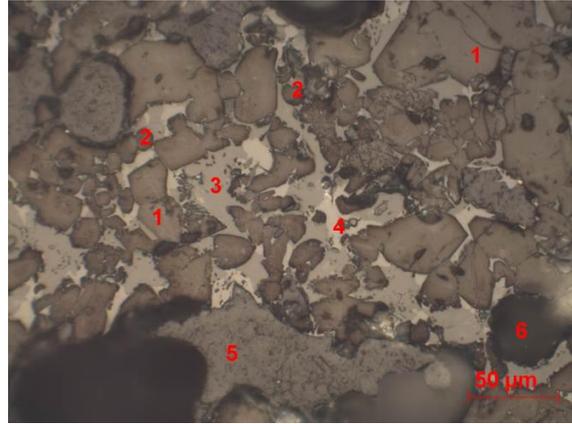
A5.3. TROISIEME SERIE (-K'2)

► Echantillon GAR-K'2



Microscopie optique en lumière réfléchie : Lumière naturelle

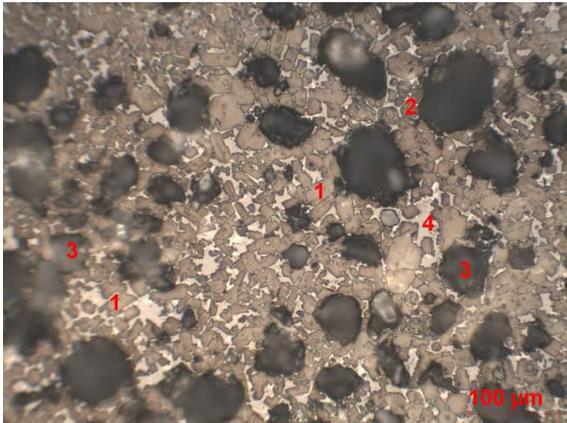
- 1 : cristal de C3S (silicate tricalcique),
- 2 : cristaux de C2S (silicate bicalcique),
- 3 : phase interstitielle,
- 4 : porosité



Microscopie optique en lumière réfléchie : Lumière naturelle

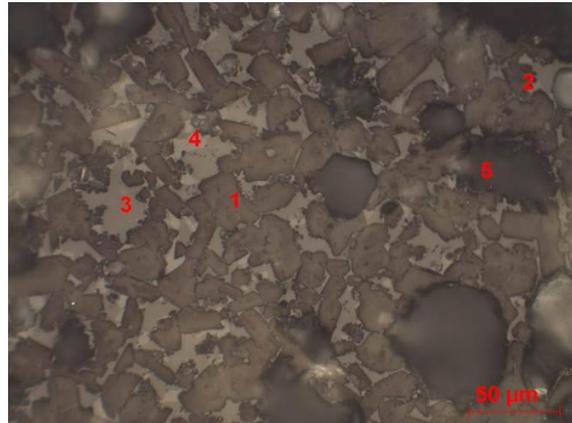
- 1 : cristal de C3S (silicate tricalcique),
- 2 : cristal de C2S (silicate bicalcique),
- 3 : phase interstitielle avec, en blanc, plage réfléchissante de C4AF (alumino-ferrite tétracalcique)
- 4 : plage grise de C3A (aluminate tricalcique)

► Echantillon ISE-K'2



Microscopie optique en lumière réfléchie : Lumière naturelle

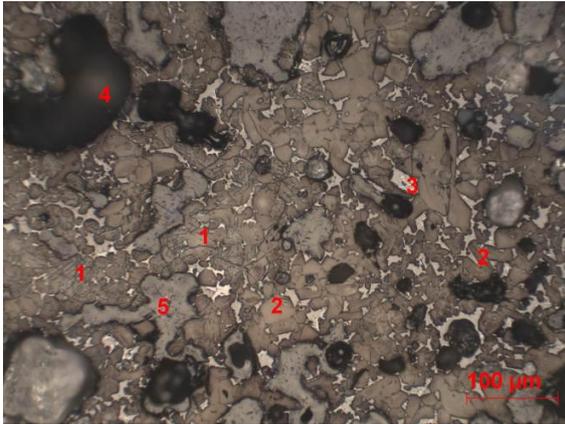
- 1 : cristal de C3S (silicate tricalcique),
- 2 : cristal de C2S (silicate bicalcique),
- 3 : phase interstitielle,
- 4 : porosité



