SEDIMED

UN SUCCÉS DU DÉVELOPPEMENT ÉCO-INDUSTRIEL FRANÇAIS

Juin 2021

IMT Nord Europe
École Mines-Télécom
IMT-Université de Lille

SOMMAIRE

PRÉAMBULE 6

PRÉFACE - par ENVISAN porteur du projet SEDIMED 7

I. INTRODUCTION 8

II. CONTEXTE D'EMERGENCE DU PROJET SEDIMED 8

II.1 - Comment mesure-ton l'évolution des connaissances, par qui sont-elles produites et comment sont-elles financées ? 9

II.2 - Une thématique et des compétences 13

II.3 – Travaux préalables à SEDIMED 13

II.4 - De SEDI.MAR.D.83 à SEDIMED 16

II.5 - Les composantes du projet SEDIMED 17

II.5.1 - Le consortium 18

II.5.2 - Les activités 20

II.5.3 - Les prototypes expérimentaux 22

II.5.4 - Le planning 23

II.5.5 - La localisation 23

II.5.6 - Les retombées attendues 24

II.5.7 - Le budget prévisionnel et plan de financement 25

III. LES SÉDIMENTS 26

III.1 - Présentation 26

III.2 - Prélèvement et échantillonnage 29

III.3 - Caractérisation physico-chimique et géotechnique des sédiments 32

III.3.1 - Distribution granulométrique des matériaux étudiés (Normes XP P 94-041, NF ISO 13320) 33

III.3.2 - Mesure de la masse volumique absolue par pycnomètre à hélium 34

III.3.3 - Détermination de la perte au feu (calcination) (NF EN 15169, XP P94-047) 35

III.3.4 - Teneur en eau (NF P 94-050, 1995) 36

III.3.5 - Valeur au bleu de méthylène VBS (NF P 94 068) 37

III.3.6 - États de consistance - Limites d'Atterberg 38

III.3.7 - Classification GTR 38

III.3.8 - Caractéristiques de portance et de compactage (NF P 94 078, NF P 94 093) 40

III.3.9 - Analyse minéralogique 42

III.4 - Récapitulatif général 44

III.4.1 - PSL 44

III.4.2 - QUAI NOEL MODIFIÉ 45

III.4.4 - QUAI CORSE 46

III.5 - Caractérisation environnementale et possibilités de valorisation 47
III.5.1 - PORT SAINT-LOUIS 48
Interprétation des résultats 48
Conclusions relatives aux possibilités de valorisation 48
III.5.2 - QUAI NOËL – QUAI NOËL MODIFIÉ 48
Interprétation des résultats 48
Conclusions relatives aux possibilités de valorisation 49
III.5.3 - QUAI CORSE 49
Interprétation des résultats 49
Conclusions relatives aux possibilités de valorisation 50
IV. OUVRAGES RÉALISÉS : DESCRIPTION DES OUVRAGES – MÉTHODOLOGIES EMPLOYÉES – SUIVIS RÉALISÉS – RÉSULTATS OBTENUS 50
IV.1 - Essais de valorisation en technique routière 51
IV.1.1 - Casiers lysimétriques mis en œuvre à l'INERIS (plateforme Ardévie) 53
Bilan du suivi environnemental des lysimètres : 55
IV.1.2 - Prototypes routiers - Route et Écomodelés (CPEM ENVISAN) 56
IV.1.2.1 PROTOTYPES ROUTE 57
Conception des plots routiers 57
Suivis réalisés et résultats obtenus 64
IV.1.2.2 PROTOTYPES ÉCOMODELÉS PAYSAGERS 67
Conception des plots écomodelés paysagers 68
Suivis réalisés et résultats obtenus 72
IV.2 - Essais de valorisation en génie civil : Prototypes Béton 76
V. RETOMBEES DU PROJET SEDIMED 85
VI. DIFFICULTES RENCONTREES ET RESOLUTIONS 88
VI.1 - Evolution du partenariat 88
VI.2 - Evolution du statut du site 89
VI.3 - Aménagement du site 90
VI.4 - Prototypes mis en œuvre 91
VII - DE SEDIMED AU CPEM 92
VIII - CONCLUSION GENERALE 94

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Echelle TRL (Technologie Readness Level) 9
Figure 2 : Relation entre échelles TRL et MRL[2] 10
Figure 3 : Typologies de financements des niveaux de l'échelle TRL 11
Figure 4 : Synthèse des principaux outils de financement de la Recherche & Développement & Innovation (source Keynergie) 12
Figure 5 : Positionnement des programmes de recherche « sédiments » dans la chaine de gestion des sédiments non immergeables 16
Figure 6 : Avancement des connaissances relatives à la valorisation des sédiments dans des filières terrestres 17
Figure 7 : Consortium et partenaires du projet SEDImatériaux MEDoc (source ENVISAN) 19
Figure 8 : Voie d'accès au bassin de lagunage du CPEM ENVISAN 21
Figure 9 : Schéma organisationnel des activités du projet SEDImatériaux MEDoc (source ENVISAN) . 21
Figure 10 : Prototypes expérimentaux : écomodelé paysager et route 22
Figure 11 : Planning initial du projet SEDIMED (source ENVISAN) 23
Figure 12 : Localisation, dans la rade de Toulon, du terre-plein sur lequel s'est réalisé le projet SEDIMED (source ENVISAN) 24
Figure 13 : Zone de stockage des terres et sédiments et de mise en œuvre des prototypes expérimentaux (CPEM ENVISAN) 24
Figure 14 : Plan de financement final du projet SEDIMED (source ENVISAN) 25
Figure 15 : Représentation de l'avancée effective des connaissances produite dans le cadre du projet SEDIMED 26
Figure 16 : Répartition des points d'échantillonnage 29
Figure 17 : Sédiment du Port Saint Louis après lagunage actif (septembre 2015) 29
Figure 18 : Carte des points d'échantillonnage du Quai Noël 30
Figure 19 : Photo du sédiment Quai Noël (Modifié) utilisé - septembre 2015 30
Figure 20 : Localisation des points échantillonnés aux Quais Fournel et Corse 31
Figure 21 : Photo du sédiment Quai Corse utilisé (septembre 2015) 31
Figure 22 : Homogénéisation et quartage des sédiments après réception au laboratoire 32
Figure 23 : États de consistance – Limites d'Atterberg 38
Figure 24 : Classification GTR du sédiment Port Saint Louis 39
Figure 25 : Classification GTR de sédiments de QNM 39
Figure 26 : Classification GTR des sédiments QC 40
Figure 27 : Matériels de l'essai Proctor modifié – IPI (a : Cutteur à sol ; b : conservation des mélanges ; c : moule CBR ; d : machine de compactage ; e : moule CBR après compactage ; c : presse pour mesurer l'IPI) 41
Figure 28 : Lysimètres étudiés à l'INERIS – vues de dessus et de côté 53
Figure 29 : Système de collecte des eaux de percolation et de ruissellement des lysimètres – les conduits issus de chaque cuve rejoignent des réservoirs distincts situés dans l'espace technique en contrebas 54
Figure 30 : Schéma de coupe longitudinale de la route SEDIMED (plot témoin, QC, QNM – réalisation Néo Sud) : 57
Figure 31 : Zoom de coupe longitudinale de la route SEDIMED (plot témoin, QC, QNM) 58
Figure 32 : Schéma de coupe transversale de la route mise en œuvre pour le projet SEDIMED 59
Figure 33 : Plan définitif de la voie Prototype SEDIMED 61
Figure 34 : Bouche d'accès au puisard de collecte des eaux de percolation sur un des trois plots routiers 65

Figure 35 : Mesure de déflexion sur l'ouvrage SEDIMED 66
Figure 36 : Relevé topographique initial des éco modelés - Quai Corse / Quai Noël / Témoin 73
Figure 37 : Casiers pour les tests de végétalisation des sédiments bruts 75
Figure 38 : Évolution de la végétalisation spontanée sur les prototypes écomodelés 75
Figure 39 : Coffrage bois équipé de l'armature acier, du crochet et renforcé par des madriers 77
Figure 40 : Les 6 blocs béton décoffrés 78
Figure 41 : Eprouvettes cylindriques pour mesure des résistances mécaniques 79
Figure 42 : Photo du scléromètre utilisé 79
Figure 43 : Blocs en béton positionnés dans le dispositif de suivi 83
Figure 44 : Planning prévisionnel autorisation ICPE (source ENVISAN) 90
Figure 45 : Ouvrage prototype : Ecomodelé paysager 91
Figure 46 : Plan masse final du projet SEDIMED (source ENVISAN) 93

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Classification des tests de caractérisation réalisés 27
Tableau 2 : Programme expérimental réalisé sur les sédiments ainsi que les normes suivies 28
Tableau 3 : Valeur maximales de perte au feu 35
Tableau 4 : Teneur en eau maximale des sédiments 36
Tableau 5 : Limites de liquidité et de plasticité des sédiments étudiés dans SEDIMED 38
Tableau 6 : Résultats du Proctor Modifié – IPI des sédiments QC bruts 42
Tableau 7 : Composition en éléments chimique des sédiments 42
Tableau 8 : Résultat de l'analyse semi quantitative par fluorescence des rayons X exprimée en pourcentages massiques des sédiments QNM bruts 42
Tableau 9 : Résultats d'essais sur les sédiments du Port Saint Louis du Mourillon (PSL) 44
Tableau 10: Synthèse des caractéristiques physiques de sédiments QNM brut 46
Tableau 11 : Synthèse des caractéristiques physiques des sédiments QC brut 46
Tableau 12 : Quantités de matériaux utilisées dans la couche de forme des plots routiers 57
Tableau 13 : Quantités de matériaux dans les plots écomodelés paysagers 57
Tableau 14 : Composition des différentes couches de plots routiers 59
Tableau 15 : Quantités de matériaux mises en œuvre dans les blocs béton 77
Tableau 16 : Caractéristiques chimiques du sable et des sédiments 80

PRÉAMBULE

Cet ouvrage présente le projet de Recherche et Développement SEDIMED, de sa genèse à sa conclusion, qui a permis la création du premier centre industriel français de traitement des sédiments de dragage, situé dans le Var, en réponse à une problématique mondiale de protection des écosystèmes marins et de préservation de la santé des populations.

Cet ouvrage présente également l'histoire de ces femmes et de ces hommes qui ont participé à ce projet ambitieux et permis, par leurs compétences, implications et collaborations l'atteinte des objectifs fixés.

Il est dédicacé tout particulièrement à Patrick Gentilini et Cédric Garnier, deux des plus éminents spécialistes dans leurs domaines, qui ont contribué à l'avancement des connaissances de manière déterminante et qui nous ont hélas quitté durant le chemin. Il est également dédicacé à Claude Alzieu qui a initié les réflexions au sujet de l'impact environnemental de l'activité et dont la collaboration a été fondatrice.

Il est enfin l'occasion de formuler des remerciements à un triptyque essentiel de partenaires techniques et financiers, Pierre Boissery, Bernard Vigne et Gilles Giorgetti représentants respectivement l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, l'ADEME PACA et la Région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur dont le soutien a été sans faille au cours des quinze dernières années.

PRÉFACE - par ENVISAN porteur du projet SEDIMED

La thématique de gestion à terre des sédiments de dragage est née dans les années 2000, suite à l'évolution réglementaire amenant à déterminer le potentiel ou non d'immergeabilité de cette matrice dans le milieu aqueux.

Parallèlement, de nombreux projets scientifiques en lien avec ce nouveau « déchet » se sont développés afin de contribuer à apporter une connaissance et un cadre pour la gestion à terre de ces sédiments. C'est ainsi que le Conseil Départemental du Var s'est positionné comme l'un des territoires moteurs sur l'évolution de cette thématique et notamment aux travers de projets de Recherche et Développement tels que SEDIMARD 83 puis du projet SEDIMED pour lequel la société Envisan, division environnement de Jan De Nul Group, fût son porteur de 2010 à 2016.

SEDIMED a été un projet collaboratif pour lequel des compétences portées et partagées, par l'ensemble des partenaires publics, scientifiques, d'ingénieries et industriels, auront permis sa réalisation. Les différents résultats obtenus auront contribué à l'évolution réglementaire, scientifique et technique permettant d'apporter un certain nombre d'orientations liées à la gestion intégrée à terre des sédiments marins non-immergeables.

Ce projet pionnier et transversal à plusieurs titres a ainsi permis de progresser sur la connaissance, les traitements et le potentiel de valorisation de cette matrice. Les travaux menés ont apporté des solutions pérennes de gestion à terre notamment par l'intermédiaire de la création d'une Installation Classée pour la Protection de l'Environnement (ICPE) offrant des options de traitements et de valorisations dans un cadre normatif et législatif maitrisés. Précisons que les résultats expérimentaux obtenus par SEDIMED ont contribué à initier une réflexion portée par la Direction Général de la Prévention des Risques (DGPR) sur les besoins d'adaptation réglementaires spécifiques à ce type de déchet.

Aujourd'hui Envisan, grâce à son Centre de Production d'Eco-Matériaux (CPEM) implanté au cœur de la Rade de Toulon est identifié comme un outil modèle à l'échelle nationale proposant ainsi aux Maitres d'Ouvrages et notamment aux gestionnaires portuaires une réponse pertinente à l'ensemble des étapes de gestion de leurs sédiments dragués. De l'évaluation des caractéristiques sanitaire, chimique et physique du sédiment, en passant par une phase d'acceptation, de traitements et de détermination des possibilités de valorisation, cet outil permet une gestion optimisée des sédiments de dragage et cela dans le respect de la traçabilité en vigueur pour ce type de déchet.

DJN Envisan
ENVIRONMENTAL SOLUTIONS

I. INTRODUCTION

Cet ouvrage présente l'histoire qui a permis d'aboutir en 15 ans à l'inauguration de la première plateforme industrielle française de traitement des sédiments non immergeables en vue d'une gestion à terre, dans la rade de Toulon dans le Var. Outre les aspects techniques et financiers, les enjeux définis et les défis surmontés, c'est aussi l'histoire des femmes et des hommes qui ont contribué, par leurs compétences et leur implication, à l'émergence de cette installation, qui est présentée ici. Il s'agit d'un travail collaboratif et partenarial qui a su associer de nombreux experts, sur les diverses thématiques liées au sujet, ainsi que les services de l'Etat, afin de répondre aux attentes nationales liées à cette problématique.

Projet innovant de recherche et de développement, SEDIMED, porté par ENVISAN France SAS (Division environnement de Jan De Nul Group, leader mondial du dragage), associait des phases de recherche et des actions de développement industriel par la mise en œuvre de prototypes de filières de valorisation. Il s'inscrit dans une série de projets visant tous, de manière articulée, à acquérir les connaissances utiles à l'ouverture de l'activité de gestion à terre des sédiments non immergeables en France. Il a conduit à la création d'un site industriel, classé Installation Classée pour la Protection de l'Environnement, le Centre de Production d'Eco-Matériaux (CPEM) inauguré en septembre 2015 et situé dans la Zone Industrialo-Portuaire de Brégaillon à La Seyne-sur-Mer dans la rade de Toulon.

L'objectif du projet SEDIMED était d'apporter une réponse opérationnelle à l'échelle du département du Var mais qui pourrait aussi produire les données utiles à échelle nationale. Un partenariat large et diversifié, associant des industriels, des bureaux d'études d'ingénierie, des organismes scientifiques, des gestionnaires portuaires, des institutionnels et des partenaires financiers a été monté. Les services de l'Etat en chargent de la question ont également été associés afin de permettre les échanges nécessaires pour élaborer un programme qui permette de faire avancer la question conformément aux attentes du Ministère de l'Environnement.

II. CONTEXTE D'EMERGENCE DU PROJET SEDIMED

À la suite de l'entrée en vigueur de l'arrêté du 14 juin 2000, introduisant un référentiel qualité des sédiments dragués, de nombreux établissements portuaires se sont trouvés dans une situation de blocage. En effet, ce texte, en interdisant l'immersion des sédiments contaminés au-delà des seuils définis, orientait vers une gestion à terre sans l'encadrer. Le déchet – sédiment apparaissait et les questions nombreuses relatives à sa gestion émergeaient.

Après avoir présenté l'outil utilisé pour mesurer l'avancement des connaissances, qui structure toute recherche jusqu'à un niveau opérationnel, et les typologies de financement associées, son application au projet SEDIMED sera détaillée.

II.1 - Comment mesure-ton l'évolution des connaissances, par qui sont-elles produites et comment sont-elles financées ?

Le niveau de maturité d'une technologie se mesure sur le plan opérationnel à l'aide de l'échelle TRL (Technologie Readness Level). Conçue par la NASA en 1974 pour gérer le risque technologique de ses programmes, elle était constituée initialement de 7 niveaux. Elle en compte 9 depuis 1995.

Outil structurant pour la gestion de l'innovation, l'échelle définit des critères techniques à respecter pour franchir les niveaux. En 2013, l'Organisation Internationale de la normalisation a défini la norme ISO 16290 comme standard pour évaluer les niveaux de maturité technologiques et les critères d'évaluation.

Les divers niveaux de l'échelle TRL et les techniques permettant le passage d'un niveau à l'autre sont représentés sur le schéma suivant :

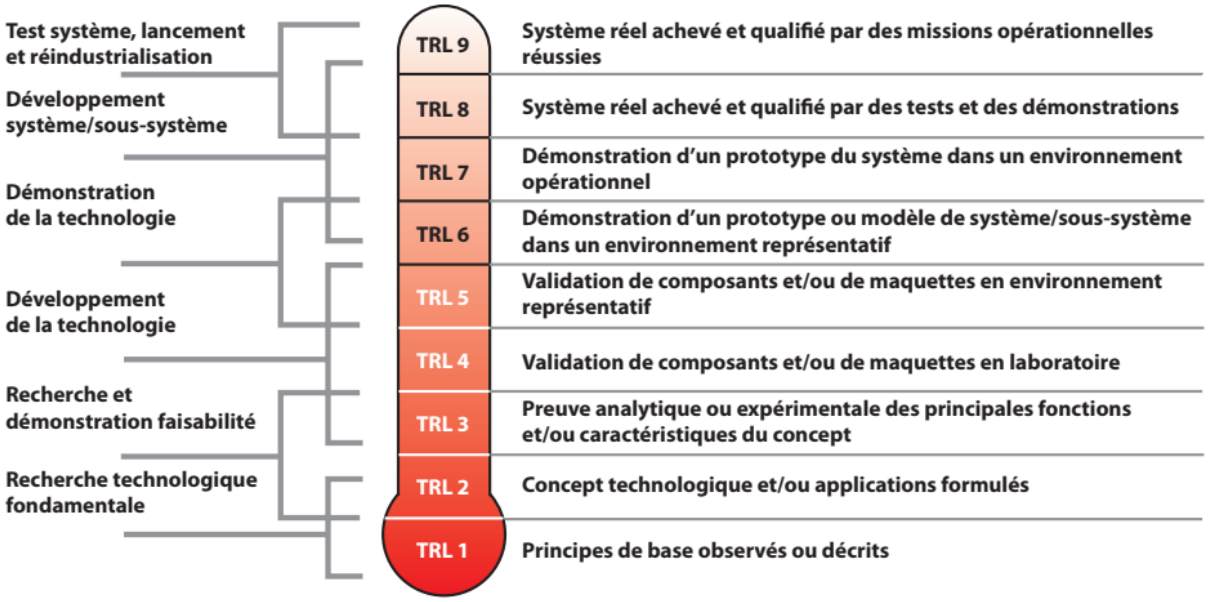


Figure 1 : Echelle TRL (Technologie Readness Level)[1]

Les niveaux 1 à 4 sont qualifiés d'émergence (niveau 1 : recherche fondamentale, niveaux 2 à 4 : recherche technologique en laboratoire et appliquée) ; de 5 à 7, il est question de développement (niveau 5 : démonstrateur, niveaux 6 et 7 : prototypes dans des conditions opérationnelles) ; les niveaux 8 et 9 correspondent au niveau de maturité de la connaissance.

L'échelle TRL mesure donc un niveau de maturité technologique. L'industrie s'est emparée de cet outil d'évaluation pour la stratégie d'innovation qu'il propose et le potentiel de développement économique et de création d'emplois associés.

[1] Plan stratégique de recherche & technologie de défense et de sécurité – DGA 2009

Pour étudier son applicabilité à échelle industrielle il convient d'utiliser l'échelle MRL (Manufacturing Readness Level) qui compte 8 niveaux, de 3 à 10. Cette échelle MRL permet de mesurer la maturité marché d'un produit. Ces deux échelles sont complémentaires et doivent être avancées en parallèle pour atteindre une maturité marché[2].

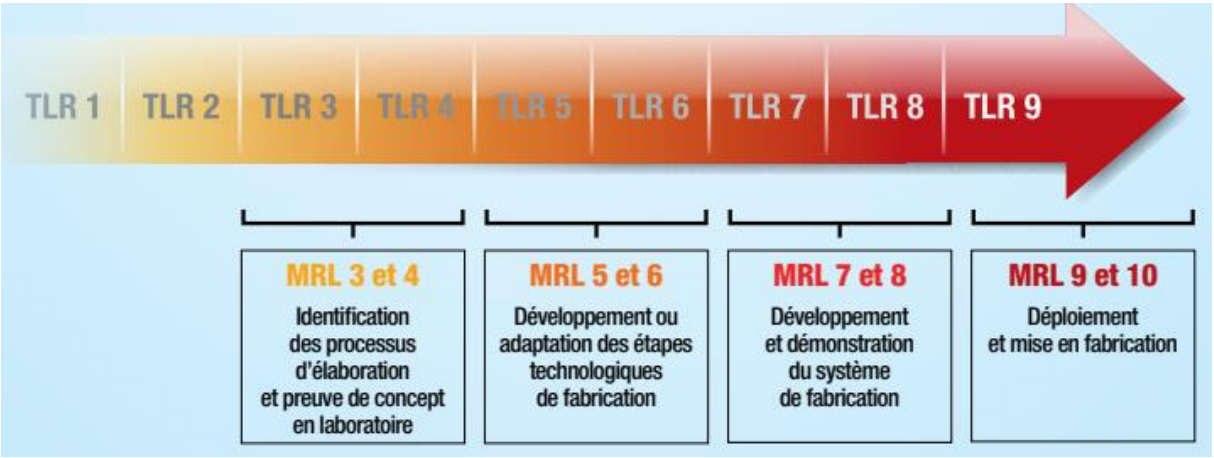


Figure 2 : Relation entre échelles TRL et MRL[2]

Les acteurs impliqués dans les divers niveaux de l'échelle TRL sont les suivants :

- Niveaux 1 à 4 : recherche académique - chercheurs de laboratoires liés aux écoles d'enseignement supérieur et aux universités
- Niveaux 5 à 7 : recherche partenariale public - privé – projets collaboratifs
- Niveaux 8 et 9 : recherche privée pour ouverture de marché – industries et PME du sujet traité

La réalisation des projets nécessite des financements dont les sources sont diverses selon l'avancement des connaissances. Le schéma ci-après présente, en parallèle de l'évolution des connaissances, les sources de financements associées :

[2] Source : Dossier thématique : La recherche expérimentale degré de maturité technologique suivant les TRL – Réseau Centres Techniques Industriels (CTI) 2013

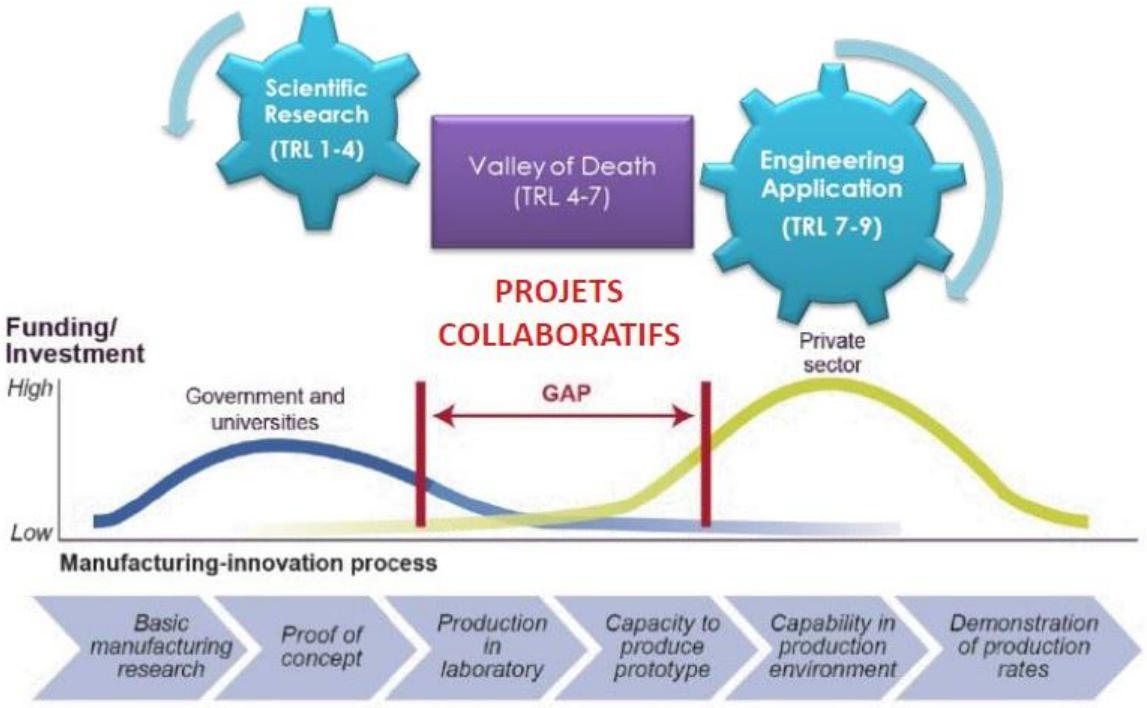


Figure 3 : Typologies de financements des niveaux de l'échelle TRL[3]

Si les financements au début et à la fin d'un processus de recherche sont clairement identifiés, la « vallée de la mort » (Valley of Death) représente la phase critique en termes de financements. Elle se situe en effet entre la phase de financements publics, à la base de l'échelle TRL, et les financements privés, au terme de l'avancement des connaissances avant ouverture de marché. Dans ce contexte, cette étape d'avancée des connaissances nécessite un effort partagé public - privé.