Microscopie optique en lumière réfléchie : Lumière naturelle

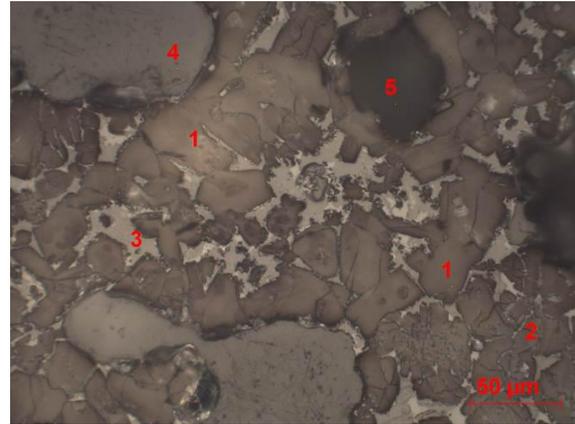
- 1 : cristal de C3S (silicate tricalcique),
- 2 : cristal de C2S (silicate bicalcique),
- 3 : phase interstitielle avec, en blanc, plage réfléchissante de C4AF (alumino-ferrite tétracalcique)
- 4 : plage grise de C3A (aluminate tricalcique)

► **Echantillon RHI-K'2**



Microscopie optique en lumière réfléchie : Lumière naturelle

- 1 : cristaux de C2S (silicate bicalcique)
- 2 : cristaux de C3S (silicate tricalcique),
- 3 : phase interstitielle,
- 4 : porosité ouverte,
- 5 : porosité imprégnée de résine



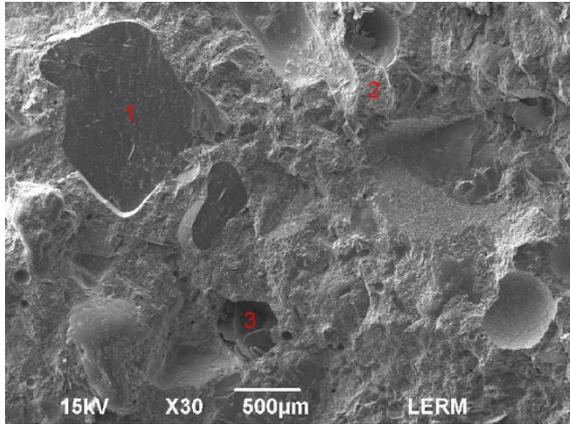
Microscopie optique en lumière réfléchie : Lumière naturelle

- 1 : cristaux de C3S (silicate tricalcique),
- 2 : cristal de C2S (silicate bicalcique),
- 3: phase interstitielle avec, plage grise de C3A (alumine tricalcique) et en blanc, plage réfléchissante de C4AF (alumino-ferrite tétracalcique),
- 4 : porosité imprégnée de résine,
- 5 : porosité ouverte

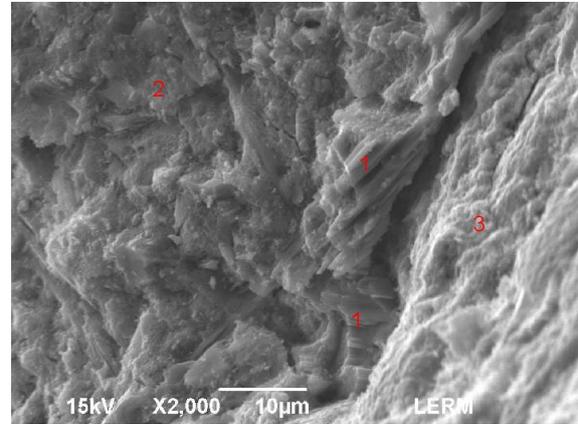
ANNEXE 6 : OBSERVATION DES MORTIERS AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE

A6.1. PREMIERE SERIE DE MORTIERS (TAUX DE SUBSTITUTION DU CIMENT PAR DES SEDIMENTS DE 10 %)

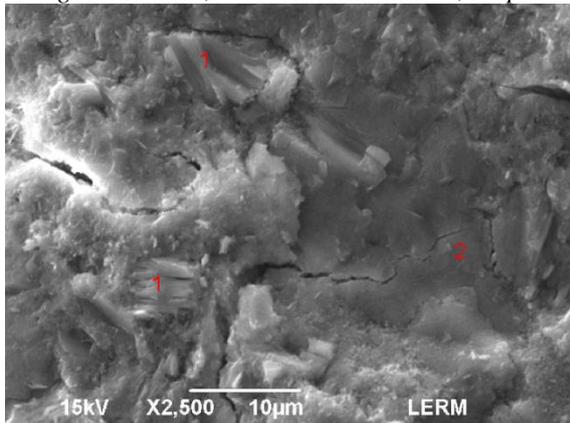
► Echantillon du mortier référencé GAR/10C



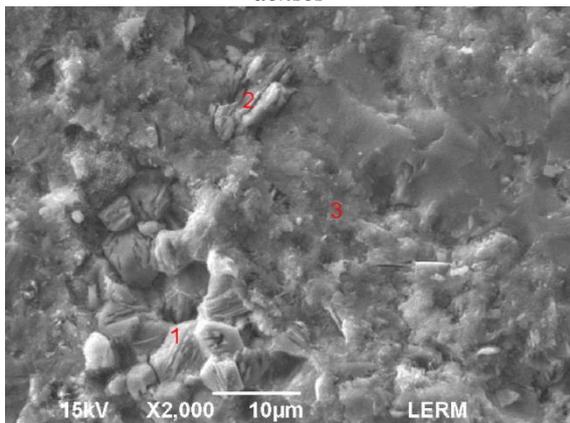
1 : grain siliceux; 2 : matrice cimentaire, 3 : pore



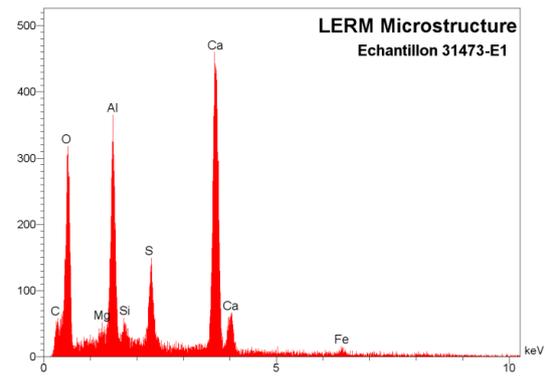
1 : portlandite, 2 : C-S-H, 3 : granulat



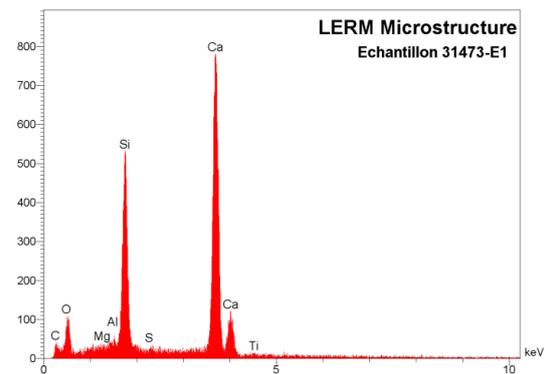
1 : mono-sulfo-aluminate de Ca hydraté, 2 : C-S-H denses