Ainsi, le recours aux projets collaboratifs, en réponses à des appels à projets, est une option que de nombreux acteurs retiennent pour passer ladite vallée. Par ailleurs, de nombreux organismes de financement retiennent l'échelle TRL dans les projets qu'ils souhaitent financer et précisent donc le niveau TRL souhaité pour les projets proposés à financement. Selon la maturité des projets, les financements, accessibles par les porteurs de projets ou consortium, peuvent être les suivants :

[3] Source : http://www.bloomoon.eu/fr/actualites/prise-de-parole/Technology-readiness-level

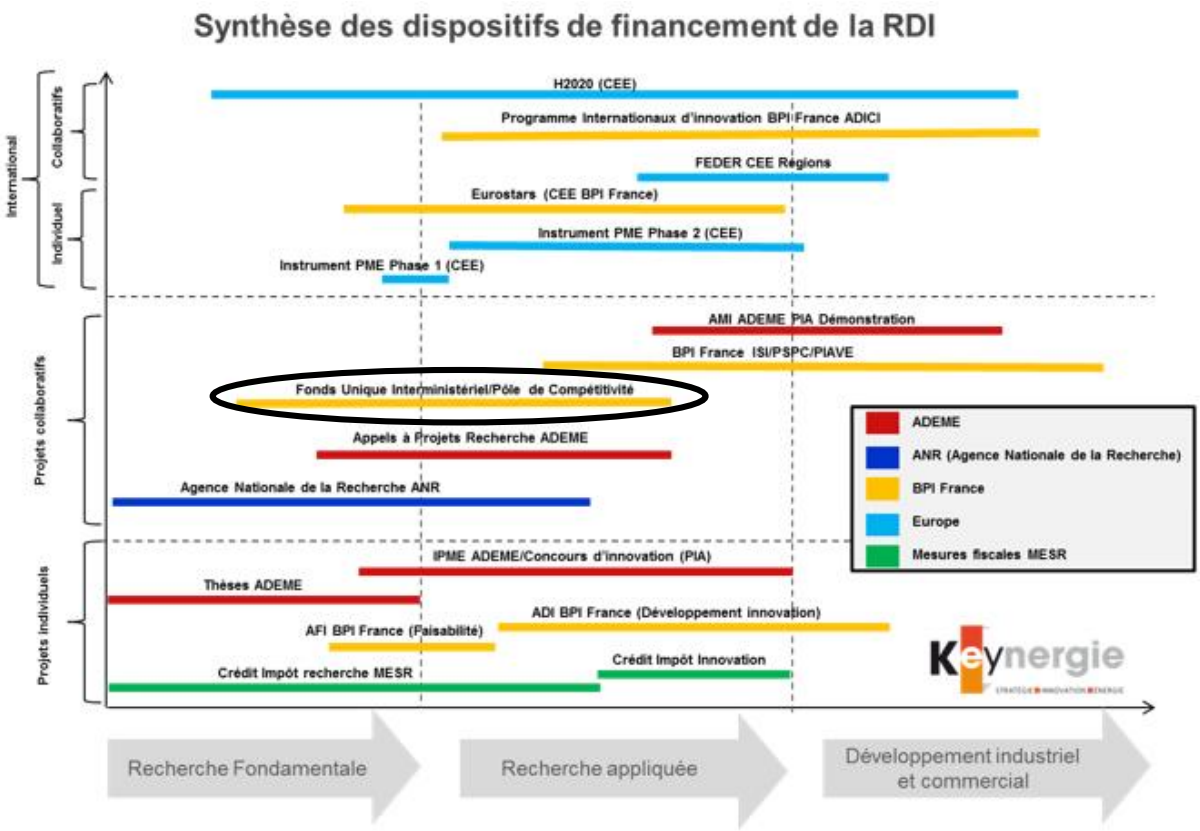


Figure 4 : Synthèse des principaux outils de financement de la Recherche & Développement & Innovation (source Keynergie)

Les organismes financeurs, présentés ci-avant, ne sont pas exhaustifs. De nombreux autres organismes proposent des financements aux divers niveaux de maturité des produits ou process, selon les thématiques qu'ils soutiennent (ex. Agences de l'Eau, Collectivités locales, …). Les partenaires financiers peuvent intervenir en co-financement.

Les financements peuvent prendre la forme de subvention ou d'avances remboursables selon le niveau TRL du projet et la typologie des acteurs associés au projet.

En fonction du statut de l'organisme à financer, les taux varient de 80% pour les organismes publics lors de travaux aux premiers niveaux de l'échelle TRL à 20% pour les industriels en fin d'échelle TRL.

Le traité fondateur de l'Union Européenne interdit le financement des activités économiques car il fausse la libre concurrence. Pour autant, des exceptions existent pour la R&D et l'innovation, la protection de l'Environnement et la lutte contre le changement climatique. Chaque Etat membre définit les règles applicables en matière de régimes d'aides sur son territoire ainsi que les conditions à respecter par les bénéficiaires.

Le projet SEDIMED a bénéficié du financement du Fond Unique Interministériel (FUI) n°8, complété par des financements locaux et des fonds propres du porteur de projet

Le FUI est un programme national français dédié à soutenir la recherche appliquée pour aider au développement de nouveaux produits ou services susceptibles d'être mis sur le marché à court ou moyen terme. Il permet de financer des projets de R&D dits collaboratifs, associant des grandes entreprises, des PME et des laboratoires aidés par les Pôles de Compétitivité. La gestion du FUI était confiée à la Direction Générale de la Compétitivité, de l'Industrie et des Services.

II.2 - Une thématique et des compétences

Cet ouvrage présente les étapes clés qui ont permis de faire avancer la thématique de la gestion à terre des sédiments sur l'échelle TRL et ont abouti à la création du premier centre industriel français de traitement des sédiments en vue d'une gestion à terre utilisable par tous les établissements producteurs de sédiments d'un territoire.

La parution de l'arrêté du 14 juin 2000, pour encadrer la gestion aquatique des sédiments de dragage, a marqué l'émergence d'un nouveau déchet, « le déchet sédiment », dont les spécificités avaient pour conséquences de ne pouvoir le faire entrer dans aucun texte règlementaire en vigueur et dont les caractéristiques nécessitaient des travaux scientifiques multi-compétences pour ouvrir des filières de gestion appropriées. De plus, les gestionnaires de sédiments, orphelins de filières si leurs déblais étaient contaminés au-delà des seuils définis, n'avaient pas les capacités de répondre seuls au sujet. Tout restait à construire pour organiser une gestion à terre en associant l'ensemble des acteurs de la chaine de valeur.

En 15 ans se sont toutes les étapes de l'échelle TRL qui ont ainsi été franchies par les partenariats constitués au fil des divers projets menés. Pour ce qui concerne l'échelle MRL, certaines filières ont atteint les niveaux 9 et 10 comme par exemple les filières routières ou béton alors que la filière travaux maritimes nécessite encore des travaux de recherche et un encadrement règlementaire.

II.3 – Travaux préalables à SEDIMED

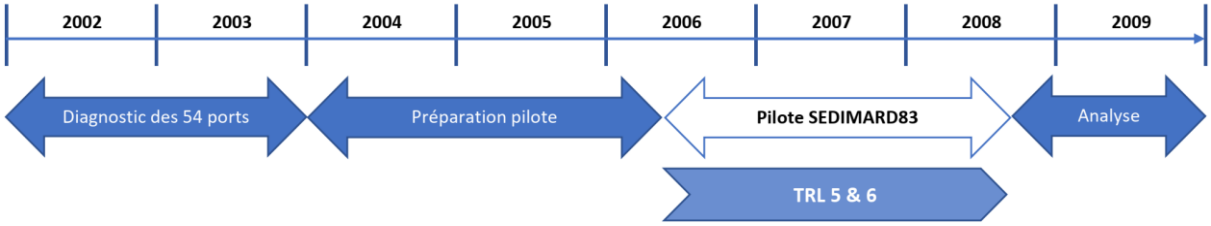
En 2001, le Département du Var gestionnaire portuaire, et particulièrement le Bureau d'Etudes et Travaux de la Direction des Ports, sous responsabilité de M. Jean-Luc AQUA, s'est alors emparé de la question et a associé les gestionnaires varois, civils et militaires, dans une démarche partenariale, technique et financière, qui a été initiée par la signature d'une charte en mars 2002[4].

[4] Charte cadre « Dragages portuaires et environnement dans le Département du Var (Cf. annexe 1)

Cette charte, qui s'inscrivait dans le contexte du Contrat de Baie de la Rade de Toulon et de la démarche Ports Propres portée par le Région Sud PACA, était la première étape d'élaboration d'un plan de gestion des sédiments portuaires pour le Var. Dans ce cadre, après une analyse diagnostique des volumes et qualités des sédiments varois, visant à identifier localement l'importance du sujet, un schéma de gestion a été rédigé par le bureau d'études In Vivo Environnement, missionné en Assistance à Maîtrise d'Ouvrage (AMO) par le Département du Var[5].

Ce Schéma a mis en évidence la nécessité de réaliser un outil industriel de regroupement, tri et traitement pour la gestion à terre des sédiments varois. Afin d'analyser la faisabilité de cet outil, une phase pilote, qui devait permettre de caractériser les déblais et d'identifier les modalités de traitement / valorisation adaptées au contexte local, a conduit à la réalisation du projet SEDI.MAR.D.83 (SEDIments MARins Dragués du Var). Ce projet démonstrateur, qui s'est exécuté sur une zone littorale du site industrialo-portuaire de Brégaillon dans la rade de Toulon de 2005 à 2009, et a associé de nombreux partenaires institutionnels, techniques et scientifiques[6]. Le Ministère de l'Environnement a également été associé et informé lors du montage et de l'exécution du projet afin de prendre en compte les attentes exprimées et de participer à l'émergence d'une solution au niveau national.

La frise chronologique suivante, mise en perspective de l'échelle TRL, présente ces étapes successives qui ont permis, dans le cadre du projet SEDI.MAR.D 83, d'avancer les connaissances du niveau TRL 1 au niveau TRL 5 :



Lors des travaux réalisés à l'occasion de l'exécution du projet SEDI.MAR.D.83, les acteurs clés, qui ont participé aux activités et ont contribué à la réussite du projet, ont été :

Les collectivités et gestionnaires portuaires

- Département du Var – Direction des Ports
- Marine Nationale
- Métropole Toulon Provence Méditerranée
- UPACA (Union des Ports de Plaisance Provence-Alpes-Côte d'Azur)

[5] Schéma départemental de gestion environnementale des déblais de dragage – Département du Var
[6] SEDI.MAR.D.83 Guide de réalisation accessible sur le site SEDITERRA https://sediterra.net/fr/bibliotheque

- Département du Finistère
- Département des Alpes Maritimes
- Communauté d'Agglomérations Marseille Provence Métropole
- Région Emilie Romagne (Italie)
- Port de Venise (Italie)

Les entreprises et Bureaux d'Etudes

- In vivo Environnement
- ECOTERRE

Les organismes scientifiques (associés dans un Groupe d'Experts Scientifiques - GES)

- IFREMER
- CEREMA (ex CETE)
- Provademse
- INERIS
- Institut de Protection et de Recherche de l'environnement (ISPRA - Italie)
- UT2A (Ultra Traces Analyses Aquitaine)
- Université Nice Sophia Antipolis
- Centre Français Littoral (Université de Pau et des Pays d'Adour)
- Université de Caen

Les institutionnels

- Pôle Mer Méditerranée (ex. Pôle Mer PACA)
- Ministère Environnement

Les partenaires techniques et financiers

- Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse
- ADEME PACA
- Région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur

Une des clés de la réussite du projet SEDI.MAR.D.83 a été l'organisation du travail en mode projet. Cette approche transversale des compétences à mobiliser a ainsi permis d'associer l'ensemble des acteurs cités dans une démarche collaborative où chacun a apporté ses connaissances, ses questionnements et propositions d'activités afin d'identifier des pistes de réponses.

Par ailleurs, la faculté laissée au Groupe d'Experts Scientifiques de mener des études non initialement prévues, au fil de l'avancement du projet, a permis d'améliorer la compréhension scientifique des phénomènes observés et de proposer des axes de recherches afin d'approfondir les connaissances.

Cette souplesse a également permis de proposer, au terme du projet, un protocole d'évaluation de la dangerosité de ce nouveau déchet dans le cadre d'une gestion à terre en lien avec le critère écotoxicologique, HP14, de la nomenclature européenne des déchets. Ce protocole a été, par la suite, repris au niveau national.

II.4 - De SEDI.MAR.D.83 à SEDIMED

Au terme du projet SEDI.MAR.D.83 et sur la base des données produites, il est apparu que de nombreuses incertitudes devaient être levées préalablement à l'implantation d'un site industriel de regroupement destiné à la valorisation / recyclage des sédiments dragués. L'opportunité de l'appel à projet du Fonds Unique Interministériel (FUI) de 2008 a alors été saisie par ENVISAN France pour lancer le projet SEDImatériaux MEDoc ou SEDIMED qui a été monté en 2008 et labellisé par le Pôle Mer PACA. Son exécution était initialement prévue sur 4 ans et devait démarrer en mars 2009.

Des projets qui contribuent de manière organisée à l'acquisition des connaissances

Afin de participer de manière complémentaire à l'acquisition des connaissances, de nombreux autres projets ont été lancés par divers organismes de recherche et à diverses échelles de territoire. L'articulation des principaux projets est présentée ci-après. Le positionnement du projet SEDIMED, antérieur chronologiquement à SEDIMATERIAUX national, est visualisé dans la chaine de gestion des sédiments :

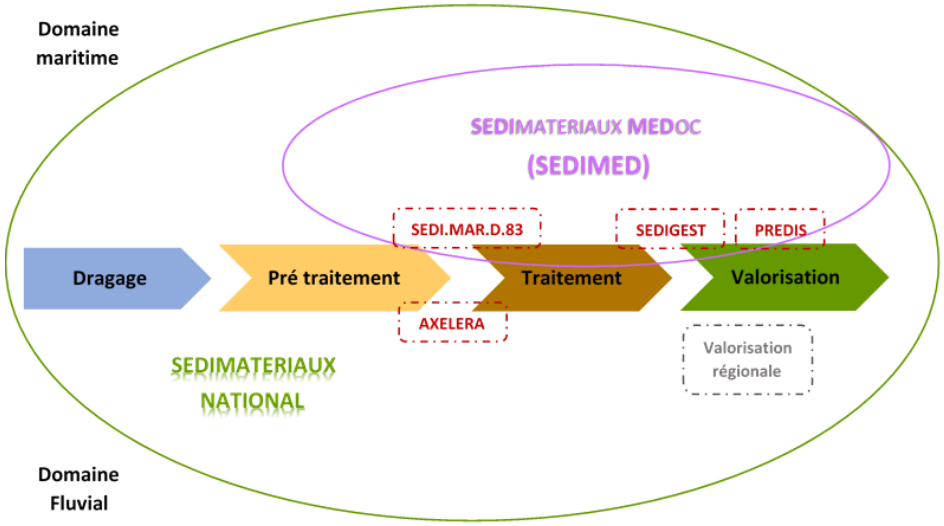


Figure 5 : Positionnement des programmes de recherche « sédiments » dans la chaine de gestion des sédiments non immergeables

A noter : SEDIMED a été le projet initiateur de la démarche nationale SEDIMATERIAUX datant de 2010 et portée par l'IMT Lille Douai.

II.5 - Les composantes du projet SEDIMED

SEDIMED est un projet innovant de recherche et de développement qui associait des phases de recherche et des actions de développement industriel par la mise en œuvre de prototypes de filières de valorisation.

Les innovations essentielles apportées par le projet SEDIMED sont de plusieurs ordres :

- Au niveau industriel, il s'agissait d'acquérir le savoir-faire indispensable concernant les méthodologies permettant une maîtrise des risques techniques et environnementaux d'utilisation de ces nouveaux « matériaux alternatifs » élaborés à partir de sédiments de dragage.
- Au niveau de l'ingénierie, l'objectif était l'évaluation des risques techniques, sanitaires et environnementaux quel que soit le scénario de gestion choisi et ce pour diverses typologies de sédiments.
- Au niveau scientifique, compte tenu de l'importante variabilité qualitative des sédiments et du manque de connaissances sur les mécanismes comportementaux des déblais sortis de l'eau, il s'agissait de produire les données permettant d'améliorer la compréhension des potentialités techniques et environnementales de valorisation/réutilisation des sédiments et des risques associés. De plus, les analyses utiles à la valorisation terrestre devaient être identifiées ainsi que les formulations de matériaux alternatifs par filières.

En termes d'avancement des connaissances au sens de l'échelle TRL, le dossier prévoyait des actions qui permettraient d'atteindre le niveau TRL 7 conformément au schéma suivant :

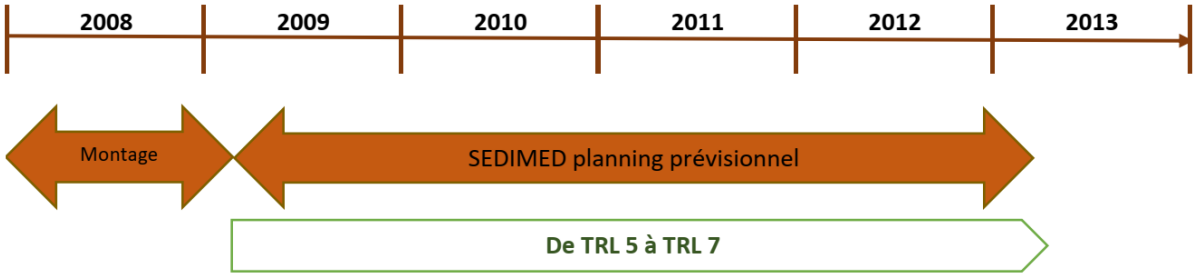


Figure 6 : Avancement des connaissances relatives à la valorisation des sédiments dans des filières terrestres

II.5.1 - Le consortium

Pour l'élaboration du projet SEDIMED, un partenariat s'est constitué, afin d'associer les compétences utiles à la production et l'interprétation des données à échelle industrielle, permettant de lever les freins identifiés et d'aboutir à la définition des conditions répondant aux critères de faisabilité financière, technique, administrative et juridique de l'émergence d'un site industriel de valorisation / réutilisation pérenne pour les sédiments non immergeables.

Le consortium qui a été monté associait les partenaires suivants :

SEDImatériaux MEDoc (SEDIMED)			
	Compétences	Responsabilités dans le consortium	Détail de la mission
Partenaires industriels (grands groupes et PME)			
ENVISAN France	Dragage environnemental et traitement des sédiments contaminés	Pilotage du projet et porteur d'une innovation	Installation du site pilote, réception et stockage des sédiments en prévision de leur gestion et valorisation, réalisation des démonstrateurs expérimentaux (écomodelés paysagers de démonstration et plot béton)
COLAS	Travaux routiers	Porteur d'une innovation	Réalisation d'une route
Partenaires ingénierie (PME)			
ERG Environnement	Ingénierie environnementale	Accompagnateur opérationnel de l'innovation	Réalisation des dossiers règlementaires et d'autorisation, études d'impact et études sanitaires
Partenaires scientifiques (EPIC et associations, …)			
ARMINES / Ecoles des Mines Sophia Antipolis	R&D à destination des industries porteuses d'innovation	Coordination / obligations contractuelles et Communication	Suivi des tâches / Analyse des risques professionnels / suivi végétalisation écomodelés
Ecole des Mines de Douai	R&D, formations génie civil, environnement et génie des matériaux	Accompagnateur scientifique de l'innovation	Définition des objectifs, validation des formulations et des essais géotechniques

CETE Méditerranée (puis CEREMA)	R&D génie des matériaux et techniques routières	Accompagnateur scientifique de l'innovation	Validation des formulations et des essais géotechniques ; Suivi des performances mécaniques des prototypes routiers
INERIS	R&D analyse sanitaire et environnementale	Accompagnateur scientifique de l'innovation	Définition méthodologie, mise en œuvre et interprétations du suivi environnemental des prototypes de valorisation
Partenaires étatiques (hors consortium)			
Marine Nationale	Gestionnaire portuaire	Mise à disposition du site expérimental, Dragage et fourniture de sédiments	Travaux préparatoires
Syndicat Mixte des Ports du Levant	Gestionnaire portuaire	Coordination des fournisseurs de sédiments	Travaux préparatoires
Toulon Provence Méditerranée	Gestionnaire portuaire	Dragage et fourniture de sédiments	Travaux préparatoires
Chambre de Commerce et d'Industrie du Var	Gestionnaire portuaire	Dragage et fourniture de sédiments	Travaux préparatoires

Figure 7 : Consortium et partenaires du projet SEDImatériaux MEDoc (source ENVISAN)

A noter que le MEEDDM a été associé aux travaux et que le CETE a par la suite été intégré au CEREMA à l'origine des guides techniques pour la valorisation en techniques routières.

Les organismes associés au consortium ont su se donner les moyens et les ressources nécessaires pour mener les travaux sous leur responsabilité afin d'atteindre les objectifs définis pour chacun et en commun. Les représentants des partenaires associés au projet étaient :

Partenaires industriels (grands groupes et PME) :

- ENVISAN France : Mme Daphné Glaser – M Alain Pieters – M Lilian Rahyr – M Kristof Nachtergaele
- COLAS : M Pascal Robin – M Sébastien Fernet – M Jean-Michel Salles – M Mathieu Deschamps
- ERG Environnement : Mme Sandrine Augy – M Nicolas Diard
- NEO SUD : M Erwan Tessier

Partenaires scientifiques

- ARMINES / Ecoles des Mines de Paris - Sophia Antipolis : M Emmanuel Garbolino (laboratoire CRC) – M Philippe Le Bozec – M Erwan Tessier
- Les Ecoles des Mines (Douai, Alès, Albi) : M Nor Edine Abriak — M Rachid Zentar
- CETE Méditerranée : M. Patrick Gentilini, M Marc-Stéphane Ginoux, M Didier Jan
- INERIS : M Roger Revalor, Mme Flore Rebischung, M Aurélien Ustache

Partenaires étatiques et institutionnels (hors consortium)

- Marine Nationale : M Cordier, M Franck Plomion
- Syndicat Mixte des ports du Levant : M Casan Barnel, M Didier Vanack
- CA Toulon Provence Méditerranée : M Videau, M Vignals, M Vanni
- Chambre de Commerce et d'Industrie du Var : M Casteur, M Giraud

II.5.2 - Les activités

L'exécution de SEDIMED était pilotée par ENVISAN France, en qualité de porteur du projet, accompagné par ARMINES en charge de la coordination des activités scientifiques. Les activités étaient articulées en quatre ateliers dont les objectifs étaient les suivants :

Atelier 1 : Traduire de manière opérationnelle la problématique du Projet au niveau des produits et des dimensionnements des prototypes/ouvrages tests (site, programme scientifique et technique des prototypes, définition des scénarios de valorisation/réutilisation en fonction de leur viabilisation économique.)

Atelier 2 : Réalisation de l'outil site d'expérimentations, réalisation des prétraitements et traitements des sédiments. Réalisation des prototypes, instrumentation et suivis technique et environnemental des essais de valorisation/réutilisation

Atelier 3 : Mise au point, installation et entretien d'une unité de traitement des eaux sur site expérimental (eaux de ressuyage des sédiments traités, eaux de lessivage de la zone technique étanchéifiée). Exploration, si nécessaire, des pistes d'amélioration dans un souci d'économie de la ressource et de valorisation des eaux industrielles.

Atelier 4 : Synthèse de l'opération à travers l'organisation, la structuration et l'interprétation de l'ensemble des résultats

Figure 8 : Voie d'accès au bassin de lagunage du CPEM ENVISAN

Le déroulement des activités prévues dans chaque atelier étaient articulées et chaque partenaire intervenait en fonction de ses compétences et selon le schéma suivant :

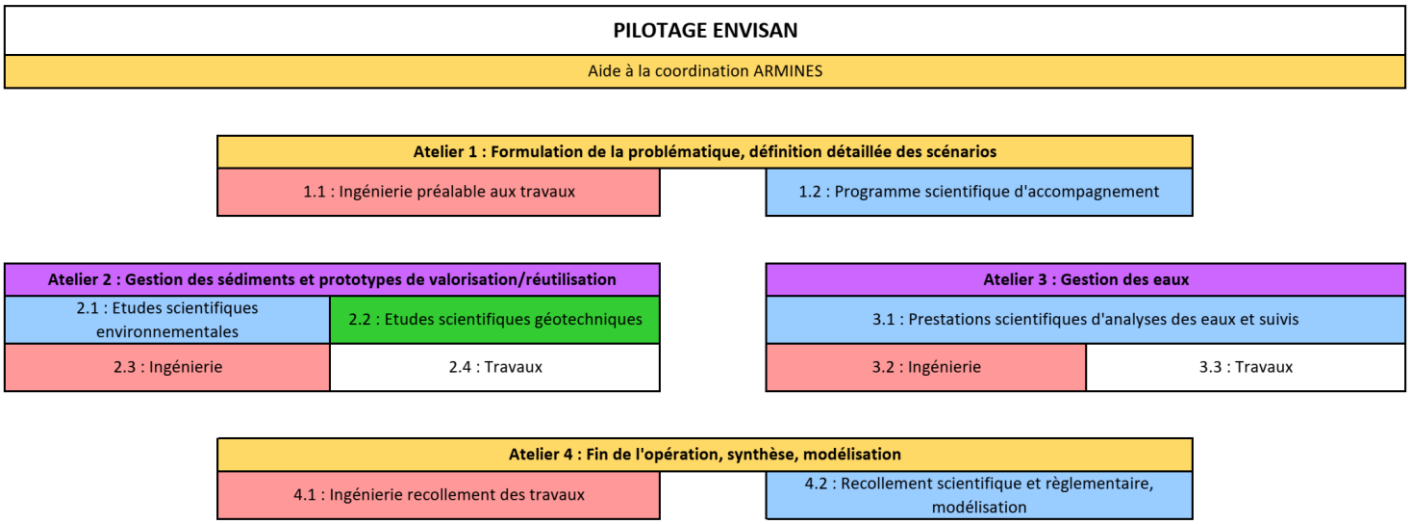


Figure 9 : Schéma organisationnel des activités du projet SEDImatériaux MEDoc (source ENVISAN)

L'ensemble du partenariat était associé aux diverses activités en fonction des compétences de chacun.

II.5.3 - Les prototypes expérimentaux

Figure 10 : Prototypes expérimentaux : écomodelé paysager et route.

Pour accompagner l'émergence d'une réglementation et la production de guides techniques, le projet SEDIMED prévoyait la réalisation de divers prototypes de valorisation/réutilisation des sédiments échelle 1 afin d'étudier les comportements à long terme des sédiments non immergeables dans plusieurs scenarii maritimes et terrestres :

- Les ouvrages test terrestres échelle 1 : éco modelés paysagers, route, remblaiement de carrière, valorisation de la fraction fine en cimenterie
- Les ouvrages test maritimes échelle 1 : Berges en enrochements, blocs béton

Tous les prototypes devaient être suivis sur les plans techniques et environnementaux pendant 1 an. Le détail de la mise en œuvre et du suivi des ouvrages prototypes réalisés est présenté dans le chapitre 4 - Les ouvrages réalisés : Description des ouvrages – méthodologies employées – suivis réalisés.

II.5.4 - Le planning

En termes de planning prévisionnel d'exécution, le projet SEDIMED devait se dérouler conformément au diagramme suivant :

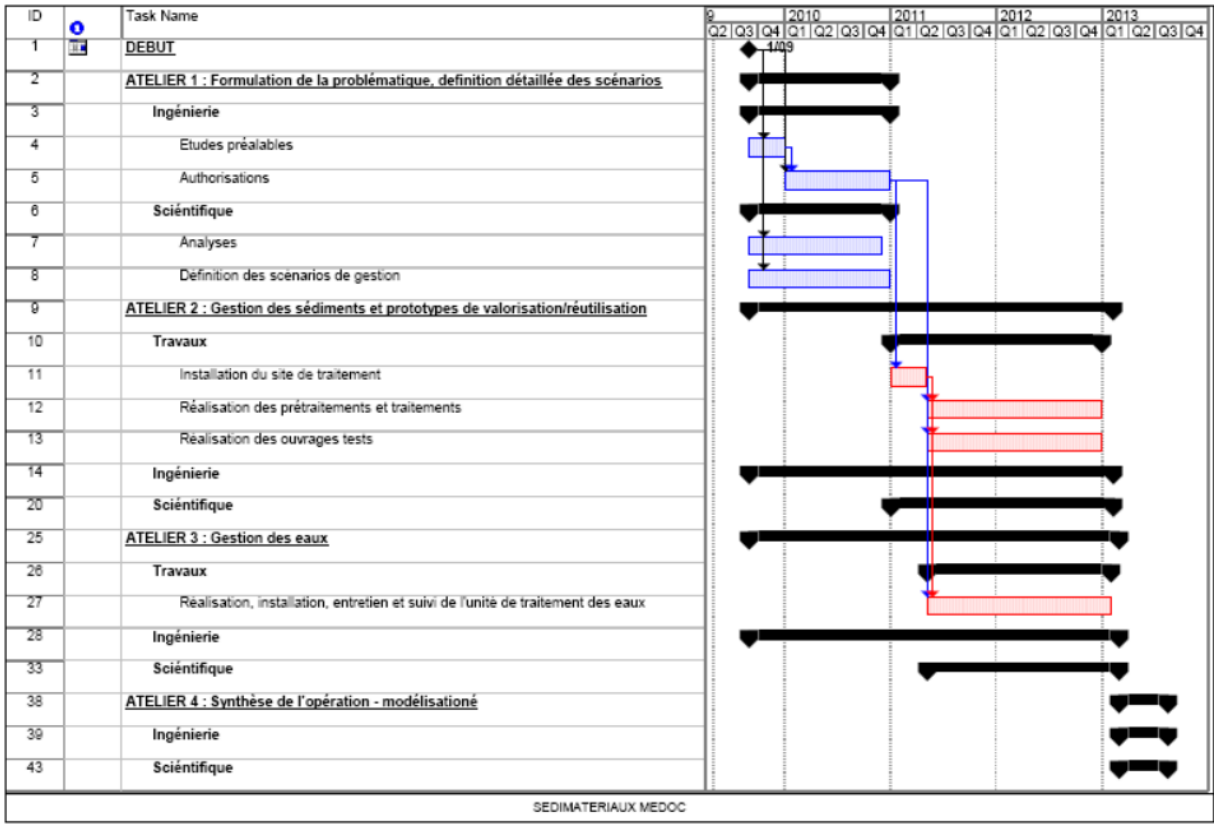


Figure 11 : Planning initial du projet SEDIMED (source ENVISAN)

Le planning initial, tel que déposé avec le dossier de demande de financement FUI, prévoyait un démarrage en mars 2010 et un terme en février 2013. Dans les faits, il n'a pas pu être respecté suite à de nombreuses sujétions et difficultés, fréquentes bien que pas toujours anticipables dans un projet de ce niveau d'ambition, et qui sont synthétisées au chapitre 6.

II.5.5 - La localisation

Le site sur lequel s'est réalisé le projet est le même que celui sur lequel a eu lieu le projet SEDI.MAR.D83, bien que sa surface ait été plus importante compte tenu de l'échelle du projet. Il s'agit d'un terre-plein portuaire de 3,5 ha situé dans la zone industrialo-portuaire de Brégaillon à la Seyne/mer dans la rade de Toulon.

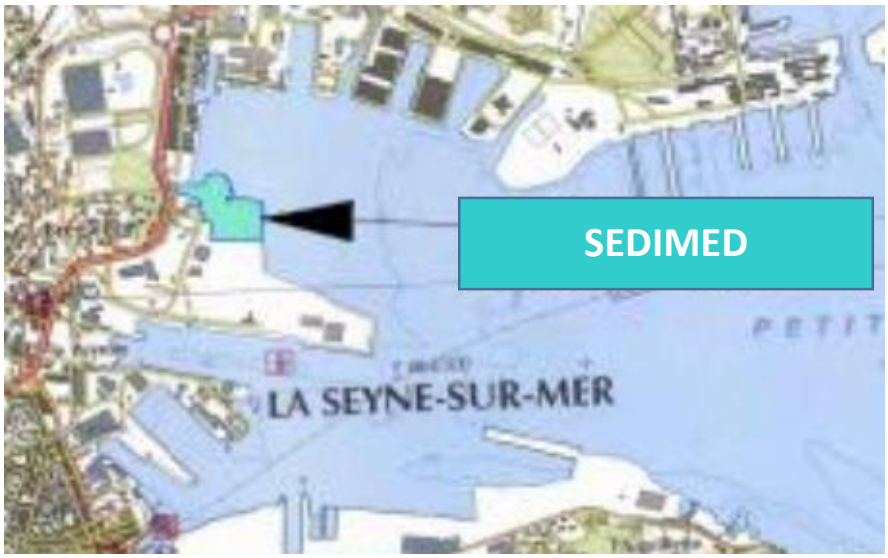


Figure 12 : Localisation, dans la rade de Toulon, du terre-plein sur lequel s'est réalisé le projet SEDIMED (source ENVISAN)

II.5.6 - Les retombées attendues

Les travaux à mener par les partenaires, sur des typologies différentes de sédiments et dans le cadre de plusieurs scénarios complémentaires, visaient à acquérir les connaissances scientifiques relatives aux potentialités techniques et environnementales des valorisations / réutilisations des sédiments transformés en éco-produits. Il s'agissait d'améliorer la compréhension des comportements des sédiments non immergeables tout au long de leur filière de gestion, de leur lieu d'extraction jusqu'au niveau du prototype échelle 1 dans lequel ils auraient été valorisés / réutilisés et ce pour diverses filières. Il s'agissait également d'appréhender les limites techniques et environnementales à partir desquelles le stockage est l'option de gestion à mettre en œuvre. Des informations plus complètes des retombées effectivement mesurées sont présentées au chapitre 5.

Figure 13 : Zone de stockage des terres et sédiments et de mise en œuvre des prototypes expérimentaux (CPEM ENVISAN)

II.5.7 - Le budget prévisionnel et plan de financement

En termes chiffrés, le budget initial du projet était de 8 994 179 € HT.

Avant le dépôt et en cours d'exécution, deux partenaires sont sortis du consortium. Dans ce contexte, une révision du budget a été nécessaire en lien avec la répartition des prestations des partenaires sortants et des coûts associés. Cette nouvelle estimation de dépenses a conduit à une diminution du budget de 146 973 € HT.

A la suite des évolutions du consortium et des répartitions d'enveloppes par partenaires, le budget prévisionnel global se chiffrait à 8 847 206 € HT.

L'accord de financement FUI est intervenu en juillet 2010. Le montant global de cette subvention était de 1 656 250 €. Outre la participation financière de l'Etat via le FUI, d'autres partenaires financiers ont participé au projet :

- L'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse
- L'ADEME PACA
- La Région Sud PACA
- La Communauté d'Agglomération Marseille Provence Métropole
- Le Département des Alpes Maritimes

Compte tenu des statuts divers des partenaires, les taux d'interventions des financeurs étaient variables. Le montant total des aides attribuées par les institutionnels locaux se chiffrait à 820 010 € soit environ la moitié des financements FUI.

En synthèse, le plan de financement était le suivant :

Co financeurs	Montants (€)	Taux
FUI	1 656 250	18,41%
AE RMC	416 737	4,63%
ADEME	150 000	1,67%
Région Sud PACA	30 000	0,33%
TPM	200 000	2,22%
MPM	8 273	0,09%
CD06	15 000	0,17%
Total Aides	**2 476 260**	**27,53%**

Figure 14 : Plan de financement final du projet SEDIMED (source ENVISAN)

Le reste à charge des partenaires était donc de plus de 6 M€, ce qui représente un effort privé très conséquent.

Le financement FUI visait à atteindre le niveau TRL 7. Toutefois, l'aménagement de la plateforme a nécessité des investissements supérieurs à ceux prévus initialement, ce qui a eu pour conséquence de faire évoluer le projet. En effet, la durée d'amortissement étant plus importante que celle du projet, les diverses options permettant de réaliser SEDIMED ont été analysées. Après accord des autorités compétentes, l'option retenue a conduit à la création d'un outil industriel fonctionnel pour une durée plus importante que celle du projet, permettant le passage de TRL 7 à 9.

Ainsi, en termes d'avancement des connaissances au sens de l'échelle TRL, la représentation suivant indique le niveau atteint :

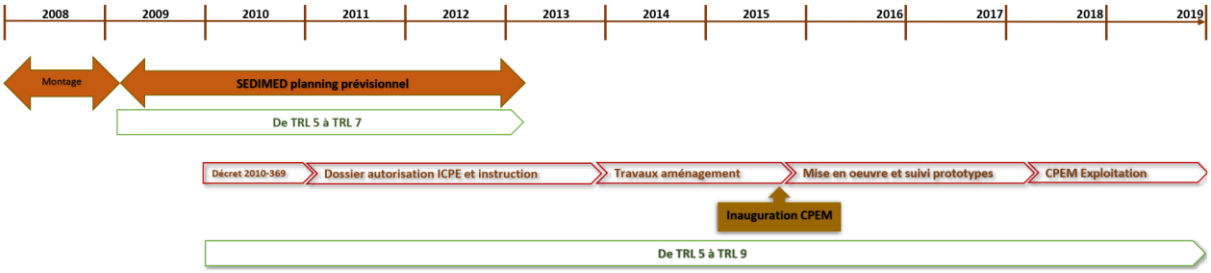


Figure 15 : Représentation de l'avancée effective des connaissances produite dans le cadre du projet SEDIMED

Par ailleurs, en termes de marché, les estimations de 2013 laissaient penser qu'il représentait entre 1 et 4 milliard € annuels au niveau français. A l'échelle du Var, le volume financier était évalué à 5 M€ / an. D'autre part, au vu de l'augmentation très conséquente des coûts de gestion pour les établissements portuaires, l'émergence de cette activité permettait d'estimer à environ 2M€, les économies envisageables liés à une valorisation des sédiments à terre en alternative à l'enfouissement, via les Installation de Stockage de Déchet (ISD).

III. Les sédiments

III.1 - Présentation

Dans le cadre du projet FUI SEDIMED, plusieurs typologies de sédiment ont été sélectionnées et caractérisées dans l'optique d'intégrer dans les matériaux de construction d'ouvrages, ceux les plus performants. Cette démarche permettait également de mieux prendre en compte la variabilité des propriétés des sédiments en fonction de leur nature et de leurs origines. Dans ce cadre, plusieurs campagnes d'échantillonnage ont été réalisées. Ces campagnes se sont déroulées entre 2010 et 2015.

Il est important dans ce type projet de définir et de respecter une démarche rigoureuse comme celle dans laquelle le projet SEDIMED s'est inscrit. Les différentes actions ont été coordonnées à la suite d'une identification claire des points clés, points d'arrêt et points de validation du projet. Il faut aussi entre les parties prenantes, qu'un accent particulier soit mis sur la coordination des ressources et le ciblage.

Ce projet a conduit à l'étude de trois sédiments du port de Toulon représentatifs de la diversité existante en termes de contamination et de granulométrie :

- Toulon – Port Saint Louis du Mourillon (PSL)
- Toulon – Base Navale – Quai Noël (QN)
- Toulon – Port TCA – Quai Corse (QC)

Des analyses préliminaires ont été menées pour caractériser de façon approfondie ces 3 sédiments (contenu total, lixiviable, dangerosité, etc.) afin de déterminer lesquels étaient les plus adaptés par rapport aux objectifs de valorisation en technique routière (route et écomodelés paysagers) et en génie civil (blocs béton).

Les données présentées dans ces parties synthétisent les résultats des laboratoires de l'Institut Mines Telecom (ex. Mines de Douai) et du CEREMA d'Aix-en-Provence (ex. CETE). L'intervention des deux laboratoires visait à une double validation des données obtenues.

La présentation détaillée des essais de caractérisations physico-chimique, environnementale et géotechnique réalisés en laboratoire sur les sédiments est résumée ci-après (tableau 1) :

Tableau 1 : Classification des tests de caractérisation réalisés

Physico-chimie	Minéralogie	Géotechnique	Environnemental
• Analyse granulométrique • Teneur en matière organique • Perte au feu • Détermination du pH • Masse volumique • Teneur en eau	• Analyse minéralogique (FX et DRX)	• Argilosité – valeur au bleu de méthylène VBS • Limites d'Atterberg (liquidité, plasticité, cône de pénétration) • Caractéristiques de compactage (Essais Proctor Modifié et Normal ; Indice Portant Immédiat IPI)	• Analyse du contenu total en polluants • Analyse du contenu émissible en polluants à la lixiviation • Analyse de la dynamique de l'émission de polluants par des essais de percolation

Ces différents essais permettent d'apporter les informations clés nécessaires à :

- Classification GTR (Guide des Terrassements Routiers)

- Essais de formulations – tests d'aptitude aux traitements (choix du type de liant et éventuel correcteur granulaire). Confection des éprouvettes d'essais correspondant aux différentes filières de valorisation et évaluation (Proctor Modifié – IPI - Essais de compression uniaxiale - Essais de traction brésilien - Classe mécanique)

Ces différentes investigations ont permis la production de nombreuses données concernant les sédiments étudiés et leurs capacités de valorisation.

L'objet de cette partie est de résumer les méthodologies techniques et scientifiques employées pour caractériser les sédiments étudiés et les principaux résultats obtenus.

Le programme expérimental envisagé pour l'étude des sédiments prélevés est résumé dans le tableau 2 suivant :

Tableau 2 : Programme expérimental réalisé sur les sédiments ainsi que les normes suivies

Programme Expérimental		
Essai	**Référentiel Technique**	
	IMT LD	**CEREMA**
Préparation du matériau (homogénéisation)	NF EN 15002	NF EN 932-2
Caractéristiques physico-chimiques et géotechniques		
Teneur en eau W (%)	NF P 94-050	
Analyse Granulométrique - tamisage	NF P 94-056	NF EN 933-1
Analyse Granulométrique - Laser		
Limites d'Atterberg – Limite de liquidité W_L (%)	NF P 94-051	
Limites d'Atterberg – Limite plasticité W_P(%)	NF P 94-051	
Limites d'Atterberg – Cône de pénétration W_L(%)	NF P 94-052	
Essai d'équivalent de sable ES	non effectué	
Valeur au bleu de méthylène VBS (g/100g)	NF P 94-068	NF P 94-068
Valeur au Bleu de Méthylène MB 0/D (g/kg)		NF EN 933-9
Mesure de la masse volumique absolue γ_S (g/cm^3)		
Perte au feu (calcination – (550 ± 25 °C) (%)	NF EN 15169	
Perte au feu (calcination – 450 à 500°C) (%)	XP P 94-047	
Perte au feu (calcination – 450 °C) (%)		NF EN 1744-1
pH		NF ISO 10390-1
Caractéristiques de compactage et de portance		
Essai Proctor Modifié	NF P 94-093	
Essai Proctor Normal		NF P 94-093
Indice de Portance Immédiat – IPI (%)	NF P 94-078	NF P 94-078
Classification GTR		
Classification GTR	GTR[7] / NF P 11-300	GTR / NF P 11-300

[7] *Réalisation des remblais et des couches de forme, Fascicule II, Annexes Techniques*, SETRA-LCPC, 1992

III.2 - Prélèvement et échantillonnage

L'étude de l'historique des sédiments de la rade de Toulon, a permis de cerner le projet dès son initiation. Cette étude bibliographique a mis en évidence la dynamique et l'histoire chargée du port de Toulon, ainsi que la complexité et la variabilité de sa matrice sédimentaire.

- **Sédiments du Port Saint-Louis du Mourillon (PSL)** : prélèvement et échantillonnage en deux étapes : 2010 (290 kg) pour caractérisation préliminaire et reconnaissance, puis 2012 : prélèvement d'un volume représentatif de 1350 kg pour les études en laboratoire (dont formulations).

Figure 16 : Répartition des points d'échantillonnage

Figure 17 : Sédiment du Port Saint Louis après lagunage actif (septembre 2015)

- **Sédiments du Quai Noël (QN) et Quai Noël Modifié (QNM)** situés dans la Base Navale de Toulon : Les 1ers prélèvements ont été effectués en 2010 (sédiments QN) à la suite d'un travail de repérage et de délimitation GPS de la zone de dragage (cf. carte suivante). Face à la présence importante d'explosifs dans le quai Noël de la Base Navale, le maître d'œuvre mandaté par la Marine Nationale a finalement dû modifier le mode opératoire initialement prévu. Ainsi, il a été décidé de réaliser l'ensemble du dragage par des plongeurs au moyen d'un tuyau aspirant (*i.e.* suceuse) et de placer les sédiments retirés (après criblage pour enlever les macro-déchets) dans des géotubes pour permettre leur stockage et leur déshydratation. De plus, pour faciliter la décantation des particules dans les géotubes, du floculant a été ajouté (polymère organique). Cet ajout a donc modifié la composition du sédiment à mettre en oeuvre dans le projet SEDIMED et a nécessité une nouvelle caractérisation géotechnique et environnementale. Environ 180m^3 de sédiment (modifié par ajout de floculant) du Quai Noël Modifié (QNM) ont finalement été livrés sur la plateforme ENVISAN en juillet 2015.

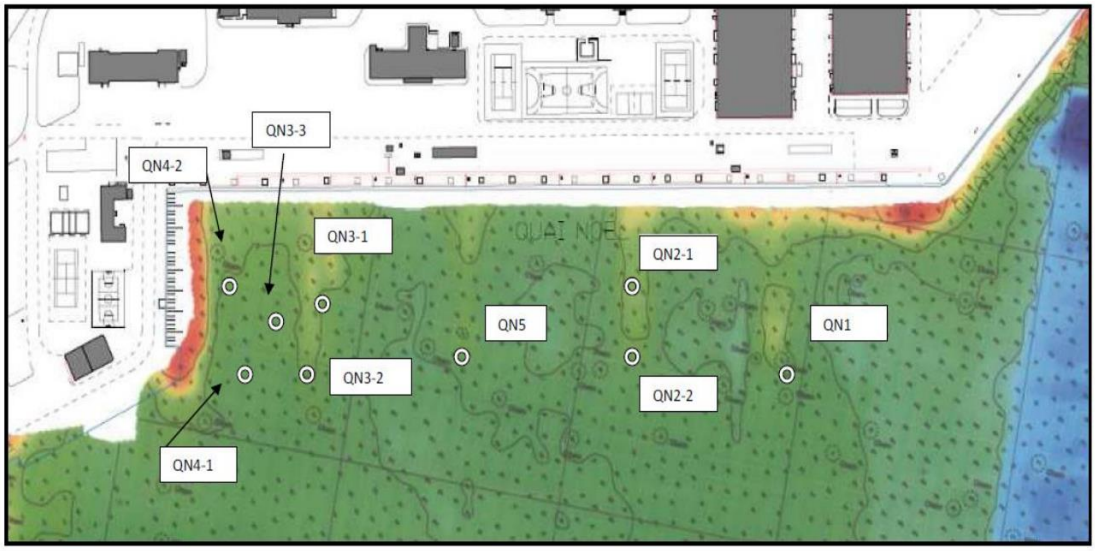


Figure 18 : Carte des points d'échantillonnage du Quai Noël

Figure 19 : Photo du sédiment Quai Noël (Modifié) utilisé - septembre 2015

- **Sédiments Quai Corse (QC) :** Un échantillonnage réalisé par plongeurs en février 2015 de 10kg de sédiment par points de prélèvement (cf. figure suivante) a été effectué sur le site TCA (Toulon Côte d'Azur) du port maritime de Toulon pour déterminer la nature des sédiments dans cette zone. Ce site est composé de 2 quais, les quais Fournel et Corse. Les résultats des caractérisations préalables ont révélé que le sédiment du Quai Fournel n'était pas adapté aux expérimentations prévues dans SEDIMED car de nature trop grossière, par conséquent seul le sédiment du Quai de Corse a été retenu pour les essais. Une cubature approximative de 150m^3 a été mise à disposition.

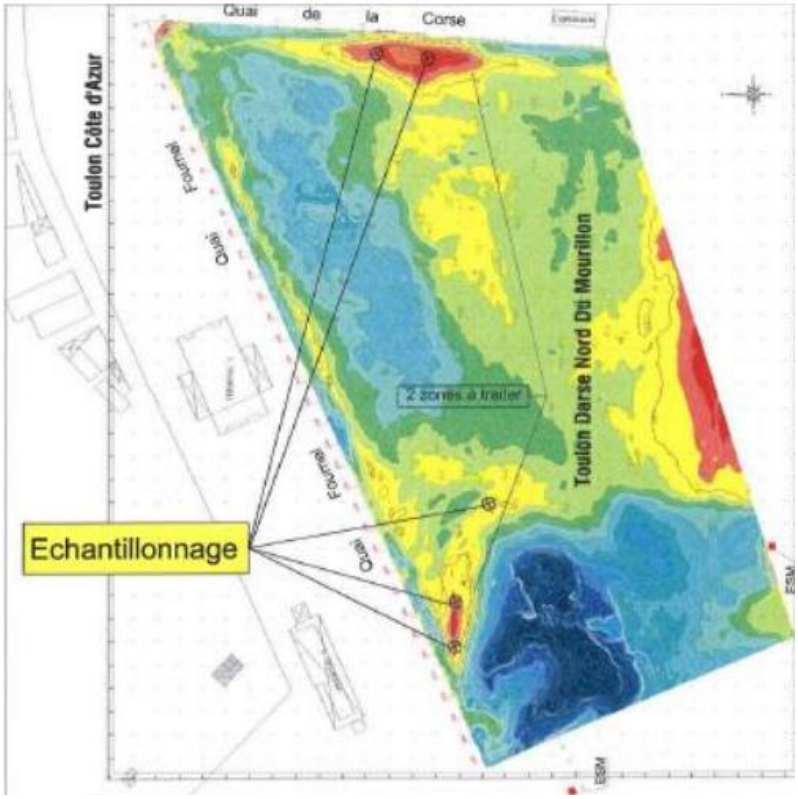


Figure 20 : Localisation des points échantillonnés aux Quais Fournel et Corse

Figure 21 : Photo du sédiment Quai Corse utilisé (septembre 2015)

Figure 22 : Homogénéisation et quartage des sédiments après réception au laboratoire

III.3 - Caractérisation physico-chimique et géotechnique des sédiments

Pour connaître les propriétés des matériaux à valoriser, des essais de caractérisations physico-chimique, géotechnique et environnementale ont été mis en œuvre en laboratoire.

Les matériaux à caractériser ont fait l'objet d'une préparation initiale (tamisage à 40mm) afin d'éliminer les indésirables (blocs, macros-déchets). L'homogénéisation a ensuite été effectuée en déversant dans un grand bac le contenu de tous les fûts et en mélangeant manuellement avec une pelle (norme NF EN 15002 - EMD) ou pelletages alternés (norme NF EN 932-2 - CEREMA).

Les études de caractérisation sont ensuite effectuées conformément aux normes et les résultats interprétés.

Quatre catégories d'essais ont été effectuées :

- Caractérisation géotechnique
- Caractérisation sanitaire

- Caractérisation environnementale (physico-chimique)
- Caractérisation minéralogique

Les analyses décrites ci-après sont l'ensemble des essais conduits dans l'objectif de caractériser les sédiments étudiés. Ces études ont été menées conjointement par les différents partenaires du projet en parfaite coordination. Ce sont donc ces différents paramètres identifiés (physico-chimie, minéralogie, environnemental) qui auront permis de valoriser de manière optimisée les matériaux dragués.

III.3.1 - Distribution granulométrique des matériaux étudiés (Normes XP P 94-041, NF ISO 13320)

Un échantillon représentatif du sédiment à analyser a été prélevé pour identifier la distribution granulométrique du matériau. L'essai a été réalisé par tamisage sous voie humide pour séparer les particules de diamètres inférieurs et supérieurs à 63µm ; ou par granulomètre Laser (de type COULTER LS230) selon norme NF ISO 13320-1 (2000) pour l'analyse de la fraction inférieure à 80µm. Les résultats obtenus par les deux laboratoires ont mis en évidence:

- **PSL**

Présence de macro éléments très faible en masse, mais d'un volume conséquent, notamment des pelotes de posidonie qui, si elles sont très légères, occupent un volume important et peuvent constituer des points faibles dans la structure. Matériau sableux avec près de 100 % de passant à 2 mm. Le passant à 80µm déterminé a été de 9% pour l'IMT LD et de 19.6% pour le CEREMA.

- **QNM**

À partir des résultats, il est apparu que le matériau présentait une proportion de particules inférieures à 80µm importante (> 57%). Il est à noter qu'au-delà de 35 % de particules de taille inférieure à 80µm et conformément aux tableaux de classification des matériaux utilisés pour la construction de remblais et de couches de forme, le matériau se place dans la Classe A. Cette classe est dénommée : « Classe de sols fins ». L'analyse de la fraction inférieure à 80µm par granulomètre Laser a révélé que 8 % des particules étaient de taille inférieure à 2µm et 93% de taille inférieure à 63µm. Par rapport à la masse globale du sédiment, il a été déduit que le matériau était majoritairement constitué de limon (avec 56 % des particules de diamètre inférieur à 63µm).

- **QC**

La courbe granulométrique des sédiments QC a été établie à l'aide d'un tamisage par voie humide pour les Mines de Douai [XP P94-041, 1995 ; NF EN 933-1, 2012] et par granulomètre Laser pour les particules <80µm et par lavage puis tamisage à sec pour le CEREMA [NF P 94-056, 1996]. Après tamisage, les refus ont été récupérés et séchés jusqu'à stabilisation de leur masse sèche.

Les résultats obtenus ont indiqué que :

→ 81 à 83 % de passant à 2 mm

→ 14,1% de passant à 80 µm

→ 8.4 à 13,5 % de passant à 63 µm

III.3.2 - Mesure de la masse volumique absolue par pycnomètre à hélium

L'appareil de mesure de la masse volumique absolue utilisé dans ces études a été un Pycnomètre à Hélium, de marque MICROMERITICS, et de type ACCUPYC 1330. Un prélèvement représentatif de quelques grammes de chaque type de sédiment a été réalisé. Ce prélèvement a été broyé finement dans un mortier.

- **PSL**

Le sédiment du PSL a une densité de 2.63 g/cm^3. Cette valeur est tributaire de la présence de matière organique mais est reste au-dessus des densités souvent rencontrées pour les sédiments marins (autour de 2.4 g/cm^3).

- **QNM**

Le sédiment du Quai Noël a révélé une faible masse volumique absolue (2.29 g/cm^3) en comparaison des matériaux standards de type sable, limon ou argile, où une valeur entre 2.6 à 2.7 g/cm^3 est communément rencontrée. Cette faible valeur mesurée est certainement due à une forte teneur en matière organique comme il sera démontré ci-dessous. Avec cette pondération, les résultats de densité obtenus sur le sédiment QNM restent conformes aux résultats obtenus sur d'autres sédiments de différents ports français à des taux comparables en matières organiques.

- **QC**

Les sédiments QC a des valeurs de masses volumiques absolues de l'ordre de 2,66 g/cm^3 comparables à celles préconisées pour les matériaux standards (environ 2,6 à 2,8 g/cm^3).

III.3.3 - Détermination de la perte au feu (calcination) (NF EN 15169, XP P94-047)

Afin de déterminer le taux de perte au feu dans le matériau, la méthode de calcination telle que décrit dans la norme NF EN 15169 a été adoptée. Cette norme est dédiée aux déchets, boues et sédiments. Les échantillons de sédiments ont été préalablement séchés à une température de 40°C pour éliminer l'eau libre dans le matériau, puis calcinés progressivement dans un four à moufle pendant des périodes allant de 2h à 6h. Il est à noter que pour cet essai une calcination à basse température conformément à la norme XP P-94-047 a également été testée. Les résultats de ces analyses sont présentés dans le Tableau 3 suivant.

Tableau 3 : Valeur maximales de perte au feu

	PSL	QNM	QC
Perte au feu (450°C) (%)	1,4 %	19,3 %	2,72 %
Perte au feu (550°C) (%)	1,6 à 3,2 %	23,9 %	2,89 %

- **PSL**

Pour ces sédiments, il est ressorti que la perte au feu à 550 °C ne dépassait pas un maximum de 3,2 %. Ce résultat a révélé une présence très faible de matière organique et explique les valeurs du poids spécifique des grains solides mesurées. La calcination des mêmes sédiments à plus basse température (450 °C) a engendré des valeurs plus faibles encore de perte au feu. Ces résultats ont permis d'envisager une valorisation en technique routière ou le seuil pour les matières organiques est à 3%.