1 : amas de cristaux silicocalciques, 2 : mono-sulfo-aluminate de Ca hydraté, 3 : C-S-H

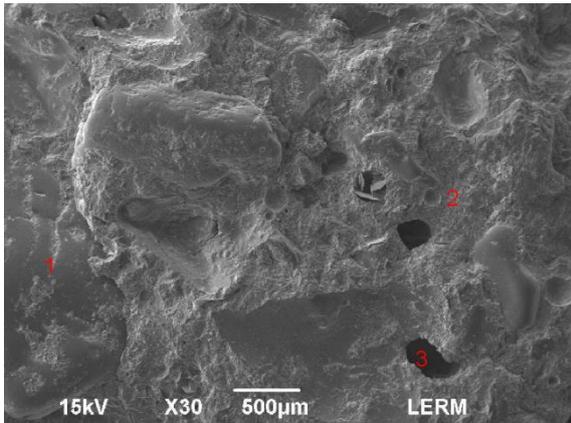


Analyse élémentaire par spectrométrie X à dispersion d'énergie des cristaux 1 de la figure ci-contre

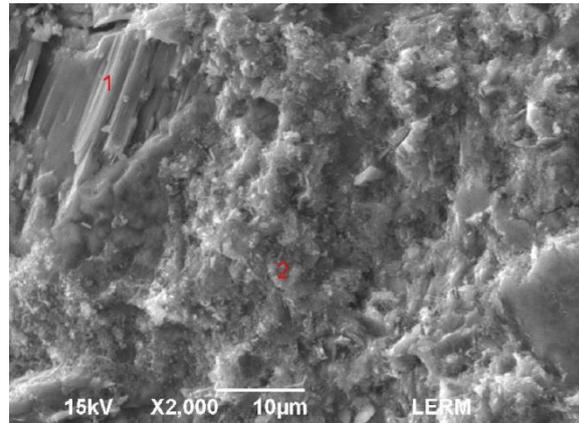


Analyse élémentaire par spectrométrie X à dispersion d'énergie des cristaux 1 de la figure ci-contre

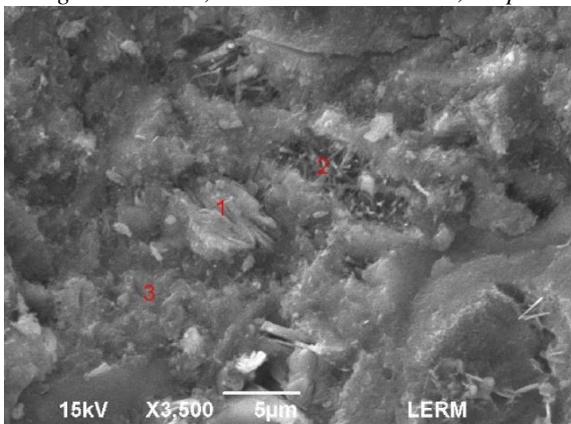
► **Echantillon du mortier référencé ISE/10C**



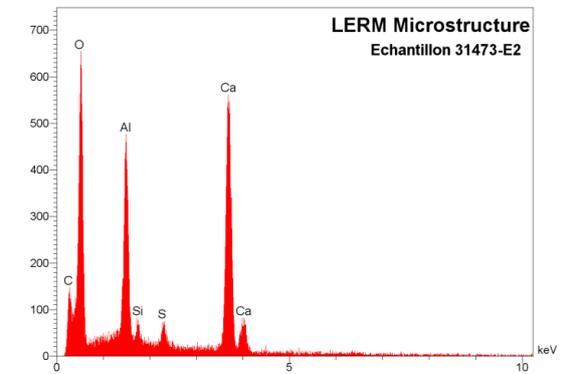
1 : grain siliceux; 2 : matrice cimentaire, 3 : pore