- **QNM**

Pour ces sédiments, il est ressorti que la perte au feu à 550 °C dépassait les 23 %. Ce résultat révèle une présence très importante de matière organique et explique les faibles valeurs du poids spécifique des grains solides mesuré. La calcination des mêmes sédiments à plus basse température (450 °C) a engendré également des valeurs importantes de perte au feu. Ces résultats ont indiqué une non-conformité pour des valorisations dans les matériaux routiers.

- **QC**

Les résultats ont montré une différence notable de perte au feu à 450°C des sédiments préalablement séchés à 40°C ou 105°C. Pour autant, les résultats de perte au feu à 550°C présentaient des valeurs comparables et indiquaient une faible teneur en matières organiques dans ces sédiments expliquant ainsi les valeurs plus ou moins faibles du poids spécifique des grains solides mesurés (2,66 g/cm3). La teneur en matière organique était donc inférieure à la limite recommandée par le Guide GTR pour la réalisation des travaux routiers.

III.3.4 - Teneur en eau (NF P 94-050, 1995)

La teneur en eau définit l'état hydrique du matériau. Elle est désignée par W et exprimée en % selon l'équation (1) :

$$W\ (\%) = \frac{\text{Masse d'eau}}{\text{Masse sèche}} \times 100 \qquad (1)$$

Dans le domaine du dragage, afin d'évaluer la consistance des boues, on préfère généralement l'utilisation de la notion de siccité. Cette dernière, désignée par S, est définie en % par le rapport de la masse sèche et de la masse humide du matériau. La relation entre ces deux paramètres est donnée par l'équation (2) :

$$S(\%) = \frac{\text{Masse sèche}}{\text{Masse humide}} \times 100 = \frac{1}{1 + \frac{w}{100}} \times 100 \qquad (2)$$

Les mesures de la teneur en eau ont été réalisées selon la norme NF P 94-050 avec un séchage en étuve à 40°C pour éviter d'altérer les matières organiques puis à 105°C pour évaluer l'insensibilité à la chaleur du matériau. Les résultats moyens obtenus sont reportés dans le tableau suivant.

Tableau 4 : Teneur en eau maximale des sédiments

	PSL	**QNM**	**QC**
Teneur en eau – Wmoy. (%)	9.5 %	38%	8.9%
Siccité moy. (%)	91.3%	72.5 %	91.8%

- **PSL**

Pour le PSL, les résultats montrent le caractère peu humide des sédiments (teneur en eau < 10%). La teneur mesurée en laboratoire variait de 3.3 % et 9.5%.

- **QNM**

La teneur en eau du sédiment QNM est faible ce qui peut être expliqué par la déshydratation subi dans le géotube à la suite du dragage. Les résultats à 40 °C et 105 °C ont été comparables révélant une faible sensibilité du matériau à la chaleur.

- **QC**

La teneur en eau initiale du sédiment QC est très faible ce qui peut être expliqué par sa texture sableuse qui ne retient que peu l'humidité. Les résultats à 40 °C et 105 °C ont été comparables révélant une faible sensibilité du matériau à la chaleur.

III.3.5 - Valeur au bleu de méthylène VBS (NF P 94 068)

Dans cette étude, l'essai au bleu de méthylène a été réalisé selon la norme NF P 94 068. L'essai a pour but d'évaluer l'activité des particules fines. L'essai consiste à introduire progressivement du bleu de méthylène dans une suspension de matériau maintenue en agitation à vitesse constante (400 ± 100 tr/min). Des prélèvements périodiques d'une goutte de la suspension sont réalisés à l'aide d'une baguette de verre, que l'on dépose sur un papier filtre. Dès qu'une auréole bleutée de diamètre 8 à 12 mm apparaît autour de la tâche, on considère que l'absorption du bleu de méthylène sur les particules d'argiles est terminée. À partir du volume de bleu de méthylène absorbé et de la quantité de matériau utilisé, la valeur du bleu de méthylène « VBS » est définie par l'équation (3) :

$$\mathrm{VBS} = \frac{\text{Volume de bleu de méthylène } (\mathrm{cm}^3)\text{x } 0{,}01}{\text{masse sèche de la prise d'essai(g)}} \text{ x } 100 \qquad (3)$$

D'après le Guide des Terrassements Routiers (GTR 92), six catégories de sols sont définies en France selon la valeur de V_{BS} :

Valeur de bleu de méthylène (V_{BS})	**Catégorie de sol**
$V_{BS} < 0{,}1$	sol insensible à l'eau
$0{,}2 \leq V_{BS} < 1{,}5$	sol sablo limoneux, sensible à l'eau
$1{,}5 \leq V_{BS} < 2{,}5$	sol sablo argileux, peu plastiques
$2{,}5 \leq V_{BS} < 6$	sol limoneux de plasticité moyenne.
$6 \leq V_{BS} < 8$	sol argileux.
$V_{BS} > 8$	sol très argileux.

- **PSL/QN/QC**

Pour PSL, la valeur de VBS constatée était située entre 0.1 et 0.2 g/100g de matériaux. Pour QNM, une valeur moyenne de 1.23g/100g a été mesurée. Pour QC, la valeur maximale mesurée était de 0.48g/100g. Conformément au GTR, ces sédiments sont donc qualifiés comme étant des sols sablo-limoneux, sensibles à l'eau (pour QC et QNM) et sols sableux peu sensibles à l'eau (PSL).

III.3.6 - États de consistance - Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont déterminées uniquement pour les éléments fins d'un sol (fraction passant au tamis de 400 µm), car ceux sont les seuls éléments sur lesquels l'eau agit en modifiant leur consistance. Ces limites correspondent à des teneurs en eau croissante (Figure 23 : États de consistance – Limites d'Atterberg) :

- la limite de plasticité W_P qui sépare l'état solide de l'état plastique.
- la limite de liquidité W_L qui sépare l'état plastique de l'état liquide.

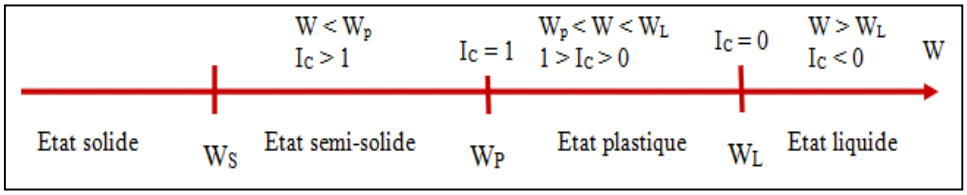


Figure 23 : États de consistance – Limites d'Atterberg

La mesure a été effectuée par deux méthodes : Méthode de Casagrande (NF P 94 051) et Méthode du rouleau (NF P 94 051). Les résultats sont présentés ci-dessous :

Tableau 5 : Limites de liquidité et de plasticité des sédiments étudiés dans SEDIMED

	PSL	QNM	QC
Limite de liquidité W_L (%)	27.5	87.8	27.2
Limite de plasticité W_p (%)	0	52.9	**Non mesuré**

III.3.7 - Classification GTR

Sur la base des données analytiques obtenues, les filières accessibles ont été identifiées et les formulations à mettre en œuvre définies.

Pour une valorisation en technique routière, le guide français des terrassements routiers (GTR, 2000) permet de classer les matériaux routiers selon leurs caractéristiques physiques mesurées par les diverses analyses présentées ci-avant.

- **PSL**

Au sens du GTR, les sédiments du port Saint-Louis se classent en :

- B2 au regard des résultats de l'IMT LD
- B5 au regard des résultats du CEREMA

Cet écart n'altère en rien la valorisation visée et s'explique par une certaine différence dans les pratiques de mesure en laboratoire.

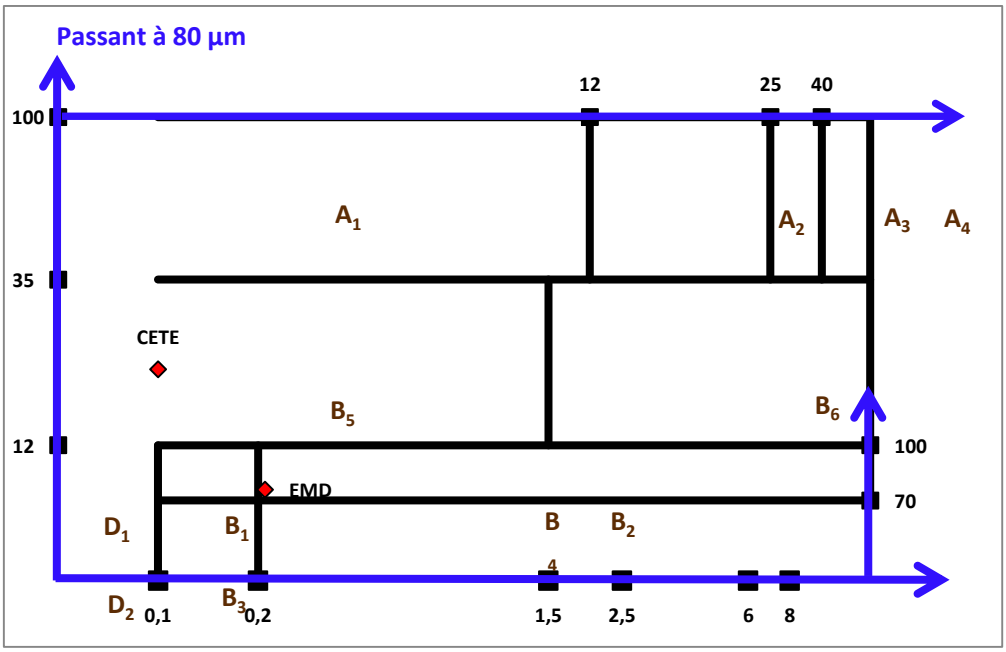


Figure 24 : Classification GTR du sédiment Port Saint Louis

- **<u>QNM</u>**

Les sédiments de QNM présentent un Dmax (Diamètre maximal) inférieur à 50 mm, 57 % du passant à 80 µm, 89 % du passant à 2 mm et la valeur de VBS est de 1,23. Ces paramètres permettent donc de se positionner dans la classe des sols fins de type A, plus précisément dans la sous-classe A1 si on privilégie la valeur du VBS (Figure 24). Cette catégorie rassemble des limons très plastiques, des argiles et des argiles marneuses. Il est également important de signaler, à ce stade et conformément aux essais relatifs à la perte au feu, le caractère très organique de ces matériaux. Ce dernier résultat les classe également dans la catégorie F, voire même la sous-catégorie F_{12} correspondant à des sols organiques.

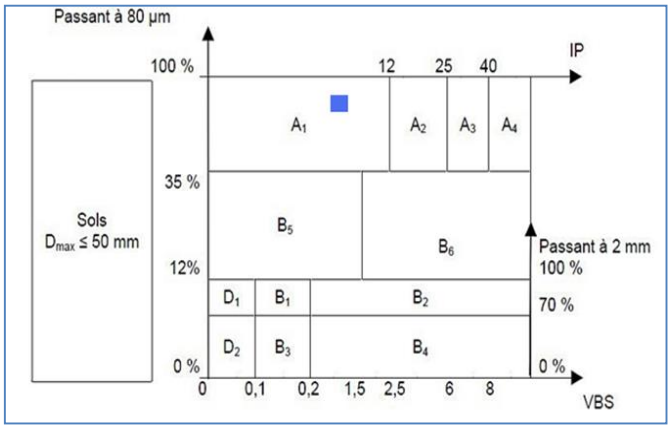


Figure 25 : Classification GTR de sédiments de QNM

- **QC**

Les sédiments QC présentent un Dmax inférieur à 50 mm, 9 % du passant à 80 µm, 81% du passant à 2 mm et la valeur de VBS est de 0,29. Ces paramètres permettent donc de se positionner dans la classe des sols sableux, graveleux avec des fines de type B, plus précisément dans les sous-classes B2/B5. Cette catégorie rassemble des sables argileux et peu argileux.

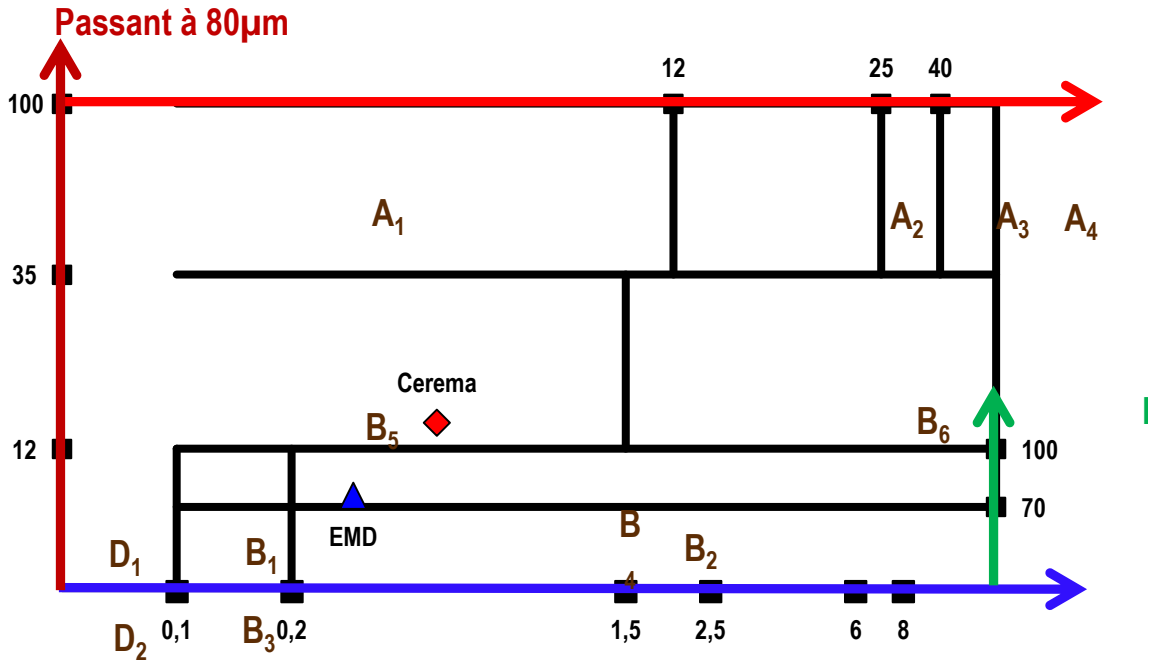


Figure 26 : Classification GTR des sédiments QC

III.3.8 - Caractéristiques de portance et de compactage (NF P 94 078, NF P 94 093)

L'aptitude au compactage de sédiments bruts est évaluée à travers l'essai Proctor Modifié. Le principe de cet essai consiste à compacter le matériau à différentes teneurs en eau selon un processus et une énergie donnée. Pour chaque teneur en eau, on mesure la masse volumique humide et on détermine la masse volumique sèche du matériau. À partir de la relation établie entre la teneur en eau et la densité sèche, les caractéristiques de compactage (la densité sèche et la teneur en eau optimale) sont déterminées. En association avec cet essai, des mesures de poinçonnement sur les éprouvettes compactées sont réalisées afin d'estimer l'indice de portance immédiat (IPI). Ce paramètre permet d'évaluer l'aptitude d'un matériau à supporter directement sur sa surface une charge comme la circulation des engins de chantier, etc.

Les études Proctor-IPI sont réalisées à l'aide d'une machine de compactage automatique permettant de réaliser l'essai Proctor modifié (Figure 27 : Matériels de l'essai Proctor modifié – IPI (a : Cutteur à sol ; b : conservation des mélanges ; c : moule CBR ; d : machine de compactage ; e : moule CBR après compactage ; c : presse pour mesurer l'IPI)27).

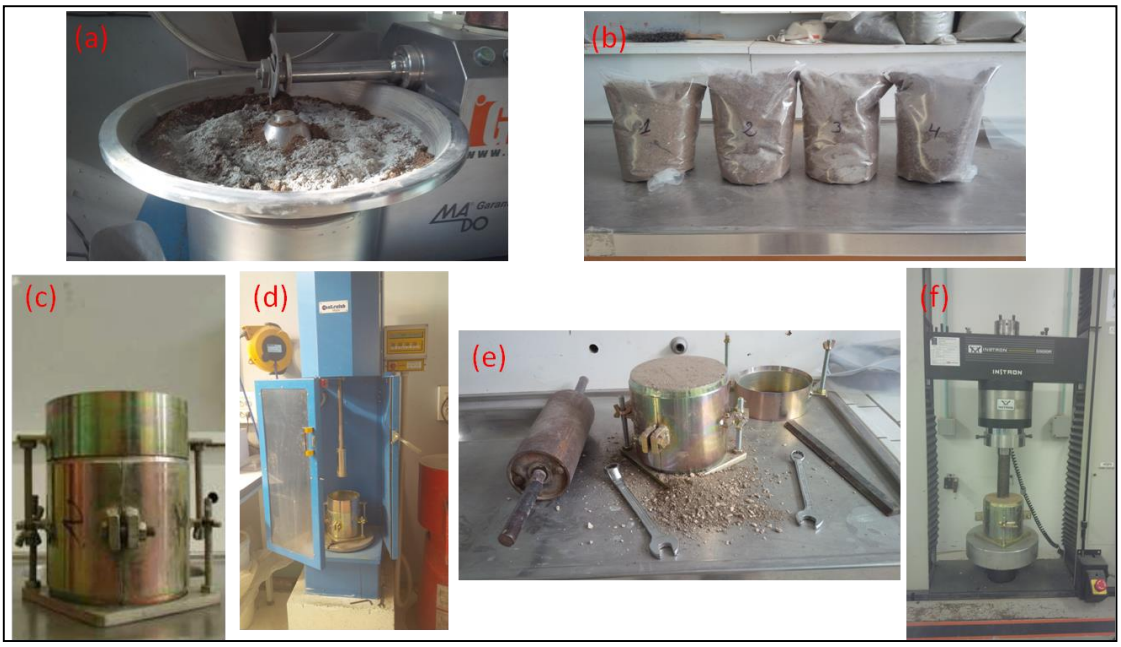


Figure 27 : Matériels de l'essai Proctor modifié – IPI (a : Cutteur à sol ; b : conservation des mélanges ; c : moule CBR ; d : machine de compactage ; e : moule CBR après compactage ; c : presse pour mesurer l'IPI)

- **PSL**

La courbe Proctor normal « plate » obtenue est caractéristique de ce type de matériau : homomorphe et difficile à compacter. La teneur en eau optimale a été obtenue au regard des valeurs de l'indice de portance immédiat (IPI) qui correspond à un test de résistance au poinçonnement d'un sol compacté.

- **QNM**

Une campagne d'essais Proctor modifié a été entreprise sur les sédiments de QNM. Les résultats ont indiqué que les sédiments de QNM présentaient une teneur en eau optimale de 23 % pour une densité sèche optimale de 1,51 g/cm^3.
L'IPI correspondant à l'optimum Proctor est de 26 % ce qui est prometteur pour une utilisation en couche de fondation, (IPI ≥ 25, souhaitable = 35). À l'optimum Proctor, la compacité calculée était de 66 %.
Les valeurs mesurées présageaient une sensibilité à l'eau des sédiments étudiés. D'après le GTR, ces valeurs impliquent une difficulté de circulation des engins sur le chantier.

- **QC**

Les résultats présentés dans le Tableau 6 indiquent que les sédiments QC présentent une teneur en eau optimale de 10 % pour une densité sèche optimale de 2,01 g/cm3. L'IPI correspondant à l'optimum Proctor est de 10 % ce qui est très faible pour une utilisation en couche d'Assise de chaussée, (IPI ≥ 25, souhaitable = 35).

À l'optimum Proctor, la compacité calculée est de 76 % (Tableau 6). D'après le GTR, ces valeurs mesurées impliquent une difficulté de circulation des engins sur le chantier en présence de ces sols.

Tableau 6 : Résultats du Proctor Modifié – IPI des sédiments QC bruts

Matériaux	W_{OPM} (%)	ρ_{dOPM} (g/cm^3)	IPI à W_{OPM} (%)	Compacité (%)
Sédiments QC	10	2,01	10	76

III.3.9 - Analyse minéralogique

La connaissance de la composition minéralogique des sédiments est indispensable afin d'anticiper les difficultés qui pourraient apparaître (manque de performance, stabilité, etc.) dans leurs processus de valorisation. Cette analyse est réalisée par l'essai de fluorescence X ainsi que l'essai de diffraction des rayons X.

➢ *Analyse par fluorescence des rayons X*

Les éléments chimiques régulièrement identifiés dans les sédiments ont été retrouvés.

- **PSL**

Tableau 7 : Composition en éléments chimique des sédiments

Élément	Pourcentage	Élément	Pourcentage	Élément	Pourcentage
O	51.1	**Na**	1.9	**Mn**	traces
Si	28.1	**S**	0,3	**Cu**	traces
Ca	8.4	**Mg**	0,9	**Zn**	traces
Al	4,5	**Cl**	1.5	**P**	traces
Fe	1,4	**Ti**	0,2	**Ba**	traces
K	1,5	**Na**	0,7	**Sr**	traces

- **QNM**

Les résultats d'analyse reportés dans le Tableau 8 montrent que les principaux éléments constitutifs de la matrice de sédiments de QN sont l'oxygène, le silicium et le calcium.

Tableau 8 : Résultat de l'analyse semi quantitative par fluorescence des rayons X exprimée en pourcentages massiques des sédiments QNM bruts

Élément	Pourcentage	Élément	Pourcentage	Élément	Pourcentage
O	45.5	**Na**	0,7	**Mn**	traces
Si	15.2	**S**	3.2	**Cu**	0.1
Ca	14,9	**Mg**	1.4	**Zn**	0.7
Al	6.3	**Cl**	2.0	**P**	0.1
Fe	5,9	**Ti**	0,3	**Ba**	traces
K	2.1	**Na**	1.8	**Se**	traces

- **QC**

Les résultats d'analyse reportés dans le Tableau 9 montrent que les principaux éléments constitutifs de la matrice des sédiments de QC sont l'oxygène, le silicium et le calcium. Ils présentent à eux seul 90 % de la concentration totale.

Tableau 9 : Résultat de l'analyse semi quantitative par fluorescence des rayons X exprimée en pourcentage massique des sédiments QC bruts

Élément	Pourcentage	Élément	Pourcentage	Élément	Pourcentage
O	52,6	**Na**	0,7	**Mn**	traces
Si	22,2	**S**	0,5	**Cu**	traces
Ca	14,8	**Mg**	0,8	**Zn**	traces
Al	4,6	**Cl**	0,3	**P**	traces
Fe	1,9	**Ti**	0,2	**Ba**	traces
K	1,3	**Na**	0,7	**Sr**	traces

- *Analyse par diffraction de rayons X*

L'analyse par diffraction des rayons X permet de préciser les phases minéralogiques en présence dans le matériau. Les phases principales, couramment présentes dans les sédiments, ont été retrouvées sur les différents sédiments PSL, QNM et QC. À savoir le calcaire, le quartz et les autres minéraux minoritaires.

- **PSL :**

  → Phases présentes : Quartz, Calcite, Halite, Aragonite et Dolomite

  → Phases probables et possibles : Muscovite, Albite, Clinichlore.

- **QN :**

  → Phases présentes : Quartz, Calcite, Halite, Aragonite et Dolomite

  → Phases probables et possibles : Chlorite, Vermiculite, Clinichlore.

- **QC :**

  → Phases présentes : Quartz, Calcite, Aragonite, Muscovite

  → Phases probables et possibles : Kaolinite, Rutile.

III.4 - Récapitulatif général

Un programme expérimental a été mis en place afin d'identifier les paramètres d'état, de nature et de comportement des trois sédiments en vue de les valoriser dans les ouvrages de la plateforme expérimentale de Toulon (voir descriptif détaillé dans la partie « Ouvrages ») :

- Plot béton : sédiments du PSL et QNM
- Eco-modelé : sédiments du QNM et QC
- Route : sédiments du QNM et QC

III.4.1 - PSL

Les résultats d'essais réalisés sur les sédiments du Port Saint-Louis sont synthétisés dans le tableau 10 suivant. Les fractions 0/40 mm et 0/31.5 mm étudiées respectivement par les deux laboratoires n'impactent pas la qualité des résultats et sont uniquement liées à des méthodes de travail préférentielles.

Tableau 9 : Résultats d'essais sur les sédiments du Port Saint Louis du Mourillon (PSL)

Caractéristique	Résultat IMT LD (Fraction 0/40 mm)	Résultat CEREMA (Fraction 0/31,5 mm)
Teneur en eau – w_{moy} (%)	9,5	3,3
Passant à 63 µm (%)	/	16,1
Passant à 80µm (%)	9,0	19,6
Passant à 2 mm (%)	96,0	97,6
$C_u = D_{60}/D_{10}$	2,70 > 2	$C_u > 3,46 > 2$ [8]
$C_c = (D_{30})^2/D_{10*}D_{60}$	1 < 1,34 < 3	$1 < 1,19 < C_c < 2,11 < 3$
Type de granulométrie	Granulométrie étalée et bien répartie	Granulométrie étalée et bien répartie
Limite de liquidité W_L (%)	27,5 %	/
Limite de plasticité W_p (%)	0,0	/
Indice de plasticité Ip (%)	27,5 %	/
Valeur au bleu du sol VB_S (g/100g)	0,2	0,1
Valeur au bleu MB 0/D (g/kg)	/	0,5
Masse volumique absolue ρs (t/m^3 ou g/cm^3)	2,63	/
Equivalent de sable	98,3	/
Friabilité de sable (%)	38,7	/
Perte au feu (450°C) (%)	1,4	/
Perte au feu (550°C) (%)	1,6	3,2
pH	/	8,6

[8] Encadrement au moyen d'une valeur interpolée qui constitue une borne inférieure de D_{10}

Porosité cumulée (0-40mm) (cm3/g)	0,0055	/
Surface spécifique (0-40mm) (g/cm²)	0,9390	/
Classification GTR	Classe B2 : sable argileux	F11 : matériau faiblement organique Classe B5 : Sable très silteux
Portance et paramètres de compactage		
W_{OPM} / w_{OPN} (%)	13,0	13,0
ρ_d (g/cm3)	1,78	1,44
IPI à W_{OPM} / W_{OPN}(%)	24	18
Compacité (%)	67,68	/

Ces résultats ont conduit aux conclusions suivantes :

- Le caractère peu humide des sédiments (teneur en eau < 10%) après lagunage
- Un matériau sableux : près de 100 % de passant à 2 mm
- Le caractère peu plastique des sédiments
- Le caractère de sensibilité à l'eau : VBS > 0,2 pour l'IMT et forte teneur en fines pour le CEREMA
- La courbe Proctor normal « plate » obtenue par le CEREMA est caractéristique de ce type de matériau : homomorphe et difficile à compacter. La teneur en eau optimale a été obtenue au regard des valeurs de l'indice de portance immédiat (IPI).
- Au sens du GTR, les sédiments du port Saint-Louis se classent en :
  - → B2 au regard des résultats de l'IMT LD
  - → B5 au regard des résultats du CEREMA

III.4.2 - QUAI NOEL MODIFIÉ

Les résultats d'essais réalisés sur les sédiments du Quai Noël Modifié sont synthétisés dans le tableau 11.

Les paramètres d'identification mesurés en phase de caractérisation physico-chimique sont en relation avec le domaine de valorisation envisagé.