1 : portlandite, 2 : C-S-H microporeux

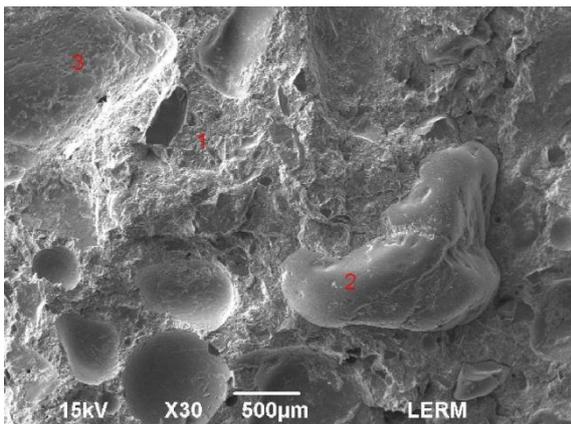


1 : aluminat de Ca hydraté, 2 : C-S-H fibreux, 3 : C-S-H denses

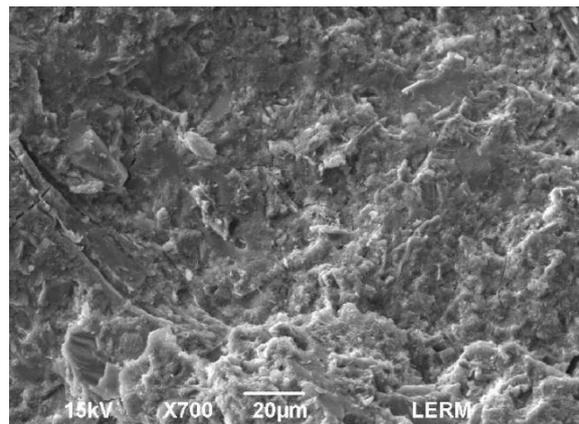


Analyse élémentaire par spectrométrie X à dispersion d'énergie des cristaux 1 de la figure ci-contre

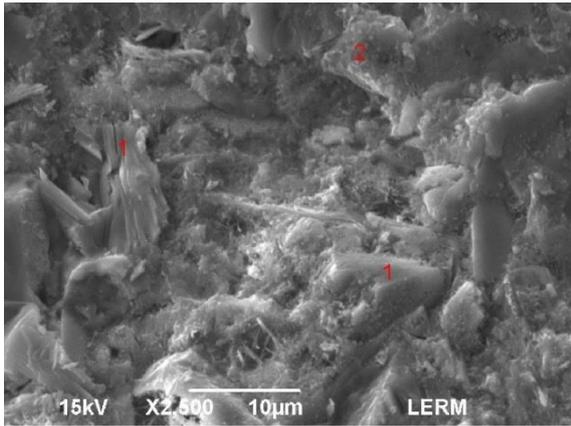
► **Echantillon du mortier référencé RHI/10C**



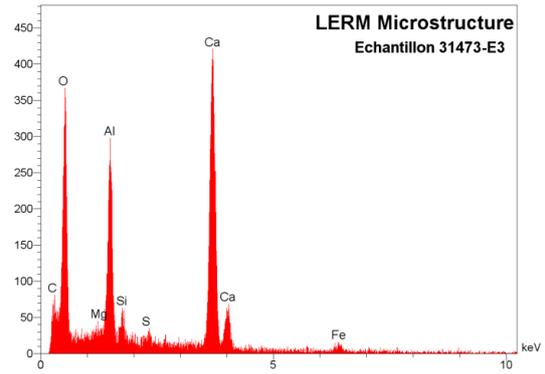
1 : matrice cimentaire, 2 : grain siliceux
3 : empreinte d'un grain desserti