Tableau 10: Synthèse des caractéristiques physiques de sédiments QNM brut

	Matériaux	Sédiments QNM
Paramètres d'identification	$W_{40°C}$ (%)	35,53
	$W_{105°C}$ (%)	38,01
	Teneur en fines (Φ ≤ 63 µm)	56
	Valeur au bleu VBS (g/100g)	1,23
	Limite de liquidité W_L (%)	87,83
	Limite de plasticité W_P (%)	52,92
	Indice de plasticité I_P (%)	34,91
	Classification GTR	A_3
	Perte au feu à 40 °C – 450 °C (%)	19,33
	Perte au feu à 105 °C – 450 °C (%)	16,25
	Perte au feu à 40 °C – 550 °C (%)	23,94
	Perte au feu à 105 °C – 550 °C (%)	23,24
	Masse volumique apparente (g/cm^3)	1,15
	Masse volumique absolue (g/cm^3)	2,29
	W_{OPM} (%)	26
	ρ_{OPM} (g/cm^3)	1,51
	IPI_{OPM}	26
	Compacité	66
	Minéraux principaux	Quartz, calcite

III.4.4 - QUAI CORSE

Cette partie synthétise les résultats des laboratoires de l'Ecole des Mines de Douai et du CEREMA d'Aix-en-Provence.

Synthèse de la caractérisation

Les paramètres d'identification mesurés en phase de caractérisation physico-chimique sont en relation avec le domaine de valorisation envisagé (éco modelé et route). Les résultats obtenus sont synthétisés dans le tableau suivant :

Tableau 11 : Synthèse des caractéristiques physiques des sédiments QC brut

Matériaux	Sédiments QC
$W_{40°C}$ (%)	6,9
$W_{105°C}$ (%)	8,86
Teneur en fines (Φ ≤ 63 µm) (%)	8
Valeur au bleu VBS (g/100g)	0,29

Limite de liquidité W_L (%)	27,18
Limite de plasticité W_P (%)	27,18
Indice de plasticité I_P (%)	0
Classification GTR	B_2
Perte au feu à 40 °C – 450 °C (%)	2,72
Perte au feu à 105 °C – 450 °C (%)	2,25
Perte au feu à 40 °C – 550 °C (%)	2,89
Perte au feu à 105 °C – 550 °C (%)	2,95
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2,66
W_{OPM} (%)	10
ρ_{OPM} (g/cm^3)	2,01
$IPI_{OPM\ (\%)}$	10
Compacité (%)	79
Minéraux principaux	Quartz, calcite

Conformément au guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme, quelle que soit la catégorie considérée, le GTR précise que ce matériau est sensible à l'eau du fait de la plasticité des fines qu'il contient. Leur temps de réaction aux variations de l'environnement hydrique est court.

L'analyse de diffraction des rayons X a fait ressortir qu'ils sont majoritairement composés de quartz et de calcite et minoritairement de muscovite, rutile et aragonite.

Enfin, en se basant sur les résultats des essais de lixiviation (présentés dans le chapitre 3 suivant), selon le guide acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routières [Sétra, 2012], la caractérisation environnementale de sédiments QC bruts a montré que l'utilisation de ces matériaux en technique routière ne présenterait pas d'effet néfaste sur l'environnement.

III.5 - Caractérisation environnementale et possibilités de valorisation

La caractérisation environnementale a consisté à appliquer à ces échantillons la démarche définie dans le guide SETRA[9]. Ce guide est parmi les documents techniques de référence, en matière de valorisation et matériaux et définit les limites et seuils d'acceptabilité.

[9] Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière – Évaluation environnementale (mars 2011)

La caractérisation environnementale passe par des essais de lixiviation qui permettent d'extraire de façon normalisée les éléments chimique polluants pour ainsi quantifier le risque maximal de transfert. La directive européenne sur les mises en décharge (2002) a adopté le test de lixiviation (EN 12457) et le test en colonne (EN 14405).

On identifie donc :

- Un 1er niveau d'évaluation basé sur les résultats d'essais de lixiviation (NF EN 12457-2) et la détermination de la concentration en certains polluants des sédiments bruts (hydrocarbures totaux, HAP, PCB, BTEX) ;
- Si nécessaire, un 2ème niveau basé sur les résultats d'essais de percolation appliqués à l'échantillon le plus émissif à la lixiviation (NF CEN/TS 14405).

Ces deux premiers niveaux d'évaluation ont été complétés par une comparaison de la concentration en certains polluants des sédiments bruts (PCB et organo- étains) avec les seuils N1 et N2 fixés par l'arrêté modifié du 09/08/2006, relatif aux niveaux à prendre en compte lors d'une analyse de rejets dans les eaux de surface de sédiments marins, estuariens ou extraits de cours d'eau ou canaux, dits seuils « Géode ».

III.5.1 - PORT SAINT-LOUIS

Interprétation des résultats

Les résultats mettent en évidence un excès de chlorures et dans une moindre mesure de sulfates, et donc de la fraction soluble. Concernant la concentration en PCB et les composés organostanniques dans les sédiments bruts, les résultats ont montré une teneur en TBT proche du seuil N2, dont il a fallu tenir compte dans les études d'impact préalables au dragage.

Conclusions relatives aux possibilités de valorisation

Selon les recommandations du guide SETRA, l'utilisation des sédiments bruts du Port Saint-Louis du Mourillon ne pouvait être validée à ce niveau d'investigations pour les usages routiers ; toutefois, un prétraitement préalable efficace des sédiments permettant d'en extraire les chlorures et sels solubles, par lavage par exemple, pourrait permettre de valider cette utilisation. Ce sédiment a néanmoins été valorisé dans le squelette granulaire de blocs de béton à des fins expérimentales.

III.5.2 - QUAI NOËL – QUAI NOËL MODIFIÉ

Interprétation des résultats

À partir des résultats obtenus sur sédiments bruts et sur éluats, il a été possible de classer le sédiment QN dans la catégorie des déchets non-dangereux. En effet il dépasse le seuil inerte pour ses teneurs brutes en COT (103 000 au lieu de 30 000 mg/kg), HCT (4250 au lieu de 500mg/kg) et HAP (540 au lieu de 50mg/kg) ;

et pour ses teneurs lixiviables en fraction soluble (43 800 au lieu de 4 000mg/kg), molybdène (0.7 au lieu de 0.5 mg/kg), chlorures (5280 au lieu de 800 mg/kg), fluorures (14.5 au lieu de 10) et sulfates (19 500 au lieu de 1 000mg/kg).

L'évaluation environnementale de niveau 1 (suivant la norme NF EN 12457-2) a mis en évidence des dépassements des valeurs limites :

- Pour les chlorures et les sulfates, et donc pour la fraction soluble
- Pour les hydrocarbures totaux et HAP
- Pour la somme des 7 congénères des PCB 5 (sur 1 seul échantillon composite)
- Pour le COT

Les analyses de l'échantillon composite brut recueilli sur QNM en 2014 ont mis en évidence des concentrations proches des autres échantillons testés sur QN.

L'évaluation de niveau 2 (suivant la norme NF CEN/TS 14405) menée sur l'échantillon le plus contaminé au sens des seuils de l'arrêté du 09/08/2006 (concentrations sur brut dépassant le seuil N2 : hydrocarbures totaux, HAP, PCB, TBT, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn et Hg), a révélé que seuls les chlorures étaient relargués à des concentrations dépassant les valeurs limites fixées par le guide SETRA : à court terme, les contaminants métalliques sont apparus peu mobiles.

Conclusions relatives aux possibilités de valorisation

Selon les recommandations du guide SETRA, l'utilisation des sédiments bruts du Quai Noël (et du Quai Noël Modifié), était donc invalidée pour les usages routiers ; seul un pré-traitement préalable des sédiments aurait permis de valider cette utilisation, par exemple :

- Par lavage pour l'extraction des chlorures et sulfates,
- Par compostage pour réduire la teneur en hydrocarbures,
- Par abattement de la teneur en PCB des sédiments de la zone ouest (éch. QN34-k3) ou éviction de cette zone pour utilisation dans une filière routière.

Le sédiment QNM a été in fine valorisé dans tous les ouvrages réalisés : pour la constitution des blocs de béton notamment au vu de sa granulométrie, ainsi qu'en tant que sable/granulat pour les Ecomodelés Paysagers et en technique routière.

III.5.3 - QUAI CORSE

Interprétation des résultats

Selon la règlementation des déchets, le sédiment QC appartient à la catégorie des déchets non inertes et non-dangereux. En effet, il dépasse le seuil inerte vis-à-vis de ses teneurs lixiviables en chlorures (1 840 au lieu de 800mg/kg), sulfates (3 340 au lieu de 1 000mg/kg) et fraction soluble (10 800 au lieu de 4 000mg/kg).

Conclusions relatives aux possibilités de valorisation

Le sédiment QC n'a pas présenté de concentration rédhibitoire, mais les niveaux des chlorures et sulfates mesurés à la lixiviation ont été des points d'attention. Pour les chlorures par exemple il a été constaté que du fait d'un temps de ressuyage important, on pouvait noter une amélioration des valeurs mesurées.

Les études ont amené à conclure que le sédiment QC pourrait être valorisé en technique routière dans des scénarios « revêtus » ou « recouverts ». Dans ce projet, le sédiment QC a été valorisé pour la réalisation des écomodelés paysagers ainsi que dans les sous couches routières.

IV. OUVRAGES RÉALISÉS : DESCRIPTION DES OUVRAGES – MÉTHODOLOGIES EMPLOYÉES – SUIVIS RÉALISÉS – RÉSULTATS OBTENUS

Le projet SEDIMED a été initié pour faire émerger des filières terrestres de gestion des sédiments marins méditerranéens non-immergeables, opérationnelles, locales et économiques, conformes à la politique communautaire du développement durable.

Dans cet objectif, le projet s'est appuyé sur la mise en place du Centre de Production d'Eco-Matériaux (CPEM ENVISAN), équipé d'infrastructures dédiées et de plots d'essais, permettant de tester et valider ces filières par la réalisation et le suivi des prototypes d'essais à l'échelle 1.

Trois types de prototypes intégrant des sédiments marins méditerranéens présentant des caractéristiques physico-chimiques contrastées ont ainsi été mis en œuvre sur le CPEM à la Seyne/mer : des écomodelés paysagers (dosage en sédiments : 100%) ; des plots route (dosage en sédiments : 30%) ; des plots béton (dosage en sédiments : 5 et 21%).

Pour étudier la faisabilité de valorisation de ces sédiments, l'évolution des prototypes sur les plans géotechnique (Mesure de l'évolution des résistances mécaniques sur éprouvettes et sur carottages ; Mesure des modules dynamiques et des déflexions sur les ouvrages routiers ; Mesure de l'évolution de la compacité des écomodelés ; Tests de résistances et de durabilité des bétons) et environnemental (Caractérisation physico-chimique approfondie des matériaux (contenu total, lixiviable, dangerosité, etc. ; Analyse après chaque épisode pluvieux des eaux de ruissellement en contact avec les prototypes ; caractérisation de la végétalisation spontanée des écomodelés) a été suivie sur une période suffisamment longue pour obtenir des conclusions opérationnelles, à savoir une année.

Des casiers lysimétriques ont également été utilisés et étudiés en conditions naturelles d'exposition, et sur la même durée, sur la plateforme Ardévie de l'INERIS à Aix en Provence pour compléter la caractérisation des sédiments étudiés dans un objectif de valorisation en technique routière.

Trois sédiments originaires de la rade de Toulon ont été employés : le sédiment fin et contaminé du Quai Noël de la Base Navale de Toulon (QNM) ; le sédiment plus grossier et moins contaminé du Quai de Corse du port de Toulon (QC) ; le sédiment sableux et faiblement contaminé du Port Saint-Louis du Mourillon (PSL). Pour chaque série de prototypes réalisés, un ouvrage témoin sans sédiment a été mis en œuvre et suivi selon les mêmes procédures que les prototypes intégrant du sédiment dans le but de déterminer les différences comportementales éventuelles.

IV.1 - Essais de valorisation en technique routière

Pour le suivi des plots (échelle 1) sur le CPEM comme pour les lysimètres (échelle pilote) sur la plateforme INERIS, représentatifs d'essais de valorisation en technique routière, les référentiels d'interprétation utilisés pour le volet environnemental ont été les guides de référence sur le sujet, à savoir le guide méthodologique « Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière – Evaluation environnementale », édité par le SETRA en mars 2011, et le guide « Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière – Aide à la mise en œuvre du niveau 3 de caractérisation environnementale – Volet n°1 : les essais lysimétriques et plots expérimentaux » édité par le CEREMA en septembre 2015.

Rappel : Le guide méthodologique « Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière – Evaluation environnementale », édité par le SETRA en mars 2011 et appelé « guide SETRA » dans le présent document, constitue le référentiel pour la valorisation de matériaux alternatifs en technique routière en France.

L'objet du guide SETRA est de « fournir une démarche d'évaluation de l'acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs élaborés à partir de déchets et destinés à être utilisés en technique routière ».

Il définit dans ce cadre plusieurs types d'usages en technique routière, dont les définitions sont reportées ci-dessous :

- **Usages routiers de type 1**, ou en sous-couche de chaussée ou d'accotement, **revêtus** (d'une couche de surface réputée imperméable – asphalte, enrobés, enduits superficiels, béton, pavés jointoyés – et présentant une pente minimum de 1 %) : remblai sous ouvrage, couche de forme, couche de fondation, couche de base et couche de liaison
- **Usages routiers de type 2**, ou en remblai technique connexe à l'infrastructure routière ou en accotement, **recouverts** (par au moins 30 cm de matériaux naturels – dont terre végétale – avec une pente minimum de 5 % sur le dessus de cette couverture, afin de limiter l'infiltration de l'eau)

- **Usages routiers de type 3**, **non revêtus ou non recouverts**, tels que les usages en couche de roulement, les usages en sous-couche de chaussée ou d'accotement non revêtus, les usages en remblai technique connexe à l'infrastructure routière ou en accotement non recouverts, les usages en remblai de préchargement nécessaire à la construction d'une infrastructure routière, en système drainant, etc.

La démarche de caractérisation environnementale des matériaux alternatifs en technique routière repose ainsi sur une approche en plusieurs niveaux, définissant des seuils acceptables sur le contenu total ou émissible (à la lixiviation, à la percolation ou en plots).

Le guide CEREMA « Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière – Aide à la mise en œuvre du niveau 3 de caractérisation environnementale – Volet n°1 : les essais lysimétriques et plots expérimentaux » paru en septembre 2015 définit les valeurs seuils applicables aux lysimètres et plots étudiés dans le cadre du niveau 3 décrit par le guide SETRA.

Deux points sont à contrôler pour vérifier l'acceptabilité du matériau alternatif dans l'usage testé :

- D'une part, ses émissions chroniques, via le respect de la quantité surfacique relarguée cumulée sur la durée du suivi
- D'autre part, ses émissions aigües, via le respect de concentrations maximales admissibles dans les éluats collectés

Pour les paramètres ne disposant pas de valeurs de référence dans le guide de niveau 3, les références suivantes ont été prises en compte :

- Pour les polluants disposant d'une limite de qualité des eaux brutes utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine dans l'arrêté du 11 janvier 2007 (Σ6 HAP) : cette limite de qualité (exprimée en mg/L) multipliée par un taux d'infiltration de référence ($P_{réf}$ en L/m^2/an ou mm/an)
- Pour les autres polluants : lorsqu'elle existe, la valeur de référence spécifique (« QS ») - Eau potable, telle que définie ou proposée dans les valeurs de NQE/VGE disponibles sur le site du portail substances chimiques de l'INERIS, exprimée en mg/L, elle aussi multipliée par un taux d'infiltration de référence ($P_{réf}$ en L/m^2/an ou mm/an)

Dans ces deux cas, l'absence de prise en compte de facteur d'atténuation entre la concentration émise par l'ouvrage et celle atteignant l'objectif de protection (nappe souterraine utilisée pour la production d'eau potable) garantit une approche majorante en termes de sécurité.

IV.1.1 - Casiers lysimétriques mis en œuvre à l'INERIS (plateforme Ardévie)

Préambule : à la différence des plots expérimentaux échelle 1 qui permettent un suivi géotechnique, les casiers lysimétriques – échelle pilote – constituent des ouvrages expérimentaux dont l'objectif de suivi est uniquement environnemental.

***Conditions d'exposition* et de suivi :**

Trois casiers lysimétriques, de section de 5 m² (dont 4,14 m² de section de « percolation », et une bordure de 10 cm de largeur permettant de séparer les eaux de ruissellement ayant suivi un écoulement préférentiel le long des parois verticales) ont été installées sur la plateforme Ardévie, opérée par l'INERIS à Aix-en-Provence (cf. Figure 28).

Les sédiments utilisés pour remplir les casiers lysimétriques ont été ceux du Quai Noël Modifié et du Quai de Corse, lagunés sur le site du CPEM. Cette première étape de lagunage, qui constitue un traitement, fait passer les sédiments du statut de matériaux bruts à celui de matériaux alternatifs au sens des guides SETRA/CEREMA. Un troisième casier a été rempli avec du sable de carrière inerte pour servir de témoin de référence.

Les casiers lysimétriques ainsi constitués ont été placés en conditions naturelles d'exposition à l'extérieur sur une durée supérieure à 1an, de juin 2015 à septembre 2016.

Figure 28 : Lysimètres étudiés à l'INERIS – vues de dessus et de côté

Les masses (sèches) totales de sédiments et de sable employées pour remplir les casiers lysimétriques ont été les suivantes :

- Sédiment du Quai Noël Modifié : 3685 kg
- Sédiment du Quai de Corse : 6900 kg
- Sable témoin : 5909 kg

Les quantités utilisées différentes sont liées aux densités des sédiments testés.

Le protocole expérimental de prélèvement des eaux de percolation prévoyait des analyses selon le rythme suivant :

- À chaque pluie pendant les trois premiers mois
- Deux fois par mois pendant les trois mois suivants (à condition que la pluviométrie le permette)
- Une fois par mois ensuite

Néanmoins, compte-tenu de la pluviométrie et des volumes d'eau effectivement collectés dans les réservoirs sur la période du suivi, certains prélèvements ont fait l'objet d'un mélange au prorata des volumes prélevés sur la période d'analyse (fusion de 2 ou 4 prélèvements).

La collecte des eaux de percolation et de ruissellement a été réalisée dans des cuves situées en contre-bas des ouvrages (voir Figure 29 ci-après).

Figure 29 : Système de collecte des eaux de percolation et de ruissellement des lysimètres – les conduits issus de chaque cuve rejoignent des réservoirs distincts situés dans l'espace technique en contrebas

Les analyses réalisées sur les prélèvements d'eau effectués ont été les suivantes :

- 12 métaux du guide SETRA : As, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn
- 3 anions du guide SETRA : fluorures, chlorures, sulfates
- 16 HAP classiques
- Trois polluants émergents dont la présence avait été identifiée dans les sédiments : dibutylétain cation (DBT), tributylétain cation (TBT) et diéthylhexylphtalate (DEHP)

Dans le cas des lysimètres étudiés, les valeurs quantifiées dans les eaux récupérées ont été comparées aux valeurs définies au niveau 3 pour un usage non-revêtu et non-recouvert (avec une pluie efficace annuelle de référence, $P_{réf}$ de 300 mm/an).

Bilan du suivi environnemental des lysimètres :

Sur la période suivie (un an), les rapports L/S cumulés des lysimètres ont dépassé la valeur recommandée de 0,1 L/kg, à l'exception du lysimètre rempli avec le sédiment QC ; en effet, si les volumes d'eau récupérés sur la période sont du même ordre de grandeur pour les deux sédiments (509 L pour QC et 545 L pour QNM), le matériau alternatif de QC est particulièrement dense, ce qui diminue d'autant le rapport L/S (car la masse de sédiments mise en place dans le lysimètre est plus importante à volume égal).

- **Sédiment du Quai de Corse (QC)**

Les études précédemment réalisées sur le sédiment QC avaient mis en évidence les points suivants :

- Au niveau 1 d'évaluation, le matériau alternatif QC ne présente aucune valeur rédhibitoire ; les concentrations en anions et la fraction soluble ne permettent toutefois pas un usage immédiat en technique routière, et nécessitent un niveau d'investigation plus approfondi
- Au niveau 2 d'évaluation, les quantités relarguées cumulées à la percolation sont inférieures aux seuils de valorisation, et permettent ainsi un usage revêtu ou recouvert.
- Au niveau 3, en usage non revêtu non recouvert, cas des lysimètres, les chlorures et sulfates dépassent les seuils tolérés, à la fois pour les émissions globales et pour les concentrations maximales admissibles.

D'autres dépassements ont été observés au niveau 3, mais considérés comme anecdotiques ou liés à un biais expérimental (ex. corrosion des lysimètres).

- **Sédiment du Quai Noël Modifié (QNM)**

Les études précédemment réalisées sur le sédiment QNM avaient mis en évidence les points suivants :

- Au niveau 1 d'évaluation, le matériau alternatif QNM présente des concentrations rédhibitoires en COT, HCT, HAP et PCDD/F ; en outre, les émissions à la lixiviation de certains polluants, et particulièrement des chlorures, sulfates et de la fraction soluble requièrent une évaluation de niveau 2
- Au niveau 2 d'évaluation, l'émission de chlorures autoriserait une valorisation en scénario revêtu, mais l'émission en sulfates reste rédhibitoire
- Au niveau 3, en usage non revêtu non recouvert, les chlorures et sulfates dépassent les seuils tolérés, à la fois pour les émissions globales et pour les concentrations maximales admissibles.

En conclusion, le suivi des lysimètres (sédiments QC et QNM) a révélé que les seuls dépassements problématiques observés concernaient les chlorures et les sulfates.

Les quantités relarguées (en chlorures et sulfates) ont confirmé les résultats déjà observés aux niveaux 1 et 2 de caractérisation environnementale. Une explication formulée a été que la période de lagunage des sédiments sur le site (*i.e.* plusieurs mois) n'avait pas été suffisante ou pas assez efficace pour permettre une valorisation en technique routière, en usage non revêtu non recouvert.

IV.1.2 - Prototypes routiers - Route et Écomodelés (CPEM ENVISAN)

Les plots routiers et plots écomodelés ont été mis en œuvre sur le site du CPEM à la Seyne/mer à partir des sédiments du Quai Noël Modifié et du Quai de Corse entre le 14 octobre et le 12 novembre 2015. Des ouvrages témoins ont été réalisés pour chaque type d'ouvrage avec du sable de carrière inerte, sans sédiment.

Les suivis environnemental et géotechnique ont été menés sur une durée approximative d'un an (jusqu'à fin octobre 2016).

La pluviométrie totale à laquelle les plots ont été naturellement exposés sur la période de suivi a été de 264mm, soit seulement 40% de la pluviométrie quantifiée sur la même période les 3 années précédentes. La période de suivi a donc été particulièrement peu pluvieuse, et cet élément pourrait expliquer, au moins pour partie, les faibles volumes récupérés sur les plots étudiés.

Concernant les températures, les minimales recensées sur le site sont restées positives, et les plots n'ont ainsi jamais été soumis au gel.

Sur les plots routiers, 172 passages de véhicules ont été recensés au cours de la période de suivi (6 véhicules légers et 166 poids lourds).

Les quantités de matériaux mis en place dans les plots routiers et les plots écomodelés paysagers sont indiquées dans les tableaux suivants :

Tableau 12 : Quantités de matériaux utilisées dans la couche de forme des plots routiers

Paramètres	Témoin	QN	QC
Nature du matériau	Sable (équivalent sédiment)	Sédiment (MA)	Sédiment (MA)
Masse totale de matériau (kg)	54 380*0,3 = 16 314	15 000	16 000
Teneur moyenne en eau (%)	5	12,42	6,64
Masse sèche de matériau alternatif incorporé dans le matériau routier (kg)	15 498	13 137	14 938
Surface du plot routier (m²)	70	70	70

Tableau 13 : Quantités de matériaux dans les plots écomodelés paysagers

Paramètres	Témoin	QN	QC
Nature du matériau	Sable	Sédiment (MA)	Sédiment (MA)
Masse totale de matériau (kg)	120 320	108 000	130 000
Teneur moyenne en eau (%)	8,8	23,9	8,5
Masse sèche de matériau (kg)	109 730	82 188	118 950
Surface du plot éco-modelé (m²)	91,17	99,95	105,72

IV.1.2.1 PROTOTYPES ROUTE

Conception des plots routiers

Un des objectifs de SEDIMED était de concevoir une structure de chaussée maximisant l'utilisation de sédiments non immergeables issus des dragages des bassins du Port de Toulon et de réaliser la structure de voirie issue de ce dimensionnement.

Trois plots routiers ont été réalisés (un plot avec le sédiment du Quai Noël Modifié, un avec le sédiment du Quai de Corse, et un témoin sans sédiment), alignés « bout à bout » telle que représentés sur le schéma suivant. Une géomembrane continue (en rouge) isolait chaque plot et empêchait toute eau d'infiltration de la route de s'écouler dans l'environnement. Un système de drains recueillait séparément les eaux d'infiltration de chaque plot et les acheminaient vers des regards (puisards) qui permettaient de les recueillir pour analyse.

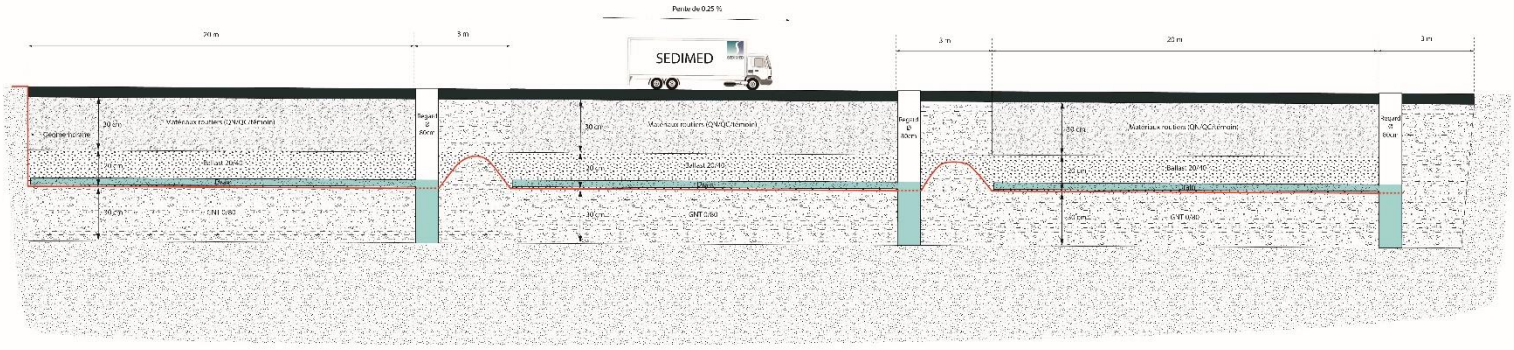


Figure 30 : Schéma de coupe longitudinale de la route SEDIMED (plot témoin, QC, QNM – réalisation Néo Sud) :

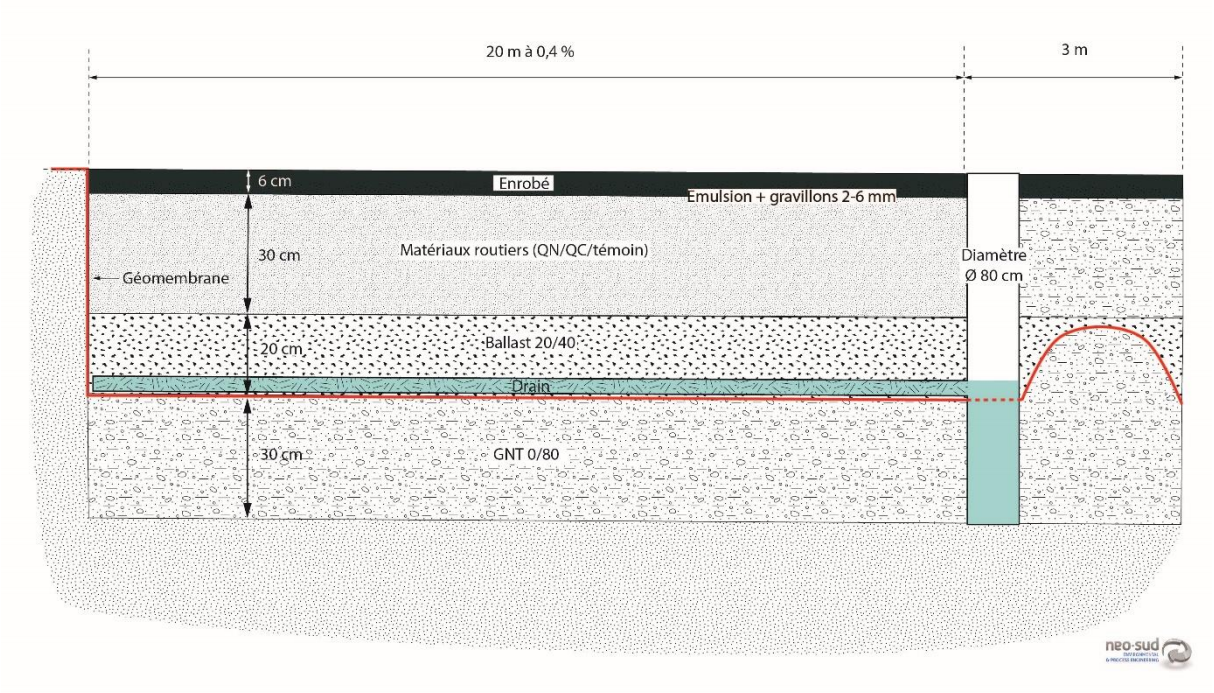


Figure 31 : Zoom de coupe longitudinale de la route SEDIMED (plot témoin, QC, QNM)

La méthodologie retenue pour le dimensionnement a été celle décrite dans la norme NF P 98-086 « Dimensionnement structurel des chaussées routières – Application aux chaussées neuves » d'octobre 2011. Elle consiste à s'assurer que les valeurs de déformation verticale du sol support et d'allongement à la base des matériaux bitumineux sont inférieures ou égales aux limites admissibles.