Aspect général de la matrice



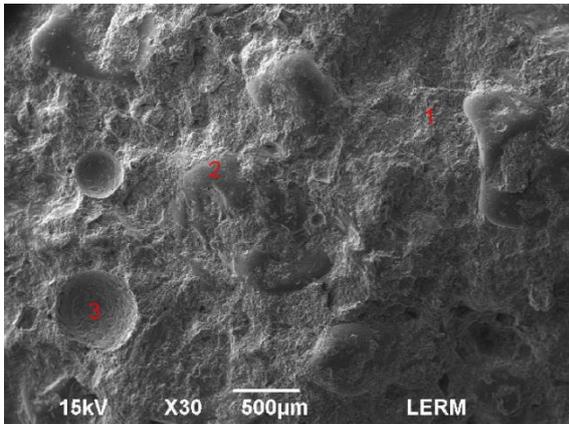
1 : aluminat de Ca hydraté, 2 : C-S-H denses



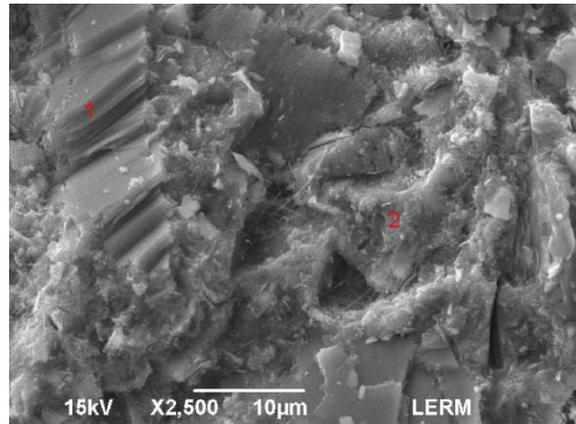
Analyse élémentaire par spectrométrie X à dispersion d'énergie des cristaux 1 de la figure ci-contre

A6.2. DEUXIEME SERIE DE MORTIERS (TAUX DE SUBSTITUTION DU CIMENT PAR DES SEDIMENTS DE 25 %)

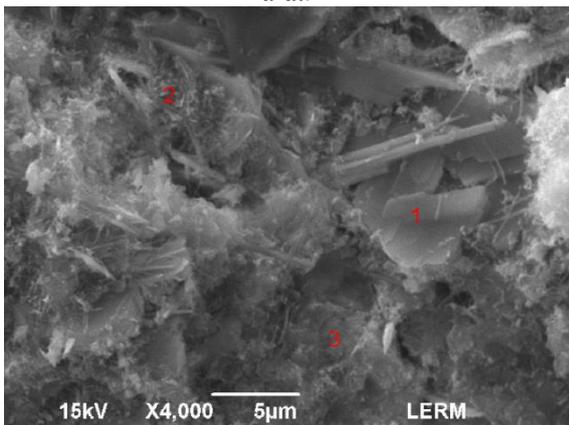
► Echantillon du mortier référencé ISE/25C



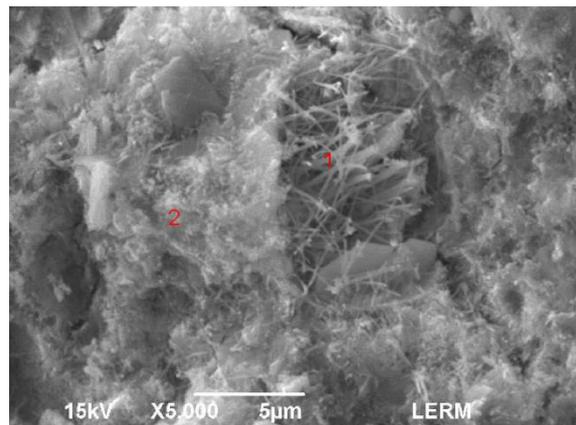
1 : matrice cimentaire, 2 : grain siliceux, 3 : bulle d'air



1 : portlandite, 2 : C-S-H denses

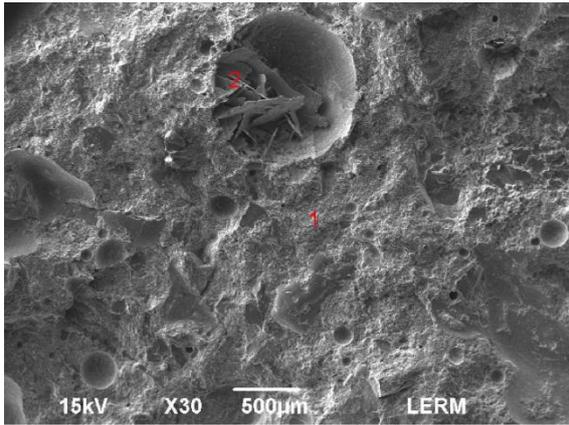


1 : aluminat de Ca hydraté, 2 : C-S-H fibreux, 3 : C-S-H denses

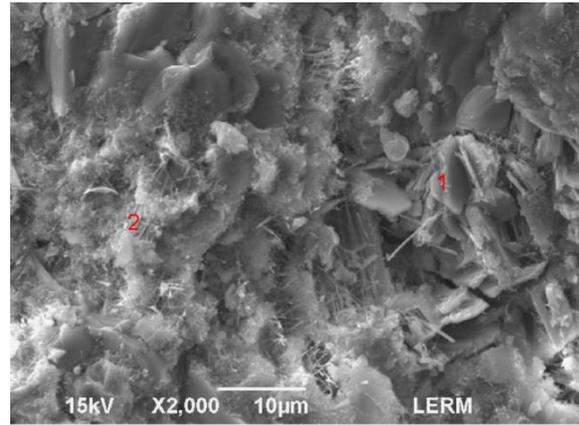


1 : ettringite + C-S-H fibreux, 2 : C-S-H microporeux

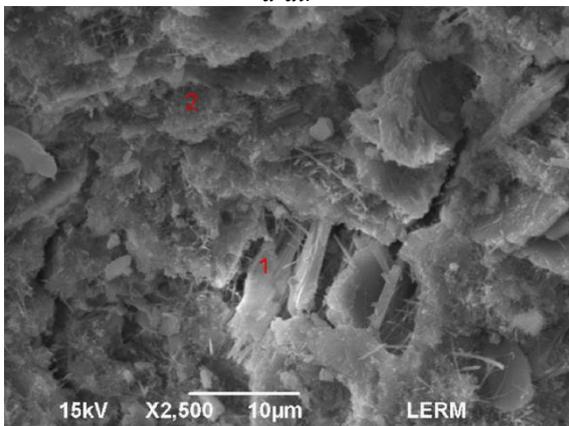
► *Echantillon du mortier référencé RHI/25C*



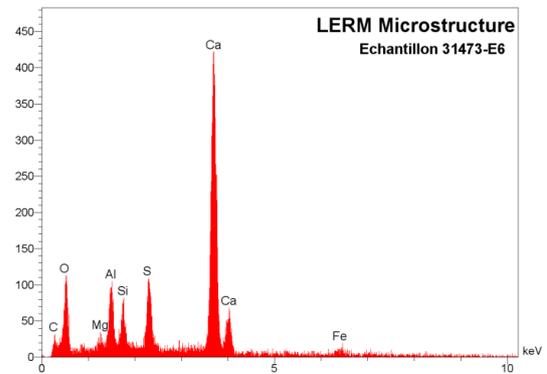
1 : matrice cimentaire; 2 : portlandite dans une bulle d'air



1 : aluminat de Ca hydraté, 2 : ettringite + C-S-H fibreux



1 : ettringite, 2 : C-S-H denses



Analyse élémentaire par spectrométrie X à dispersion d'énergie des cristaux 1 de la figure ci-contre