Les hypothèses prises en compte pour le dimensionnement de la structure étaient les suivantes :

- Classe de plate-forme : PF 2
- Trafic : 30 PL/j
- Durée : 10 ans
- Accroissement 2 %

Les caractéristiques des matériaux retenues étaient les suivantes :

- BBSG (Béton Bitumineux Semi Grenus) 0/10 : Module E 15°C/10 Hz = 7000 MPa / Fatigue 10°C / 25 Hz = 100 µdef
- Mélange sédiments+ sable correcteur 0/6 : Module = 10000 MPa / Fatigue Sigma 6 = 0,57 MPa / Forme : PF2 : EV2 > 50 MPa

La structure des différentes couches des matériaux mises en œuvre dans la route SEDIMED et leurs compositions théoriques sont indiquées dans la figure et le tableau suivant :

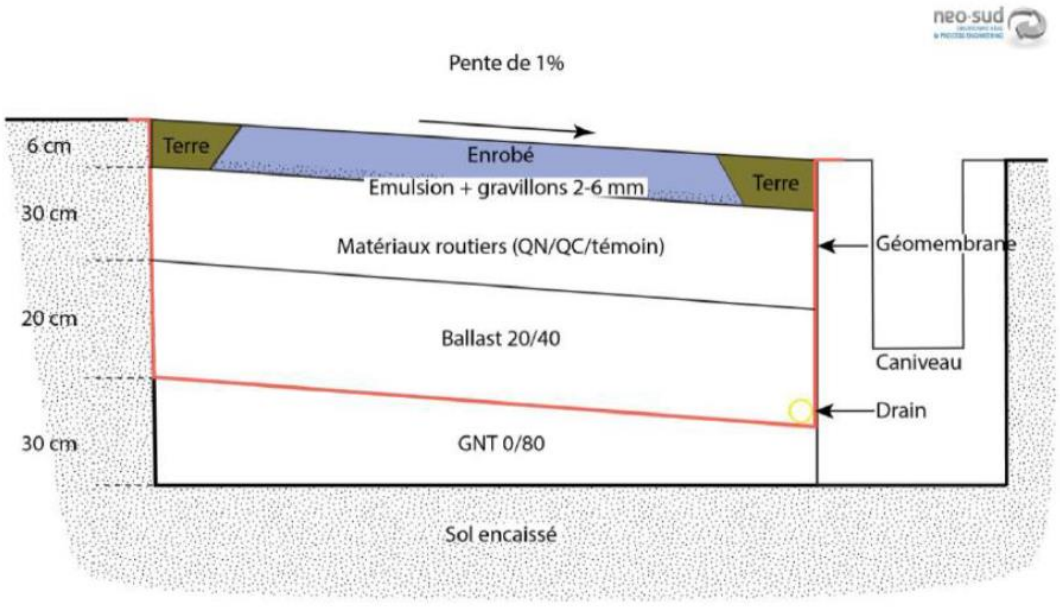


Figure 32 : Schéma de coupe transversale de la route mise en œuvre pour le projet SEDIMED

Tableau 14 : Composition des différentes couches de plots routiers

Solution de base (plot témoin) :	Solution variante (QNM et QC) :
BBSG 0/10 CL 2 : Ep = 6 cm	BBSG 0/10cl2 : Ep = 6 cm
Sable ciment : Ep = 30 cm	Mélange sédiments + 0/6 traités = 30 cm
Ballast 20/40 : Ep = 20 cm	Ballast 20/40 : Ep = 20 cm
Couche de forme : PF2	Couche de forme : PF2

Le protocole de mise en œuvre a consisté à épandre sur la chaussée des liants (Chaux et Ciment) pour ensuite les malaxer avec le sédiment et le sable. Cela a ainsi permis d'obtenir *in-situ* un mélange homogène des matériaux et des liants. Ces derniers permettant d'obtenir de très bonnes compacités et ainsi assurer une mise en œuvre ultérieure des enrobés.

Plusieurs essais de formulations ont été lancés en laboratoire (par COLAS, CEREMA et Mines Douai) pour définir la proportion de chaque sédiment à mettre en œuvre et les taux de traitement (chaux et ciment). Les résultats des essais ont révélé qu'un traitement d'une couche avec 100% de sédiment n'apportait pas assez de garantie. Les sédiments étant trop meubles et comportant trop de particules fines, les essais de compacité n'ont pas pu être concluants. Il a donc fallu mener une réflexion sur la faisabilité d'un mélange de sédiments avec un autre type de matériaux.

Ce dernier devant apporter « un squelette granulaire ». Plusieurs matériaux ont été testés : des graves 0/20, 0/60, recyclées, naturelles, des sables… Les graves, étant donné leur granulométrie pouvaient apporter une vraie sécurisation des performances post traitement. Néanmoins, avec ce principe, l'utilité des sédiments dans la chaussée n'aurait été que très limitée. Pour cette raison, les essais de substitutions se sont orientés vers un sable, un matériau granulaire naturel, fin et de densité équivalente aux sédiments. Après de nouveaux essais de formulation (pour déterminer les proportions pertinentes afin d'assurer une couche homogène et structurante), un sable de carrière 0/6 (SOMECA) a été choisi.

Les proportions pour la couche de forme de 30cm ont été validées de la manière suivante pour les plots avec sédiments :

- 30% de sédiment
- 70% de sable

Cette couche étant traitée avec 1% de Chaux vive (pour augmenter la siccité et diminuer la teneur en matière organique) et 5% de Ciment (LVTS 13) pour s'assurer d'obtenir une classe PF2 nécessaire à une mise en circulation après enrobage.

Des modélisations en laboratoire ont ensuite permis de déterminer les épaisseurs de chacune des autres couches constituant la future chaussée, qui ont été affinées via des essais sur site, notamment en intégrant les notions de portance et le type de terrain.

L'interprétation des données produites a validé une chaussée composée par : 6cm d'enrobés, 30cm de sédiment + matériaux routiers, 20cm de ballast 20/40 et 30cm de GNT 0/80.

Finalement, la chaussée prototype fut composée des trois plots suivants :

- Plot N°1 avec couche de forme : 30% Sédiment Quai Noël Modifié et 70% Sable 0/6mm
- Plot N°2 avec Couche de forme : 30% Sédiment Quai de Corse et 70% Sable 0/6mm
- Plot N°3 avec Couche de forme : 100% de sable 0/6mm

Pour permettre le suivi environnemental des plots routiers élaborés, un système de collecte des eaux de percolation via l'utilisation de drains placés sous la structure et connectés à des puisards de récupération a été mis en place. Par ailleurs, pour s'assurer du non-mélange des eaux entre les 3 prototypes routiers, en plus de la géomembrane placée au sol sous les plots pour les isoler de l'environnement extérieur, une zone neutre en sable 0/6 en forme de talus a été positionnée entre chacun des plots (voir plan définitif ci-après). Enfin, pour augmenter la percolation des eaux de pluie au travers des prototypes routiers, il a été décidé de laisser, de part et d'autre de la chaussée, une bande de 25cm exempte d'enrobé (*i.e.* non revêtue). Du ballast drainant a donc été mis en place (en lieu et place de la terre indiquée sur le schéma précédent) sur cette bande non revêtue pour augmenter l'infiltration des eaux.

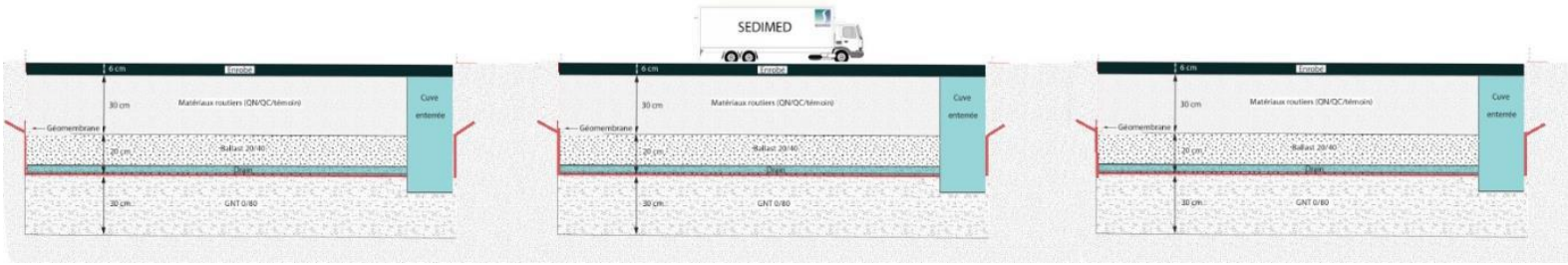


Figure 33 : Plan définitif de la voie Prototype SEDIMED

➢ Photos de la mise en œuvre (réalisée par l'entreprise COLAS Midi-Méditerranée) :

Mise en œuvre d'une couche de grave de préréglage des remblais techniques

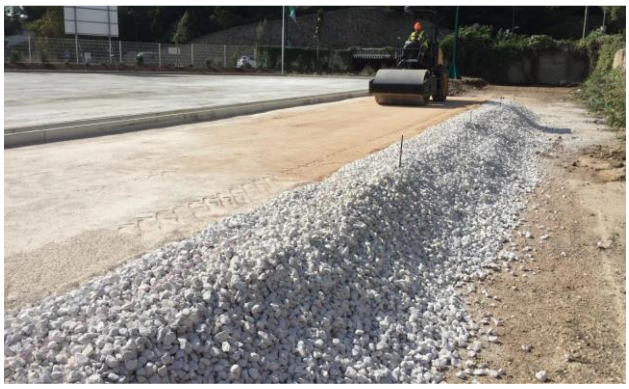
Terrassement pour les sarcophages et Couche de Réglage achevée

Mise en œuvre de la géomembrane et soudure sur les bords du caniveau

Mise en œuvre d'un géotextile de protection sur la géomembrane puis pose des drains et de la couche de 20/40mm

Mise en œuvre du sable constituant la future couche de forme avec les sédiments

Mise en œuvre et compactage du sable



Mise en œuvre des sédiments et compactage avant traitement

Epandage de la chaux

Epandage du ciment

Malaxage du ciment

Chaussée traitée, nivelée et compactée

Mise en œuvre des enrobés au Finisseur

Chaussée Prototype achevée avec Accotement en Ballast

Les trois portions de route SEDIMED élaborée faisait au total environ 60m de long pour 4m de large, avec une couche de roulement en asphalte de 3,5m et deux bordures de 25cm comblées avec du ballast drainant.

Suivis réalisés et résultats obtenus

Suivi environnemental :

Le protocole expérimental de prélèvement des eaux de percolation, identique à celui définit pour les lysimètres, prévoyait des analyses selon le rythme suivant :

- À chaque pluie pendant les trois premiers mois
- Deux fois par mois pendant les trois mois suivants (à condition que la pluviométrie le permette)
- Une fois par mois ensuite

Figure 34 : Bouche d'accès au puisard de collecte des eaux de percolation sur un des trois plots routiers

Les analyses réalisées sur les prélèvements effectués étaient les suivantes :

- 12 métaux du guide SETRA : As, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn,
- 3 anions du guide SETRA : fluorures, chlorures, sulfates,
- 16 HAP classiques
- 3 polluants émergents dont la présence avait été identifiée dans les sédiments : dibutylétain cation (DBT), tributylétain cation (TBT) et diéthylhexylphtalate (DEHP)

Bilan hydrique : comme précisé en introduction, les précipitations, l'année du suivi, ont été très faibles, ce qui a limité d'autant l'exposition des prototypes mis en œuvre. Les rapports L/S cumulés des deux ouvrages contenant des sédiments restent inférieurs au ratio de 0,1 L/kg recommandé par le guide (QNM : 0,0678 et QC : 0,0663) ; en outre, un essai à la fluorescéine a révélé qu'une partie des eaux collectées n'avait probablement pas réellement percolé à travers la couche contenant les sédiments en s'évacuant de manière assez rapide vers le puisard via des chemins préférentiels d'écoulement. Ce constat, inhérent aux essais expérimentaux échelle 1, a donc révélé que le suivi réalisé n'avait vraisemblablement pas été optimal et que les conclusions obtenues devaient être à nuancer.

Acceptabilité des émissions globales : le calcul de la quantité surfacique relarguée cumulée a été réalisée (cf. guide CEREMA) en considérant une pluie efficace annuelle de référence ($P_{réf}$) de 100 mm/an (valable pour les usages revêtus).

Pour les paramètres ne disposant pas de valeurs de référence dans le guide de niveau 3, les mêmes références que celles retenues pour les lysimètres ont été prises en compte, le facteur multiplicatif appliqué étant toutefois de 100 L/m²/an dans le cas d'un usage revêtu.

Le seul dépassement constaté par rapport aux valeurs limites (niveau 3 - scénario revêtu) durant le suivi environnemental concerne les chlorures et uniquement sur le plot élaboré à partir du sédiment QNM.

Des dépassements de la valeur limite en TBT ont été observés dans les eaux récoltées sur le plot témoin et QC, mais sans être suffisamment représentatifs pour être réellement pris en compte.

Concentration des émissions : Aucun dépassement des valeurs maximales autorisées (issues du guide de niveau 3 ou proposées dans le cadre de l'étude) n'a été relevé, hormis pour le TBT, comme ce qui a été constaté pour les émissions globales.

Suivi Géotechnique :

Le programme établi était le suivant :

- Carottages de la chaussée pour réalisation d'essais mécaniques : détermination des résistances en compression et en traction indirecte et du module de rigidité (selon NF EN 12697-42 et 43)
- Mesure de déflexion par essai à la poutre (ou charge roulante) pour évaluer la déformabilité de surface de la chaussée (NF P 98-200-2)
- Mesurage de la Profondeur de macrotexture selon norme NF EN 13036-1
- Mesure au Gama-densimètre de la masse volumique en place (matériaux blancs) selon norme NF-P 98-241-1

Les interventions ont été réalisées à différentes dates dans les mois suivant la réalisation des prototypes, et jusqu'à 1an après, afin d'appréhender le caractère évolutif des matériaux.

Figure 35 : Mesure de déflexion sur l'ouvrage SEDIMED

Les études de formulation avaient confirmé la faisabilité d'introduire à 30% du sédiment dans un mélange de sable traité à la chaux et au ciment. Ce choix a donc été retenu pour la réalisation des 2 plots routiers, qui s'est déroulée dans de bonnes conditions.

Une certaine variabilité dans les résultats de contrôle et de suivi a été observée. Cette variabilité est très certainement liée aux conditions de mise en œuvre des plots par traitement en place dans un espace réduit (quelques dizaines de mètres de long, environ 5 mètres de large) avec la présence des dispositifs de collecte des eaux.

Les mesures de déflexion réalisées ont confirmé l'évolution de la prise des matériaux constatée au cours des campagnes de carottage. Les niveaux moyens obtenus (15 à 25 - 1/100 mm) se sont révélés satisfaisants et d'un ordre de grandeur en accord avec ce qui était attendu.

Les matériaux routiers à base de sédiment ont été classés en classe T1 (limite T2 pour QC) et le témoin en classe T4 au sens de la norme NF EN 14227-1 relative aux matériaux traités au ciment pour les assises de chaussées. En termes de dimensionnement, cela signifie qu'à trafic égal, il faudra une épaisseur plus importante de sable/sédiment traité pour dimensionner convenablement la chaussée. La différence est notable entre les sédiments et le sable naturel traité.

Les plots ont permis de tirer et de confirmer plusieurs enseignements pertinents pour la valorisation des sédiments en technique routière :

- Les matériaux traités à base de sédiments, après un an de mise en œuvre, ont fait prise et permettent d'atteindre des performances convenables pour des chaussées faiblement à moyennement circulées
- Le comportement des matériaux à base de sédiment a été similaire à celui à base de matériau de carrière : évolution des performances dans le temps qui ont révélé une très bonne stabilité des ouvrages
- La teneur en matière organique du sédiment est un paramètre pertinent à suivre du fait de son influence sur le temps de prise des produits notamment lorsque des impératifs de remise en circulation rapide sont à prévoir
- En termes de durabilité, la durée de suivi sur le projet n'a pas été suffisante pour tirer davantage de conclusions et la configuration du site expérimental n'a pas permis un trafic poids lourds suffisamment important (moins de 25 PL/jour à la date de rédaction) pour statuer sur les performances à plus long terme

IV.1.2.2 PROTOTYPES ÉCOMODELÉS PAYSAGERS

La réalisation de buttes paysagères ou écomodelés paysagers à partir de sédiments dragués est une filière prometteuse dans la mesure où elle est capable de valoriser une quantité importante de sédiment.

Les débouchés de ces buttes paysagères sont multiples, elles peuvent en effet être utilisées :

- Comme merlons ou écrans anti-bruits dans le domaine routier
- Pour limiter les effets de l'érosion éolienne sur un terrain ou une plage
- Pour protéger les riverains du vent et des poussières
- Comme tampon visuel entre une zone industrielle et une zone de logements
- Pour des projets environnementaux (réservoirs de biodiversité, corridors biologiques)

Dans le cadre du projet SEDIMED, ENVISAN a mis en œuvre sur son site de la Seyne/mer (CPEM) 3 écomodelés paysagers. Ces écomodelés intègrent dans leur structure 2 sédiments issus de la rade de Toulon : le sédiment fin et contaminé du Quai Noël de la Base Navale de Toulon (QNM), et le sédiment plus grossier et moins contaminé du Quai de Corse du port de Toulon (QC). Un troisième écomodelé a également été réalisé à partir de matériaux inertes pour servir de témoin (*i.e.* référence).

De la terre végétale (classée inerte selon la règlementation déchet) a été employée pour recouvrir les écomodelés (20cm) et permettre l'implantation de végétaux afin d'évaluer leur taux de reprise et de survie.

Les trois écomodelés ont été équipés d'un dispositif de récupération des eaux de pluies (réseau de drains) de manière à caractériser environnementalement les eaux de percolation et de conclure quant à leur qualité. Le but étant de comparer le comportement des écomodelés expérimentaux intégrant du sédiment avec celui de l'écomodelé témoin pour conclure quant à la faisabilité opérationnelle de cette voie de valorisation des sédiments marins. Précisons que du sable de carrière a également été employé dans chacun des prototypes pour servir de couche drainante.

Un suivi géotechnique a également été mis en place par la réalisation de relevés topographiques (via un géomètre habilité) permettant de déterminer la densité des matériaux en place, elle-même renseignant sur leur compacité.

Le dernier aspect de ces expérimentations a été l'étude de la faisabilité de végétalisation des ouvrages expérimentaux constitués.

Conception des plots écomodelés paysagers

Les travaux de mise en œuvre des écomodelés sur le CPEM de la Seyne/mer ont débuté le 19 octobre 2015 pour s'achever 1 mois plus tard. La réalisation a été effectuée grâce aux moyens humains et techniques de l'entreprise ENVISAN.

Trois portions de géomembrane ont tout d'abord été découpées puis positionnées sur la dalle béton du CPEM pour garantir l'étanchéité des prototypes et éviter ainsi tout risque de pénétration des eaux dans le support.

Une couche de sable drainant d'environ 20cm d'épaisseur a ensuite été mise en place directement sur la géomembrane. Des talus de confinement en terre ont été réalisés tout autour du sable drainant, sous la géomembrane, pour augmenter l'étanchéité globale des prototypes et limiter les risques de débordement lors de la mise en œuvre des sédiments et de la terre végétale.

Des drains (2 par prototypes de manière à former un L) ont été positionnés dans la couche de sable drainant de façon à récupérer les eaux de percolation et de ruissellement issus des prototypes expérimentaux. Ces drains, placés dans le sens de la pente existante sur la dalle béton du CPEM, sont connectés à des tubes d'évacuation et de stockage des eaux en PVC (de diamètres 150mm) positionnés en contrebas des écomodelés et rejoignant le caniveau à proximité (cf. photos ci-après). La connexion des drains au 1er tube PVC est réalisée à l'aide de raccords en PVC à l'intérieur de la géomembrane dans la couche de sable, puis un trou du même diamètre que le tube a ensuite était réalisé dans la géomembrane pour permettre de le raccorder aux tubes extérieurs en préservant l'étanchéité de l'ensemble.

Suite à la mise en place de la géomembrane, de la couche de sable drainant, des talus de confinement et du dispositif de récupération des eaux, les matériaux ont pu être mis en place. Le déversement des matériaux et la mise en forme des écomodelés ont été réalisés au moyen d'une chargeuse équipée d'un système de pesage. L'utilisation de ce type de matériel a permis de quantifier la masse de sédiments et de matériau témoin utilisée.

Ainsi, pour la mise en œuvre des 3 écomodelés les quantités suivantes de matériaux ont été consommées :

- Sédiment Quai Noël Modifié : 108 tonnes à 76.1% de matière sèche
- Sédiment Quai Corse : 130 tonnes à 91.5% de matière sèche
- Remblai inerte 0-12mm : 120.32 tonnes à 91.2% de matière sèche.

Finalement, une couche de 20 à 30cm de terre végétale a été déversée puis tassée sur les matériaux en place pour terminer la mise en œuvre des écomodelés.

➢ **Photos de la mise en œuvre (réalisée par l'entreprise ENVISAN) :**

Mise en place de la couche drainante sur la géomembrane

Réalisation des talus de confinement

Mise en place du dispositif de récupération des eaux issues des prototypes

Dispositif de récupération des eaux issues des prototypes

Mise en place des matériaux et obtention des écomodelés

Déversement et tassement de la terre végétale

Les 3 écomodelés finalisés

Les dimensions finales des 3 écomodelés réalisés ont été respectivement de 15m de long pour 4.5m de large et 1.80m de hauteur.

Suivis réalisés et résultats obtenus

- Suivi environnemental :

Le protocole expérimental de prélèvement des eaux de percolation prévoyait des analyses selon le rythme suivant :

- À chaque pluie pendant les trois premiers mois
- Deux fois par mois pendant les trois mois suivants (à condition que la pluviométrie le permette)
- Une fois par mois ensuite

Les analyses réalisées sur les prélèvements effectués étaient les suivantes :

- 12 métaux du guide Sétra : As, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn
- 3 anions du guide Sétra : fluorures, chlorures, sulfates
- 16 HAP classiques
- 3 polluants émergents dont la présence avait été identifiée dans les sédiments : dibutylétain cation (DBT), tributylétain cation (TBT) et diéthylhexylphtalate (DEHP)

Bilan hydrique : Compte-tenu de la faible pluviométrie sur la durée du suivi (novembre 2015 à septembre 2016) et des faibles volumes d'eau effectivement collectés dans les systèmes de collecte, plusieurs prélèvements ont dû être fusionnés.

Les rapports L/S cumulés des ouvrages sont restés très nettement inférieurs au ratio 0,1 L/kg préconisé par le guide CEREMA, avec pour les sédiments QNM, un L/S de 0,00073 et pour les sédiments QC : 0,0016.

Les quantités d'eau ayant ruisselé à chaque pluie sur les ouvrages ne sont pas connues, les plots n'ayant pas pu être équipés de systèmes de collecte spécifiques, permettant une mesure de ces volumes.

Acceptabilité des émissions globales : le calcul de la quantité surfacique relarguée cumulée a été réalisée (cf. guide CEREMA) en considérant une pluie efficace annuelle de référence (Préf) de 300 mm/an (valable pour les usages recouverts).

Pour les paramètres ne disposant pas de valeurs de référence dans le guide CEREMA de niveau 3, les mêmes références que celles retenues pour les lysimètres ont été prises en compte (le facteur multiplicatif retenu étant à nouveau de 300 L/m²/an pour un usage recouvert).

Les dépassements constatés pour les émissions globales ont une nouvelle fois concerné les seuls chlorures et sulfates. Cette observation met en exergue une insuffisance des effets du lagunage qui n'a pas été suffisant pour extraire la totalité des sels solubles présents dans les sédiments.

Concentration des émissions : Aucun dépassement des valeurs maximales autorisées (issues du guide de niveau 3 ou proposées dans le cadre de l'étude) n'a été relevé, hormis pour les chlorures et sulfates.

- <u>Suivi géotechnique</u> :

Les plots ont fait l'objet de suivi topographique (par géomètre) effectués à trois échéances : novembre 2015 / mars 2016 / septembre 2016.

Le relevé de novembre 2015 (état initial) a été fait avant et après recouvrement par la terre végétale afin de déterminer l'état de compacité initial et évaluer le tassement du plot au fil du temps.

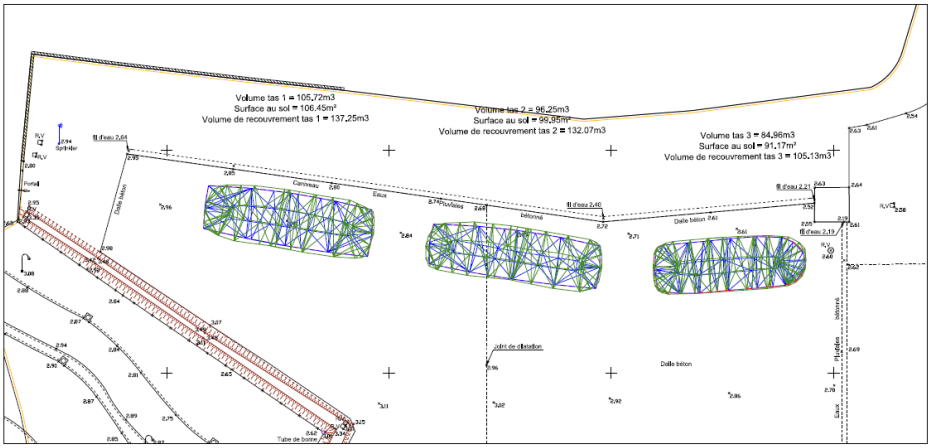


Figure 36 : Relevé topographique initial des éco modelés - Quai Corse / Quai Noël / Témoin

A l'état initial, les trois plots présentaient des caractéristiques de compactage assez semblables, avec des compacités légèrement inférieures aux densités utilisées comme référence en travaux de terrassements. Ceci est notamment dû au mode de compactage et de réalisation des plots.