Résumé de la thèse

Les opérations de dragage de sédiments sont nécessaires pour garantir une bonne exploitation des ports, des voies navigables et des retenues d'eau pour la navigabilité ou pour la production d'énergie. Le peu de retour d'expériences positives sur les voies de valorisation à terre des sédiments fins de dragage marins et fluviaux révèle l'absence de solutions durables. La gestion à terre des sédiments fins de retenues hydroélectriques nécessite une vision intégratrice de l'ensemble des potentialités de valorisation sur le territoire. Une approche durable en matière de gestion des matériaux de dragage exige notamment un changement de point de vue. Même si ces derniers ont un statut de déchet, ces matériaux méritent d'être considérés comme une ressource alternative potentielle qui peut être précieuse dans un contexte de raréfaction de matière première minérale naturelle.

Ainsi, une approche globale adaptée aux sédiments de barrages est proposée pour aboutir à la mise en œuvre d'un outil décisionnel de pré-orientation des sédiments vers des filières de valorisation.

Un examen de 5 voies de valorisation potentielles, à savoir, en cimenterie, en intégration dans le béton, en matériau routier et assimilé, en matériau céramique et en valorisation agronomique, a été mené avec mise en évidence des spécifications d'entrée dans le cas des sédiments fins de barrage, la recherche des paramètres clés, consolidant un inventaire des travaux de recherche et applications dans chaque filière.

Ces 5 filières ont été mises en œuvre à l'échelle du laboratoire pour quatre sédiments fins provenant de retenues hydroélectriques, représentatifs de différentes typologies. Tout d'abord une caractérisation minérale, géotechnique et agronomique a permis de discuter de l'adéquation sédiments – filières au regard des critères d'entrée dans les voies de valorisation. S'ensuivent les essais de valorisation *i.e. fabrication d'un clinker, addition de sédiments dans un mortier, élaboration d'un matériau routier et confection d'un matériau céramique*, mettant en avant les caractéristiques favorables ou défavorables des sédiments fins en relation avec la filière étudiée.

Un outil de décision a été conçu pour pré sélectionner les voies de valorisation. Il a été construit à partir de l'identification et l'interprétation de critères techniques indicateurs, et à partir d'une caractérisation minimale. Enfin l'accent est mis sur l'importance de prendre en compte la proximité des sites de valorisation possibles.

Thesis' abstract

Sediment dredging is needed to ensure good operation of ports, waterways and reservoirs insofar as navigation or energy production is concerned. The analysis of feedback from experiments concerning beneficial uses of fine sediments dredged from marine and river environments, shows that sustainable solutions are very limited or do not exist. Land-based management of hydro-electric dams with sediments requires the integration of all resources existing in a given area. A sustainable approach to management of dredged material requires, inter alia, a change of point of view. Even if their status is that of waste, these materials deserve to be considered as a valuable potential alternative resource, bearing in mind the scarcity of natural mineral material.

Therefore, this thesis proposes a global approach, adapted to dam fine sediments, to implement a decision-making tool in order to pre-screen sediments towards re-use channels.

A study of five potential industrial sectors for reusing fine dam sediments was conducted, including cement works, concrete admixtures, road building, ceramics, and agriculture. It highlighted input specifications of fine dam sediments, and research on key parameters. An inventory was established for each of these industrial sectors, quoting related research works and applied engineering.

These five sectors or channels were implemented and investigated in laboratory conditions using four hydroelectric dam fine sediments, representative of various typologies. First, a mineral, geotechnical and agronomic characterization was conducted, allowing to weigh sediments - industrial sectors or channels, considering input specifications of re-use objectives. Then, re-use tests followed, namely, *manufacturing of a clinker, addition of sediments to a mortar, development of road material and manufacturing of a ceramic material*, highlighting positive or negative characteristics of fine sediments in relation to various channels studied.

A decision tool was implemented for preselecting re-use channels. It was designed from the identification and interpretation of pertinent technical criteria, and from minimal characterization of fine dam sediments. Finally, it is stressed that geographical proximity for possible re-use is of paramount importance.