Le suivi topographique des plots a fait apparaître un tassement relatif plus important sur le témoin, puis sur QNM et enfin QC.

La quasi-totalité du tassement s'est déroulée dans les 6 premiers mois.

Le comportement a été globalement similaire d'un plot à l'autre. Après 1 an de suivi, il n'a pas été constaté de désordre structurel des plots.

En conclusion, il est ressorti que cette voie de valorisation était parfaitement adaptée aux sédiments étudiés qui, sur la durée du suivi géotechnique réalisé, se sont mieux comportés que les matériaux témoins utilisés en présentant un tassement et une évolution structurelle moindres.

- Suivi de la végétalisation (CRC - ARMINES) :

Le suivi de la végétalisation des écomodelés paysagers a eu pour objectif de contrôler la croissance spontanée (ou non) de végétaux sur ces prototypes. Comme indiqué, les écomodelés paysagers, à base de sédiments marins dragués, ont été recouverts de terre végétale d'une épaisseur de 20-30cm. Cette technique permet d'une part de limiter l'impact visuel des buttes réalisées grâce au développement d'espèces végétales qui vont dissimuler le dépôt de sédiment, et d'autre part d'améliorer la tenue mécanique de l'ouvrage dans le temps (protection contre l'érosion superficielle induite par le vent et la pluie). Ces terres arables provenaient de friches agricoles.

Dans le but d'évaluer le potentiel de végétalisation naturelle de ces ouvrages, il a été choisi de ne pas avoir recours à des plantations et de laisser s'installer une dynamique naturelle de végétalisation fondée sur le stock de semences déjà présentes dans la terre végétale.

Par ailleurs, un plan d'expérience a été réalisé pour tester la capacité de la végétation semée et bouturée à croître directement sur les sédiments marins des sites du Quai Noël et du Quai Corse.

Les conclusions principales obtenues par ce suivi, qui avait pour objectif d'évaluer le potentiel de végétalisation naturelle de ces ouvrages, peuvent-être résumées comme suit :

- La dynamique naturelle de colonisation des végétaux a montré l'installation de 39 espèces sur l'ensemble des écomodelés. Cependant, la répartition spatiale des espèces n'a pas été uniforme, tant du point de vue du recouvrement de ces espèces que de leur composition floristique.
- Le taux de recouvrement de la végétation (compris entre 50 et 100% de la surface des écomodelés) a été minimal sur l'écomodelé Quai Noël, et la diversité biologique fût relativement moins importante par rapport aux autres écomodelés. Les raisons de ces différences sont sans doute liées au contact ou à la proximité entre le système racinaire des végétaux et les sédiments plus contaminés du Quai Noël.
- L'analyse de la dynamique végétale et de la phénologie des espèces présentes montrent l'établissement d'une colonisation naturelle sur les ouvrages, avec un niveau d'enracinement tout à fait satisfaisant pour stabiliser les ouvrages.
- Le suivi de la végétalisation des essais sur sédiments bruts a montré une dynamique de colonisation des semences et une reprise de croissance des boutures. En revanche, les témoins exempts de semences et de boutures ne présentent pas de végétation spontanée.
- Les résultats encourageants de la colonisation des végétaux sur les sédiments bruts sont très certainement liés au fait que les casiers ont été quotidiennement arrosés, ce qui a favorisé la croissance des végétaux et a peut-être participé à la diminution de la teneur en sel.

- Les résultats de végétalisation de ces essais permettent de conclure qu'il est possible de végétaliser directement des ouvrages sans ajout d'une terre arable. Cependant, il convient de procéder à l'ensemencement des sédiments et de pourvoir à un apport régulier en eau.
- L'utilisation d'une terre arable permet de s'affranchir (au moins pour la première année et certainement pour les 2 à 5 années à venir) d'un ensemencement ou encore de la plantation de végétaux. Il permet aussi d'éviter, au moins en partie, un apport régulier en eau par le gestionnaire de l'ouvrage.
- En revanche, en l'état actuel des observations et de nos connaissances, il n'est pas certain que la dynamique observée sur les écomodelés paysagers Quai Noël Modifié et Quai Corse se poursuivra à l'avenir en raison de la présence de chlorures et d'éléments toxiques dans les sédiments et de leur probable migration dans la terre arable, ou encore en raison du contact entre ces sédiments et les systèmes racinaires des végétaux qui ne sont pas ou très peu halotolérants.

Figure 37 : Casiers pour les tests de végétalisation des sédiments bruts

Figure 38 : Évolution de la végétalisation spontanée sur les prototypes écomodelés

IV.2 - Essais de valorisation en génie civil : Prototypes Béton

Les sédiments marins à dominante sableuse peuvent, suite à des procédés de séparation granulométrique (tel que le criblage) et de lavage (pour le retrait des sels), être employés dans le cadre de la constitution de blocs béton utilisables notamment dans les travaux maritimes.

Dans le cadre du projet SEDIMED, la société ENVISAN a entrepris la fabrication de six blocs béton composés en partie de sédiments dragués issus de la Rade de Toulon. Les sédiments utilisés sont ceux du Quai Noël Modifié (QNM) présentant une granulométrie fine et ceux du Port Saint-Louis du Mourillon (PSL) plutôt sableux. Avec chacun de ces sédiments, deux blocs béton d'un volume unitaire d'environ 500 litres ont été coulés ; 2 autres blocs de béton sans sédiment ont également été élaborés pour servir de témoins.

Les constituants majeurs dans le béton sont le sable, le gravier, l'eau et le ciment. L'introduction de sédiment dans les formulations vise à substituer une partie du sable classiquement utilisé.

Les sédiments utilisés ont représenté respectivement 5% (sédiment QNM) et 21% (sédiment PSL) de la masse totale du béton. Ceci correspond respectivement à 13% et 56% du sable qui a été remplacé par des sédiments.

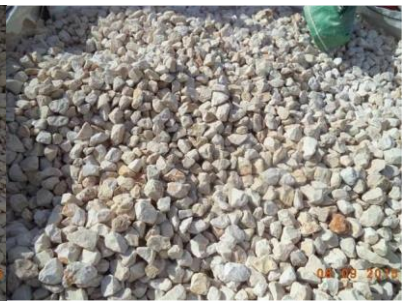
A. Conception des plots béton

Précisons, qu'avant la fabrication *in-situ* des blocs béton, des tests en laboratoire avaient été entrepris pour déterminer les formulations les plus performantes à mettre en œuvre.

Le matériel le plus fin utilisé a été le sable qui possédait une granulométrie comprise entre 0 et 4mm. Deux types de gravier ont été utilisés, un avec une granulométrie comprise entre 6,3 et 11mm et un avec une granulométrie comprise entre 11,2 et 22,4mm.

Sable (0/4mm)

Gravier (6,3/11mm)



Gravier (11,2/22,4mm)

Le ciment utilisé a été du ciment Portland, type CEM I, 52,5N, PM-CP2. Ce type de ciment a des bonnes caractéristiques pour être utilisé dans un environnement marin. Il est certifié selon les normes NF P 15-317 et NF P 15-318.

Le sédiment originaire du Port Saint-Louis, utilisé dans les formulations béton, est un sédiment plutôt sableux avec peu de matière organique (principalement des fibres de posidonies), des coquillages et quelques macros déchets. Le sédiment originaire du Quai Noël est un sédiment plus fin avec une teneur en matière organique très élevée (>20%) qui forme des agglomérats après lagunage.

Pour améliorer la faisabilité de l'emploi des sédiments dans les formulations béton, le sédiment du Quai Noël a été déshydraté par ajout de 5% de ciment Ali-pré puis criblé à 4mm ; le sédiment du Port Saint Louis, suffisamment sableux, a uniquement été criblé à 4mm pour éliminer les débris coquillers et organiques.

Pour la fabrication des 3 types de béton, les quantités de matériaux mis en œuvre sont indiquées dans le tableau suivant :

Tableau 15 : Quantités de matériaux mises en œuvre dans les blocs béton

	REF (référence) (kg sec/m³)	PSL (kg sec/m³)	QN (kg sec/m³)
Sable 0-4	888	389	770
Gravier 6,3-16	288	288	288
Gravier 11,2-22,4	578	578	578
Ciment	380	380	380
Sédiment	0	499	118
Adjuvant	3,8	3,8	3,8
Eau	177	218	218

Des coffrages en bois ont été spécialement conçus pour élaborer les blocs, munis de crochet (pour pouvoir lever les blocs avec une grue) auquel a été accroché une armature acier pour renforcer le béton. Les coffrages ont été huilés avec une huile de décoffrage.

Figure 39 : Coffrage bois équipé de l'armature acier, du crochet et renforcé par des madriers

Pour chaque coulage, toutes les fractions granulaires ont été pesées au préalable dans des big bags avec un crochet de pesage.

Pour la production du béton, les deux fractions de gravier ont été mélangées avec un tiers du volume d'eau et le ciment. Ensuite, le sable et le sédiment ont été ajoutés avec la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une bonne consistance. Puis, le béton a été malaxé pour obtenir un mélange homogène. Une bétonneuse d'une capacité de 350L a été utilisée.

Après le malaxage, le béton est coulé dans les coffrages puis vibré pour supprimer les bulles d'air présentes (voir photos suivantes). Avant d'être recouvert, le béton est nivelé avec une truelle à plâtre.

Après coulage des bétons, les coffrages ont été recouverts avec du plastique pendant les premières 24 heures pour limiter l'évaporation.

Le décoffrage n'a été effectué qu'après 7 jours de prise.

Figure 40 : Les 6 blocs béton décoffrés

Pendant le coulage du béton des éprouvettes cylindriques (11*22mm en carton) ont également été coulées en parallèle pour être conservées en laboratoire et permettre les mesures, à 28 jours et plus, des résistances à la compression (selon NF EN 12390-3) et à la traction par fendage (NF EN 12390-6). Pour chaque type de béton, 3 éprouvettes ont ainsi été produites pour être testées.

Figure 41 : Eprouvettes cylindriques pour mesure des résistances mécaniques

B. Suivis réalisés et résultats obtenus

Les 6 plots élaborés ont fait l'objet d'un suivi environnemental et géotechnique de septembre 2015 à septembre 2016.

- <u>Suivi géotechnique</u> :

Le suivi géotechnique mis en place (par CEREMA et ENVISAN) a consisté à mesurer (sur les éprouvettes constituées) l'évolution dans le temps (28 et 90 jours) des résistances à la compression (selon NF EN 12390-3) et à la traction (selon NF EN 12390-6) des bétons formulés à base de sédiment afin de les comparer aux résistances atteintes par le béton de référence.

Des carottages *in-situ* des ouvrages béton ont également été réalisés en fin de suivi pour mesurer les résistances mécaniques atteintes et pour les comparer aux résultats obtenus en laboratoire sur éprouvettes conservées en conditions normées (NF EN 12390-2). Cette démarche a permis de mesurer l'impact des conditions climatiques sur les performances des ouvrages béton exposés. D'autre part, un scléromètre (Figure 42) a également été utilisé *in-situ* pour évaluer qualitativement la dureté des blocs béton et déterminer son évolution au cours du suivi.

Figure 42 : Photo du scléromètre utilisé

Enfin, pour appréhender la durabilité des ouvrages béton réalisés, elle-même liée à la composition des bétons et aux conditions d'utilisation, et conclure quant à la faisabilité d'introduction de sédiment dans les formulations, des tests de vieillissement accélérés ont été programmés.

Ces tests permettent d'étudier, de façon anticipée, les principales réactions qui pourraient se dérouler dans le béton et qui provoqueraient sa détérioration (ex. gonflement, fissuration, etc.) et/ou une baisse de ses propriétés mécaniques. L'approche mise en œuvre ici respecte l'approche dite « performantielle » décrite dans la norme NF EN 2016-1, où l'évaluation de la durabilité des bétons est effectuée en considérant, non pas les seules données liées à leurs formulations (telles qu'indiquées dans les approches « prescriptive » et de « performance équivalente »), mais également des stipulations en termes de résultats et donc de performances du matériau, indicatrices de sa durabilité.

Le programme d'essais réalisé sur les éprouvettes coulées en même temps que les blocs et sur les carottages prélevés *in-situ* a donc consisté à :

- Déterminer la résistance mécanique à 28 et 90 jours
- Déterminer la porosité accessible à l'eau
- Evaluer la profondeur de pénétration des ions chlorures
- Evaluer le risque d'alcali-réaction
- Evaluer le risque de réaction sulfatique interne

Résultats du suivi géotechnique :

- L'étude des caractéristiques chimiques du sable et des sédiments utilisés (voir tableau suivant) a révélé que le sédiment Quai Noël présentait des caractéristiques non conformes aux exigences requises pour les granulats pour béton. En particulier, la teneur en matière organique, déterminée par calcination à 480°C, était excessivement élevée (24,2%).

Tableau 16 : Caractéristiques chimiques du sable et des sédiments

	Sable calcaire	PSL	QN
Soufre total (%)	0,04	0,11	1,56
Sulfates solubles dans l'acide (%)	- -	0,16	2,61
Chlorures solubles dans l'eau (%)	< 0,001	0,42	0,53
Teneur potentielle en matières humiques (visuel)	Négatif	Négatif	Positif
Teneur en Na_2O libérable (mg/kg)	1	379	3453
Teneur en K_2O libérable (mg/kg)	1	28	277
Equivalents Na_2O libérables (%)	0,0002	0,040	0,364
Perte au feu à 480 °C (%)	- -	2,2	**24,2**

- *Résistance mécanique à 28 jours et 90 jours* :

A 28 jours, les performances du béton QNM étaient assez élevées (Rc = 39.3MPa et Rtb = 3MPa), et le béton PSL a montré des valeurs comparables à celles obtenues sur le témoin (Rc >50Mpa et Rtb > 3.5MPa). Ces résultats sont à coupler avec la plus faible teneur en matière organique du sédiment PSL qui favorise la prise du béton et également à la porosité plus faible du témoin et de PSL (liée à sa granulométrie plus sableuse) qui permettent d'obtenir des résistances mécaniques plus élevées.

Une chute des valeurs de la résistance à la compression a été observée pour PSL et QNM à 90 jours, particulièrement marquée pour PSL. Cet écart peut être imputable notamment au mode de confection des éprouvettes, réalisée à partir de béton de gâchées différentes. Le suivi réalisé n'a pas permis de mettre en évidence un autre phénomène qui puisse expliquer cette évolution de la résistance à la compression.

- *Porosité accessible à l'eau (*selon norme NF EN 18-459*) :*

Les valeurs moyennes déterminées (PSL : 14.4% ; QNM : 15.6% ; Témoin : 12%) se sont révélées un peu élevées pour des ouvrages d'art exposés aux sels (embruns, zone côtière) tels que peuvent l'être les plots béton sur la plateforme. Le guide LCPC « Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton - Application de l'approche performantielle (LCPC, 2010) » spécifie une valeur inférieure à 11% pour les ouvrages d'art soumis à ce type d'exposition, 13% lorsque l'ouvrage est à au moins 100 m de la côte (pour une utilisation de l'ouvrage d'art pendant 100 ans). Il est tout de même important de préciser que les bétons mis en œuvre n'étaient pas destinés à un tel usage et que par conséquent les formulations réalisées n'avaient pas été optimisées dans ce sens.

- *Evaluation de la pénétration des chlorures (risque de corrosion des armatures)*

La valeur maximale spécifiée pour du béton armé est de 0,40 % de la masse de ciment, ce qui correspond à une concentration [Cl^-] inférieure à 0,06%. Cette spécification a été respectée pour tous les plots béton élaborés. Le béton PSL avait une teneur en chlorures supérieure à celui du QNM, lié à son taux d'incorporation plus élevé qui logiquement aboutit à une concentration en chlorures supérieure.

- *Absorption d'eau par capillarité*

Les valeurs obtenues pour le témoin ont été celles classiquement observées ; une augmentation de l'absorption capillaire pour les bétons avec sédiments a été constatée, mais dans une gamme qui reste conforme aux recommandations.

- *Evaluation du risque d'alcali-réaction*

L'évaluation du risque d'alcali-réaction a été effectuée en 1ère approche par la réalisation du bilan des alcalins actifs à partir des caractéristiques chimiques des constituants présents dans chacune des formulations.

Les dosages réalisés ont révélé des teneurs en alcalins actifs comprises entre 2.6 kg/m^3 pour le béton témoin sans sédiment et 2.8 kg/m^3 pour le béton élaboré avec le sédiment PSL.

Ces compositions sont acceptables pour un niveau de prévention B qui correspond à des bétons pour ouvrages courants soumis à une exposition telle que sur la plateforme du CPEM (environnement marin).

- *Evaluation du risque de réaction sulfatique interne (RSI)*

L'utilisation de sédiments a impliqué un ajout d'eau supérieur (donc une augmentation du rapport Eeff/Ceq) qui a provoqué une élévation de la température lors de la prise (meilleure hydratation du liant) donc une sensibilité plus forte à la RSI.

Il a cependant été noté peu de différence entre les compositions avec/sans sédiment. Par ailleurs, la géométrie massive des plots (parallélépipède) utilisés pour l'évaluation induit à cœur des températures élevées. Une géométrie plus élancée permettrait de réduire cette température à cœur du prototype et permettrait de réduire le risque de réaction sulfatique interne.

Le suivi géotechnique mené sur les blocs béton à base de sédiments marins a permis de conclure que les performances mécaniques atteintes et leur durabilité, après 1 an de suivi, étaient tout à fait satisfaisantes pour valider cette voie de valorisation.

- <u>Suivi environnemental</u> :

Le suivi environnemental sur une année des plots béton a consisté à analyser les eaux de pluie en contact avec les blocs (*i.e.* eaux de ruissèlement et de percolation) pour déterminer si un relargage de contaminants vers le milieu extérieur s'opérait. Pour cela les blocs ont été placés dans des bacs étanches (Figure 43) permettant la réception et le stockage des eaux de pluie.

Après chaque épisode pluvieux, les volumes d'eau accumulés dans les bacs ont été vidés en intégralité de manière à être quantifiés, puis les échantillons destinés à l'analyse ont été conditionnés et expédiés au laboratoire mandaté. Les résultats analytiques obtenus ont ensuite été interprétés (par comparaison du relargage entre plots, évolution dans le temps du relargage, comparaison par rapport aux seuils de rejets autorisés, etc.) pour tirer des conclusions opérationnelles.

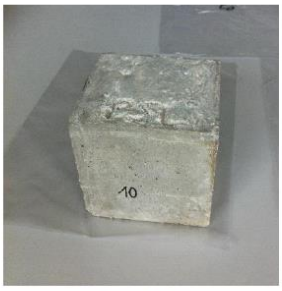
Figure 43 : Blocs en béton positionnés dans le dispositif de suivi

Les analyses réalisées sur les prélèvements effectués étaient les suivantes :

- 12 métaux du guide Sétra : As, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn
- 3 anions du guide Sétra : fluorures, chlorures, sulfates
- Indice Phénol
- 3 polluants émergents dont la présence avait été identifiée dans les sédiments : Monobutylétain cation (MBT), tributylétain cation (TBT) et diéthylhexylphtalate (DEHP)

Pour faciliter l'interprétation des résultats obtenus, une caractérisation initiale des plots béton a été réalisée. Cette caractérisation a été reproduite à l'identique en fin de suivi pour évaluer les éventuelles modifications. Ces caractérisations initiales et finales ont consisté à déterminer le contenu total (sur brut) et lixiviable (sur éluât, après lixiviation) des échantillons de béton à partir de blocs miniatures réalisés de manière similaire aux blocs réalisés pour le suivi pour la caractérisation initiale, et à partir de fragments de plots béton prélevés le 05/10/2016 en fin de suivi (cf. photos suivantes).

Les analyses réalisées sur ces échantillons sont les mêmes que celles réalisées sur les eaux, auxquelles ont été ajoutées le dosage des HAP (sur brut et sur éluât), des BTEX (sur brut), des HCT (sur brut), des PCB (sur brut), des dioxines et furanes (sur brut).



Bloc PSL

Bloc QN

Bloc témoin

Résultats du suivi environnemental :

Les suivis réalisés sur les plots béton ont permis de tirer les principaux enseignements suivants :

- Les teneurs mesurées dans les eaux en contact avec les blocs sont demeurées inférieures aux seuils de potabilisation pourtant très restrictifs utilisés dans le cadre de cette étude
- Le risque environnemental lié à la valorisation en ouvrages béton est apparu comme négligeable
- La modification de la géochimie des éléments liée à l'évolution du pH par ajout de ciment reste néanmoins un point à surveiller

Par conséquent, comme ce qui a été conclu pour le suivi géotechnique, le suivi environnemental réalisé sur les blocs béton a permis de démontrer la faisabilité de cette voie de valorisation pour les sédiments de dragage étudiés.

V. RETOMBEES DU PROJET SEDIMED

Les résultats obtenus par le projet SEDIMED concernant les évaluations de niveau 3 des prototypes : Route, Ecomodelés - Lysimètres et Béton ont permis de tirer les enseignements techniques suivants :

- Les bilans hydriques mesurés pendant l'année du suivi ont révélé que seule l'utilisation des casiers lysimétriques avait permis d'atteindre les rapports L/S cumulés de 0,1 L/kg recommandés par le guide « Aide à la mise en œuvre du niveau 3 de caractérisation environnementale »
- L'évaluation environnementale de niveau 3 des lysimètres élaborés à partir des sédiments QC et QNM en usage non revêtu non recouvert a indiqué que les seuls dépassements observés concernaient les chlorures et sulfates à la fois pour les émissions globales et pour les concentrations maximales admissibles.
- L'évaluation environnementale de niveau 3 des plots routiers a démontré que seul l'ouvrage élaboré avec le sédiment du QNM présentait des dépassements des valeurs limites associées aux chlorures en scénario revêtu. Aucun dépassement des valeurs maximales autorisées (issues du guide de niveau 3 ou proposées dans le cadre de l'étude) n'a été relevé.
- L'évaluation environnementale de niveau 3 des plots écomodelés (usage recouvert) a indiqué que seuls les chlorures et les sulfates étaient problématiques à la fois au niveau de l'acceptabilité des émissions globales que des valeurs maximales autorisées.
- Après 1 an de mise en œuvre, les matériaux routiers traités à base de sédiments (30%), ont permis d'atteindre des performances mécaniques acceptables pour des chaussées faiblement à moyennement circulées ; le comportement des matériaux avec sédiment a été similaire à celui à base de matériau de carrière et a démontré une très bonne stabilité des ouvrages (la teneur en matière organique étant un paramètre pertinent à suivre du fait de son influence sur le temps de prise des produits).
- Le suivi géotechnique des écomodelés (via des relevés topographiques périodiques) a démontré que cette voie de valorisation était bien adaptée aux sédiments étudiés qui, sur la durée du suivi réalisé, se sont mieux comportés que les matériaux témoins utilisés en présentant un tassement et une évolution structurelle moindres.
- Le suivi de la végétalisation spontanée des écomodelés réalisé a permis de conclure qu'une dynamique positive naturelle de colonisation des végétaux s'opérait à partir de la terre végétale (39 espèces répertoriées) qui permettait de consolider la structure des ouvrages en les protégeant de l'érosion.

- Les teneurs mesurées dans les eaux en contact avec les blocs béton sont demeurées inférieures aux seuils de potabilisation très restrictifs utilisés dans le cadre de cette étude
- D'après les données de suivi récoltées, le risque environnemental lié à la valorisation des sédiments en ouvrages béton est apparu comme négligeable. La modification de la géochimie des éléments liée à l'évolution du pH par ajout de ciment étant néanmoins un point à surveiller
- Le dosage en sédiment peut/doit être ajusté en fonction des exigences de durabilité pour l'alcali-réaction, la réaction sulfatique interne et la teneur en chlorures. Une identification rigoureuse des caractéristiques chimiques de chaque sédiment est de fait indispensable.
- L'usage de sédiment dans le béton a nécessité un apport d'eau plus conséquent pour les bétons de sédiments que le béton témoin, induisant de fait des performances mécaniques moindres et une température au cours de la prise plus haute.
- Les performances atteintes par les bétons de sédiment, après 1 an de suivi géotechnique, ont été satisfaisantes et suffisantes pour les ouvrages prototypes fabriqués.

Sur un plan règlementaire, les résultats obtenus à travers SEDIMED questionnent le référentiel d'acceptabilité existant, à la fois sur les polluants à suivre (qui doivent aussi être liés au contexte local) et sur la cohérence des seuils préconisés entre les niveaux 1, 2 et 3.

La récurrence du problème posé par les anions (chlorures et sulfates) pour les deux sédiments, et, plus particulièrement, le fait que l'acceptabilité du sédiment QC était démontrée pour les usages revêtus et recouverts au niveau 2, et ne le soit plus au niveau 3, pose question.

Une réflexion devra ainsi être menée sur le plan règlementaire pour élaborer un guide spécifique[10] dédié à la valorisation des sédiments marins qui permettrait, par exemple, d'autoriser la poursuite des essais de caractérisations, même en cas de dépassements constatés aux niveaux 1 et 2, pour certains paramètres (ex. HCT, anions, etc.) afin d'aller jusqu'au niveau 3 et de pouvoir statuer sur les possibilités réelles de valorisation.

Par ailleurs, cette évolution règlementaire devra également prendre en compte l'objectif final de valorisation, en permettant par exemple des dépassements par rapport au milieu récepteur (ex. seuils plus haut en chlorures et sulfates dans le cas d'une valorisation impactant le milieu maritime).

Les travaux menés et les résultats obtenus par le projet SEDIMED ont également été mis à profit pour formuler des recommandations pour la réalisation et le suivi des prototypes expérimentaux.

[10] *Ce guide est en cours de rédaction et devait être publié par le CEREMA en fin 2020*

Ainsi, compte-tenu de la difficulté de conception et de suivi des plots liés à la valorisation en technique routière à l'échelle 1 (notamment concernant le volume d'éluats récupérés et l'atteinte d'un objectif de L/S de 0,1 L/kg en un temps raisonnable), le suivi lysimétrique semble constituer, tout du moins pour les caractéristiques environnementales, un compromis intéressant.

Leur mise en place est en particulier facilitée par leur dimension restreinte (section de 5 m²), et ce type de plots semble donc plus indiqué pour l'évaluation des usages recouverts ou non revêtus non recouverts. Cette option n'est toutefois pas envisageable pour les usages revêtus, la reproduction fidèle d'une portion de route ne pouvant être réalisée à cette échelle. Enfin, leur dimension restreinte présente l'inconvénient de n'utiliser qu'un volume limité de sédiments – on attachera donc le plus grand soin à la constitution de l'échantillon utilisé pour le remplissage de ces lysimètres, voire à dupliquer les essais si la variabilité des sédiments dragués est importante.

Dans le cas où des plots de grande échelle correspondant à un usage recouvert ou non revêtu non recouvert seraient réalisés (ex. écomodelés), un profil topologique maximisant l'infiltration d'eau sera recherché, tout en satisfaisant les contraintes géotechniques imposées, pour la stabilité notamment.

Concernant les plots routiers, le système de drainage doit permettre de reproduire au mieux les mouvements d'infiltration d'eau (notamment latéraux) observés sur un ouvrage traditionnel.

Aussi, la remontée d'une géomembrane ou de tout autre dispositif d'étanchéité sur les bords du plot n'est-elle pas recommandée. Au contraire, la réalisation de talus d'accotement et de bande dérasée conformément à la structure habituelle d'une route est recommandée (cela n'a pas pu être mis en œuvre dans le cadre de SEDIMED, faute d'espace suffisant autour du plot routier). Pour autant, c'est un enseignement de l'expérimentation réalisée.

Enfin, la conception du plot doit permettre le futur suivi géotechnique afin d'éviter l'endommagement des systèmes d'étanchéité et de récupération des eaux infiltrées et la perturbation des flux d'eau qui traversent la chaussée.

Concernant la valorisation sous forme de plots béton, il est recommandé de contrôler l'apport en eau (via un dispositif d'arrosage) pour atteindre des ratios d'exposition suffisants. Il est également conseillé de protéger les ouvrages des apports particulaires extérieurs (ex. envol de poussière) pour ne pas fausser le suivi environnemental.

Enfin, si les impacts environnementaux sur la ressource en eau des scénarios évalués semblent être relativement bien maîtrisés sur la durée des suivis ; sur le très long terme, il apparait pertinent de mettre en place des outils au niveau national pour recenser les chantiers où ont été intégrés des matériaux alternatifs, afin d'en assurer une traçabilité, et de se projeter à cette échéance dans de nouveaux scénarios d'exposition, allant au-delà de la durée de vie des ouvrages.

Sur un plan économique, il ressort qu'une incitation financière ou des recommandations pour favoriser l'emploi de matériaux alternatifs (% obligatoire de matériaux issus de la valorisation par exemple) devraient être mises en place. Ces pratiques permettraient de favoriser la valorisation des sédiments de dragage en remplacement des matières premières classiquement utilisées, cela dans une optique de développement durable et d'économie circulaire. Il apparait comme essentiel que les Maitres d'Ouvrages impulsent cette dynamique dès le démarrage de ces réflexions et du montage des dossiers administratifs.

Sur un plan pratique, le projet SEDIMED a permis la création du premier site méditerranéen dédié au traitement des terres et sédiments de dragage non-immergeables – le Centre de Production d'Eco Matériaux (CPEM) ENVISAN – et lui a fourni des éléments tangibles démontrant la faisabilité de valorisation de ces écomatériaux. Cette démarche est à mettre en avant et à développer pour inciter les gestionnaires à recourir à ces pratiques, alternatives indispensables à la mise en décharge.

VI. DIFFICULTES RENCONTREES ET RESOLUTIONS

Lors de l'élaboration et de l'exécution de cet ambitieux projet des difficultés sont apparues. L'objet de ces difficultés et les réponses apportées par le partenariat sont présentés ci-après.

VI.1 - Evolution du partenariat

Lors de l'exécution du projet, le partenariat initialement constitué a évolué. Deux acteurs industriels n'ont en effet pas poursuivi leur implication dans le projet. La question de la redistribution, au sein du partenariat, des missions qui leurs étaient affectées s'est alors posée et avec elle celle de la répartition des dépenses prévisionnelles. Le consortium a trouvé les réponses adaptées pour permettre la réalisation du projet bien que cela entraine, pour certains, une augmentation du financement sur fonds propres assez conséquente. Les enjeux en termes d'activité émergente et de marché potentiel a participé à l'identification des réponses pour les acteurs associés dans le consortium dans le cadre de leurs stratégies internes de développement.

VI.2 - Evolution du statut du site

Lors du montage du dossier du projet SEDIMED, en 2008, la règlementation encadrant la gestion à terre des sédiments non immergeables était très incomplète. La Directive Cadre sur les déchets 2008/98/CE du 19 novembre 2008 précisait que tout sédiment non immergeable devait être géré à terre et prenait alors le statut de déchet. Ce n'est que le 13 avril 2010 que le Décret n° 2010-369, modifiant la nomenclature des installations classées, introduisait une réglementation de gestion à terre des sédiments qui entraient alors dans le champ des Installations Classées pour le Protection de l'Environnement (ICPE).

Visite du site CPEM – Bassin de récupération des eaux et système de traitements avant rejet

Pour la réalisation du projet, il a alors été nécessaire de constituer un dossier d'autorisation ICPE non initialement prévu au dossier. Le dossier de demande d'autorisation a été déposé le 12 décembre 2011 par ENVISAN France auprès des services instructeurs. L'instruction de ce dossier a conduit à une enquête publique qui s'est tenue de fin mai à fin juin 2013.

Le planning prévisionnel initial a dû être adapté à la situation. Il a donc évolué tel que présenté ci-dessous (Figure 44) avec un démarrage des travaux d'aménagement du site en octobre 2013.

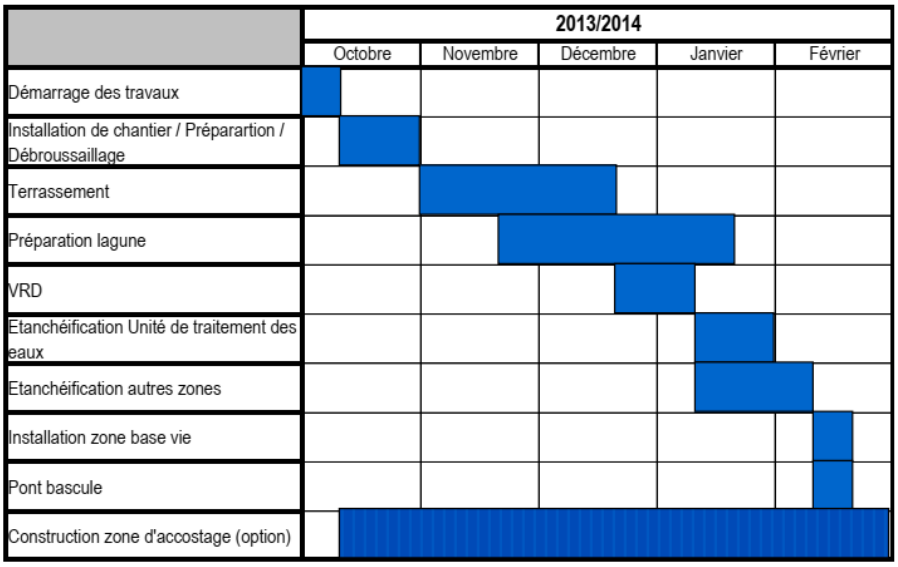


Figure 44 : Planning prévisionnel autorisation ICPE (source ENVISAN)

Ce planning, proposé à titre indicatif, était lié au délai d'instruction du dossier d'autorisation ICPE.

L'autorisation préfectorale a été finalement obtenue le 25 novembre 2013 et prévoyait le traitement annuel de 160 000 m^3 de matériaux soit 240 000 tonnes maximum.

VI.3 - Aménagement du site

Outre les contraintes temporelles et financières imposées par l'évolution réglementaire des ICPE, les études préalables à l'aménagement du site ont mis en évidence que le périmètre foncier concerné avait été gagné sur la mer et constituait ainsi une friche laissée à l'abandon. Dans ce contexte, les investissements nécessaires pour permettre de récupérer toutes les eaux de process ainsi que les outils utiles aux traitements de ces eaux ont été beaucoup plus importants que ceux initialement prévus.

La question des délais d'amortissements de ces investissements a conduit ENVISAN France à réfléchir aux diverses options envisageables. La possibilité d'occupation du site sur un délai cohérent avec les amortissements de l'investissement a été proposée. Les autorités compétentes ont accordé cette autorisation d'occupation temporaire et ont ainsi permis la réalisation des installations industrielles utiles à la réalisation du projet SEDIMED.

Cette autorisation a de plus permis à ENVISAN France d'envisager un projet sur le moyen terme en proposant la réalisation du Centre de Production d'Eco Matériaux (CPEM) en capacité d'accueillir des sédiments et terres non dangereux.

Visite du site CPEM – Système de traitements des eaux récupérées sur la surface étanche du site

VI.4 - Prototypes mis en œuvre

Les prototypes prévus au projet SEDIMED étaient les suivants :

- Ouvrages terrestres échelle 1 : écomodelés paysagers, route, remblaiement de carrière, valorisation de la fraction fine en cimenterie
- Ouvrages maritimes échelle 1 : Berges en enrochements, blocs béton

Figure 45 : Ouvrage prototype : Ecomodelé paysager

Les retards subis dans la fourniture des sédiments et le fait que les quantités finalement disponibles ont été plus faibles qu'ambitionnées, un choix a été opéré par les partenaires pour définir les prototypes terrestres mis en œuvre et étudiés. Ainsi, les travaux se sont concentrés sur l'analyse des possibilités de valorisation des sédiments en technique routière, via l'élaboration et le suivi de matériaux routiers et d'écomodelés paysagers ; et en génie civil via la fabrication et le suivi de blocs béton (non-armés).

Concernant les essais de valorisation des sédiments en ouvrage maritime, en particulier via la création prévue d'une berge maritime en bordure du site Envisan, une pré-étude de faisabilité a conclu à une portance trop faible du fond pour autoriser la mise en œuvre de la berge. Les travaux d'aménagement du site receveur auraient nécessité un investissement financier conséquent et surtout non-prévu au plan de financement du projet pour permettre la réalisation de l'ouvrage. Ces éléments nouveaux ont donc conduit à l'abandon des essais liés à cette piste de valorisation.

VII - De SEDIMED au CPEM

Le projet SEDIMED devait initialement s'exécuter en 4 années de 2010 à 2013. Les divers aléas rencontrés ont conduit ENVISAN France à monter un dossier ICPE fin 2011 dont l'objet était la création d'un site industriel en capacité d'accueillir les expérimentations prévues dans le cadre du projet mais également de poursuivre l'activité de gestion à terre des sédiments durant 16 années supplémentaires afin de pouvoir réaliser les amortissements en lien avec l'investissement à effectuer pour l'aménagement du site industriel. L'arrêté préfectoral d'exploitation n'a été délivré que le 28 novembre 2013.

Dans ce contexte, les plans du site ont évolué et sont devenus conformes au schéma ci-dessous :

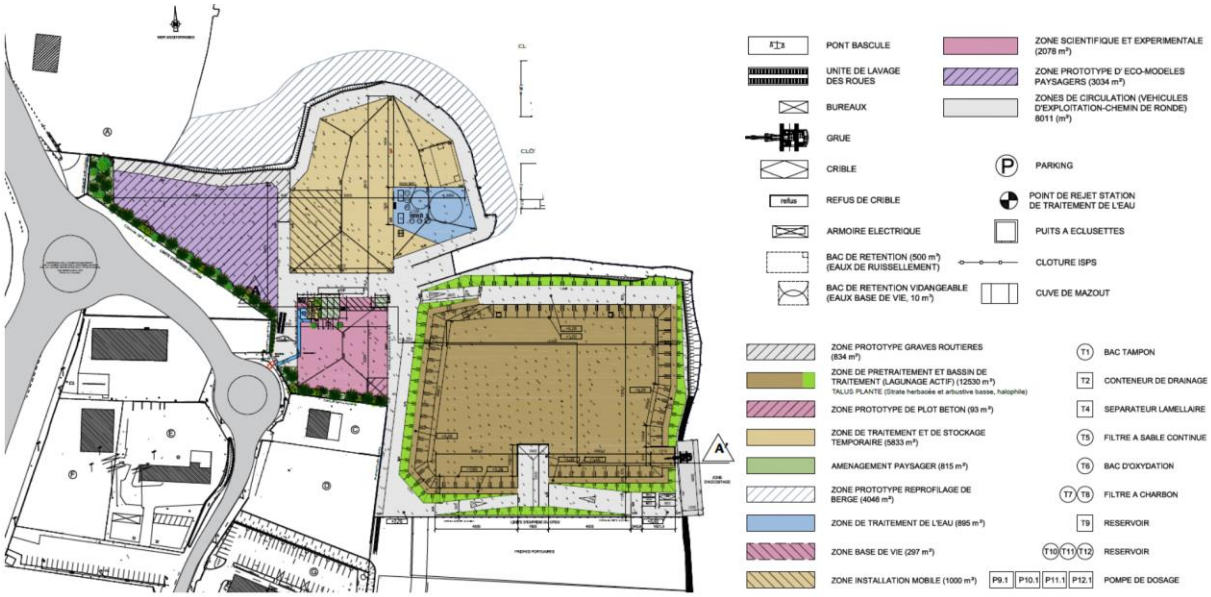


Figure 46 : Plan masse final du projet SEDIMED (source ENVISAN)

Le bassin de lagunage actif / bioremédiation a été placé en bordure afin de faciliter le possible rechargement par voie maritime et limiter ainsi les transports par voie terrestres jugés trop impactants en termes environnemental et de nuisances pour les riverains. En haut se trouve la zone prévue pour les pré-traitements et traitements des sédiments (en marron clair) ainsi que les zones de stockage temporaire et de traitement des eaux (en bleu clair). Les prototypes expérimentaux ont été positionnés sur les parties violettes (route et écomodelés) et rose (blocs béton). La partie centrale (en rose) accueille les bureaux administratifs et un espace dédié à la R&D qui permet aux scientifiques qui en font la demande de bénéficier d'un espace sur un site industriel pour réaliser des démonstrateurs de recherche. Ainsi, après un projet de recherche et développement, la production de données scientifiques utiles à l'avancée des connaissances sur les thèmes du dragage, du traitement et de la valorisation des sédiments permettant de sécuriser la gestion et de fournir les données nécessaires à l'encadrement réglementaire sont possibles sur le site industriel. Il s'agit là d'une véritable spécificité innovante et unique en France qu'il convient de souligner.

Un espace dédié à la recherche publique a été aménagé au cœur du site industriel

L'inauguration du CPEM s'est tenue le 24 septembre 2015 en présence des partenaires et des acteurs politiques, institutionnels civils et militaires, des partenaires financiers et des acteurs économiques locaux.

Le centre a la capacité d'accueillir des terres et sédiments contaminés (classés comme déchets non dangereux) et de les traiter en vue de leur réutilisation. La totalité de la surface du centre a été imperméabilisée afin de récupérer toutes les eaux issues des traitements et de surface et de les traiter avant rejet. Après quelques mois d'activité, les outils en place ont été complétés afin d'améliorer les capacités de pré-traitement et de traitement du CPEM. La quantité annuelle de déchets pouvant être traitée par l'installation est limitée par arrêté préfectoral à 240 000 tonnes/an.

VIII - CONCLUSION GENERALE

Le projet FUI SEDIMED a été une aventure humaine et technique hors normes.

Il a été initié dans un but clair : faire émerger des filières terrestres de gestion des sédiments marins non immergeables, opérationnelles, locales et économiques, conformes à la politique communautaire du développement durable. Au-delà de cela, il a participé aussi à compléter les référentiels existants, à alimenter les connaissances scientifiques par la production de données sur le potentiel d'émission de polluants par la matrice sédimentaire dans des situations de valorisation à terre.

Ce projet a pu naître par l'effet combiné de plusieurs forces. Notamment le 8ème appel à projets du FUI (Fonds Unique Interministériel) qui eut pour objectif d'évaluer des filières de gestion à terre de sédiments marins.

Ce projet rassemblait plusieurs partenaires :

- ENVISAN FRANCE, coordinateur du projet
- l'INERIS, le CEREMA (ex. CETE), l'IMT LD (ex. EMD) et ARMINES, partenaires scientifiques
- COLAS, ERG et NEO SUD, partenaires industriels (ou sous-traitants privés)

La mise en commun de l'ensemble de leurs compétences a conduit au succès de SEDIMED.

Comme présenté dans cet ouvrage, trois sédiments de la rade de Toulon ont été étudiés exhaustivement. Ces matériaux ont été, par la suite, valorisés comme matières premières secondaires pour la réalisation d'ouvrages à échelle 1.

Trois sédiments originaires de la rade de Toulon ont été employés : le sédiment fin et contaminé du Quai Noël de la Base Navale de Toulon (QN) ; le sédiment plus grossier et moins contaminé du Quai de Corse du port de Toulon Côte d'Azur (QC) ; le sédiment sableux et faiblement contaminé du Port Saint-Louis du Mourillon (PSL). Pour chaque série de prototypes réalisée, un ouvrage témoin sans sédiment a été mis en œuvre et suivi selon les mêmes procédures que les prototypes intégrant du sédiment dans le but de déterminer les différences comportementales éventuelles.

Dans l'optique de tester et valider les filières envisagées, et suite à l'évolution règlementaire encadrant les ICPE, le projet a évolué vers la construction d'une plateforme industrielle : le Centre de Production d'Eco Matériaux (CPEM) géré par ENVISAN à la Seyne-sur-Mer. Les prototypes expérimentaux ont été réalisés sur l'installation du CPEM et leurs suivis ont été effectués grâce à des infrastructures dédiées, une expertise et une technologie maitrisée. L'étude et le suivi physico-chimique, géotechnique et environnemental a permis d'optimiser l'utilisation des sédiments, mais aussi la performance des ouvrages réalisés.

Pour ce qui est des prototypes :

Trois types de prototypes intégrant des sédiments marins méditerranéens présentant des caractéristiques physico-chimiques contrastées ont ainsi été mis en œuvre : des écomodelés paysagers (dosage en sédiments : 100%) ; des plots route (dosage en sédiments : 30%) ; des plots béton (dosage en sédiments : 5 et 21%).

Pour étudier la faisabilité de valorisation de ces sédiments, l'évolution des prototypes sur les plans géotechnique et environnemental a été suivie sur une période suffisamment longue pour obtenir des conclusions opérationnelles, à savoir une année.

Pour cela, une méthodologie et des techniques innovantes mises en œuvre ont permis de développer des matériaux performants, de concevoir et réaliser des ouvrages dont le suivi sur une période représentative, aura conduit à obtenir des conclusions très encourageantes, sinon satisfaisantes.

Ces travaux étant totalement novateurs, il aura fallu l'implication intense de chacun des acteurs et une grande synergie durant toutes les étapes du projet pour passer du stade développement à la réalisation concrète. Cette synergie s'est également opérée en parfaite coordination avec tous les intervenants financeurs, scientifiques et techniques partenaires.

ANNEXE : CHARTE CADRE DES DRAGAGES PORTUAIRES DANS LE DÉPARTEMENT DU VAR

CHARTE CADRE

Dragages portuaires et environnement dans le département du Var

Plan de gestion des vases portuaires respectueux de l'environnement dans le Var

« Lorsque la gestion des opérations de dragage est faite dans des conditions qui tiennent compte des bonnes méthodes environnementales, elle exige une stratégie pluridisciplinaire ainsi que l'intégration des informations issues des observations sur le terrain, des analyses de laboratoire et des techniciens de dragage. »
CONCLUSION N° 1 DU SÉMINAIRE DRAGAGES - NANTES 1989

« Les impacts environnementaux ne pouvant être évités, il est important d'évaluer et comparer les avantages des opérations de dragage prévues, tels qu'ils sont perçus, aux conséquences prévisibles sur l'environnement. Ceci permettra de justifier chacune des opérations sur la base d'un bilan attentif des facteurs environnementaux, sociaux et économiques »
CONCLUSION N° 3 DU SÉMINAIRE DRAGAGES - NANTES 1989

« À long terme, le problème des sédiments gravement pollués ne peut être résolu que par la suppression des polluants à la source.... »
CONCLUSION N° 10 DU SÉMINAIRE DRAGAGES - NANTES 1989

« Lorsqu'il existe un doute sérieux sur l'acceptabilité environnementale des options d'élimination qui existent en milieu aquatique, il conviendrait de procéder à une comparaison approfondie des impacts environnementaux en milieu aquatique à ceux des alternatives à terre. »
CONCLUSION N° 11 DU SÉMINAIRE DRAGAGES - NANTES 1989

Entre les signataires de la charte, il a été préalablement exposé ce qui suit :

Exposé des motifs

Le dragage maritime recouvre divers aspects. Dans les zones portuaires, il vise soit à rétablir la cote d'exploitation des chenaux et des bassins existants pour permettre la navigation des navires (dragages d'entretien), soit creuser des chenaux ou des bassins pour des aménagements nouveaux (travaux d'infrastructures nouvelles). Ainsi, les dragages présentent principalement une dimension économique pour le développement et le maintien des activités portuaires.

Les pratiques de dragages consistaient encore récemment à charger dans des barges les déblais indésirables obstruant les chenaux et limitant la profondeur des bassins puis à les clapper au large, suffisamment loin des côtes. Les analyses relatives à la qualité des matériaux restaient succinctes, limitées à des considérations granulométriques nécessaires au chantier. Les préoccupations environnementales étaient secondaires.

Les ports constituent des plans d'eau calmes propices à une sédimentation accrue de particules fines. De plus, les eaux des ports de part leurs propres activités et leur situation urbaine ou la proximité des sites industriels côtiers constituent le réceptacle final des divers rejets côtiers apportés par les pluviaux après lessivages des bassins-versants. Les contaminants, adsorbés aux particules fines, sont ainsi piégés de façon préférentielle dans les sédiments portuaires.

Le contexte des ports méditerranéens ne génère pas de sédimentations importantes d'où une faible fréquence de dragages d'entretien mais de fortes concentrations en contaminants. Les dragages constituent ainsi une source non négligeable de contamination des eaux côtières pouvant affecter durablement les écosystèmes côtiers. Les impacts des dragages et des clapages sont multiples sur l'environnement. Les concentrations en contaminants constituent le point le plus préoccupant.

La réglementation restée longtemps peu précise sur la question des rejets de dragages a récemment fait l'objet d'une réactualisation (voir annexe), permettant l'élaboration de démarches opérationnelles constructives.

Les gestionnaires portuaires et partenaires souhaitent mettre en place un plan de gestion des vases portuaires respectueux de l'environnement et favorisant la recherche de solutions nouvelles par la réalisation de pilote de traitement. Les grands principes de cet accord sont rassemblés dans cette présente charte cadre.

ARTICLE 1 - Objet de la charte cadre

La présente charte a pour objet de définir un cadre favorable pour la réalisation de partenariats techniques et financiers entre les différents signataires dans le but de développer des projets réduisant les impacts environnementaux des opérations de dragages.

1.1 - Objectifs généraux

L'objectif de la démarche est d'aboutir **à un plan de gestion des vases portuaires** pour le département du Var, concret et opérationnel, intégrant, à tout niveau, des démarches de protection de l'environnement.

1.2 - Objectifs pratiques

Pris entre le développement économique des activités portuaires, les impératifs de maintien de pied de pilote dans les chenaux et les bassins portuaires et la préservation de l'environnement marin, les gestionnaires portuaires sont tenus de développer des outils de gestion et de traitement des problèmes d'évacuation des déblais de dragages et de contamination des vases.

L'élaboration d'un plan de gestion des vases portuaires commun à l'ensemble des gestionnaires portuaires doit :

- permettre la reprise des opérations de dragage à moyen terme pour répondre aux nécessités de profondeur des plans d'eau tout en proposant des garanties environnementales dans le respect de la réglementation,
- s'intégrer dans les logiques amont de réduction des apports en contaminants tels que le Contrat de Baie de la rade de Toulon ou la Convention cadre pour l'amélioration de la qualité environnementale des ports de la région PACA,
- favoriser et promouvoir le montage d'expérimentations pilotes pour tester des techniques de réduction des impacts des dragages ou d'extraction des contaminants directement à l'occasion des prochains dragages réalisés,
- permettre d'initier la création d'un centre de traitement des déblais de dragages ainsi qu'un pilote pour tester divers procédés mis en œuvre sur site pour élaborer ce centre,
- proposer un code de bonnes pratiques aux gestionnaires confrontés à cette problématique des vases contaminées,
- mobiliser des financements pour mener les opérations pilotes et les études nécessaires.

ARTICLE 2 - Les engagements des partenaires

Pour atteindre les objectifs développés dans l'article 1, les partenaires signataires de cette charte cadre s'engagent à :

- **développer** des échanges d'expériences en participant activement au sein de la commission thématique « gestion des vases portuaires » du Comité de baie de la rade de Toulon,
- **appliquer** un code de bonnes pratiques pour toutes les opérations de dragage dont ils seront gestionnaires afin de limiter les impacts sur l'environnement depuis l'extraction

des sédiments jusqu'au rejet ou stockage définitif des déblais,
- **privilégier** la réalisation d'opérations innovantes dites « pilotes » afin de tester le caractère opérationnel de nouvelles techniques pour limiter les impacts, et les immersions de polluants, ou extraire les contaminants contenus dans les déblais de dragages,
- **adopter** une démarche préventive à long terme en supprimant à la source l'introduction des contaminants vers les bassins portuaires.

Et plus globalement, afin de garantir la cohérence et la qualité de leur démarche, les signataires de la présente charte s'engagent à respecter et à faire respecter les principes développés dans la présente charte cadre.

ARTICLE 3 - Composition et organisation

Membres de droit : gestionnaires portuaires et organisation

Ce sont les membres représentant les principaux organismes gestionnaires concernés directement par l'établissement d'un plan de gestion des vases portuaires.
L'importance des infrastructures portuaires de la rade de Toulon et le contexte du Contrat de baie intègrent également le Comité de baie dans ce groupe.

Membres partenaires : scientifiques, techniques ou financiers

Ce sont les acteurs et partenaires concernés par la question des vases portuaires, leurs gestions, leurs impacts sur l'environnement. Ces membres partenaires seront susceptibles d'apporter un soutien technique, des recommandations ou des exigences de résultats sur le plan environnemental.

Il est créé un **Comité de pilotage** composé des représentants des organismes signataires, membres de droit de la présente charte cadre. Ce comité définit les priorités et les grandes orientations de la démarche et valide les propositions techniques du groupe de travail.

Le **Groupe de travail**, «**gestion des vases portuaires**», initialement issu du Comité de baie de la rade de Toulon, servira d'organe de travail. Le rôle du groupe de travail est de préconiser des recommandations techniques à soumettre au comité de pilotage et d'assurer un suivi concerté des projets. Ce groupe de travail est composé des représentants techniques des membres signataires.

Par ailleurs, le Comité de baie, assemblée de concertation regroupant l'ensemble des partenaires et acteurs concernés par la qualité des eaux de la rade, aura un rôle de suivi de la démarche globale et devra l'intégrer totalement dans les projets et actions du Contrat de Baie de la rade de Toulon.

L'organisation des différentes réunions sera assuré conjointement par le Conseil général service des ports et la Direction du Contrat de Baie du SIAT représentant le Comité de baie de la rade de Toulon.

ARTICLE 4 - Conventions spécifiques

Cette charte cadre appellera en règle générale à une descendance de conventions spécifiques et détaillées précisant projet par projet les conditions des accords et des partenariats nécessaires.

Ces conventions spécifiques devront couvrir notamment :

1. Les partenariats techniques et financiers entre membres signataires de la présente charte en cas de participation sur des projets communs liés à la question des dragages et de leur préoccupation environnementale.

2. Les assistances financières sous forme de subventions allouées par des organismes compte tenu du caractère innovant de certains projets.

ARTICLE 5 – Durée de validité de la charte

La durée de validité de la présente charte est fixée sur la période d'application du Contrat de baie de la rade de Toulon, soit 5 ans entre 2002 et 2006.
Elle sera ensuite renouvelable par tacite reconduction ou par avenant sur proposition de l'une des parties.

ARTICLE 6 – Dénonciation

Tout signataire peut se rétracter des engagements de la présente charte pour tout motif lui appartenant. Dans un tel cas, la demande de résiliation sera accompagnée d'un exposé des motifs et sera adressée par courrier à l'ensemble des autres signataires, membres de droit.

Partenaires signataires de la charte cadre

Dragages portuaires et environnement dans le département du Var

Plan de gestion des vases portuaires respectueux de l'environnement dans le Var

à Toulon, le 25 mars 2002,

Par délégation du Président de la Chambre
de Commerce et d'Industrie du Var,
Le Vice-Président de la CCIV
Président de la Commission
des Affaires Maritimes
Jean-Michel Russo

Hubert Falco
Président du Conseil général du Var
Sénateur-Maire de Toulon

L'amiral Commandant
la zone et la région maritimes Méditerrannée,
par délégation,
Le Contre-amiral
Claude Marcus
adjoint territorial

Gil Bernardi
Président du Syndicat des Maires du Littoral
Maire du Lavandou

Gilles Vincent
Président du Comité de Baie
Maire de Saint-Mandrier