

# **La valorisation des sédiments marins dans un contexte d'économie circulaire et d'aménagement durable.**

**Dr. Pascal GREGOIRE**

Chef du Département du Management de l'Environnement

Grand Port Maritime de Dunkerque

FRANCE

[pgregoire@portdedunkerque.fr](mailto:pgregoire@portdedunkerque.fr);

## **Résumé**

Le port de Dunkerque, tel qu'il est aujourd'hui, est le résultat d'une longue évolution qui s'est déroulée par phases successives. Les derniers grands travaux portuaires remontent aux années soixante dix avec la création du port Ouest. Ces dimensions lui permettent aujourd'hui d'accueillir les plus gros navires de la flotte.

L'élaboration de son projet stratégique a été l'opportunité de faire un bilan des conséquences de ses activités sur l'environnement ayant abouti à une prise de conscience d'inscrire les activités portuaires dans la démarche du développement durable.

La résultante de cette volonté affichée s'est exprimée également au travers un Plan d'Aménagement et de Développement Durable, qui s'inscrit pleinement dans la Stratégie Nationale Française du Développement Durable.

L'une des orientations retenues a pour objet la mise en œuvre d'une économie portuaire verte et socialement responsable qui favorise l'écologie industrielle ouvrant le champ de l'économie circulaire, concept plus récent qui concerne plus particulièrement le fonctionnement des produits et services, notamment les déchets, en rompant avec une logique linéaire, en passant de la possession à l'usage.

L'étude montre que les pratiques d'écologie industrielle appliquées par les entreprises locales aboutissent à des avantages à la fois économiques, environnementaux et sociaux pour chacune d'elle. L'économie circulaire repose ainsi sur différents axes se combinant afin d'atteindre une démarche vertueuse.

L'un des exemples d'économie circulaire portuaire appréhendé par le Port de Dunkerque est la gestion des sédiments marins avec le réemploi des sédiments ayant le statut de « déchets ». C'est donc une forme de « recyclage ».

Depuis 2009, le Port de Dunkerque drague et valorise ses sédiments marins au travers de diverses filières de génie civil en intégrant la conception, des prestations de service, l'échange de matière et la production de différents ouvrages entrant dans l'aménagement du territoire portuaire.

## **Mots clés :**

Développement durable, écologie industrielle, économie circulaire, dragages, sédiments marins, valorisation, route, aménagement.

## 1. INTRODUCTION

Situé sur la Mer du Nord à 40 kilomètres de Douvres (Angleterre) et à 10 kilomètres de la frontière belge, le Grand Port Maritime de Dunkerque (GPMD), port côtier de haute mer, s'étend sur une longueur de 17 km et comporte deux entrées maritimes : l'une à l'Est, la plus ancienne limitée aux navires de 14,2 m de tirant d'eau, l'autre à l'Ouest, plus récente qui permet d'accueillir des navires jusqu'à 22 m de tirant d'eau.

Le port, tel qu'il est aujourd'hui, est le résultat d'une longue évolution qui s'est déroulée par phases successives. Les derniers grands travaux portuaires remontent aux années 1970 avec la création du port Ouest. A cette époque, la taille des navires est en croissance constante, et le dimensionnement de l'avant-port Ouest avait été pensé pour s'adapter aux besoins des prochaines décennies. Ces dimensions lui permettent encore d'accueillir les plus gros navires de la flotte mondiale avec cependant certaines contraintes d'exploitation liées aux courants de marées.

Sa configuration actuelle, et sa proximité du rail de séparation des trafics qui franchissent le détroit du Pas-de-Calais sur la route maritime la plus fréquentée du monde (600 navires par jour), lui permettent de se classer 3ème port de France et 7ème port du Range nord européen qui s'étend du Havre à Hambourg. Réputé comme port de grands vrac destinés à ses nombreuses implantations industrielles, il est le 1<sup>er</sup> port français d'importation des minerais et de charbon, 1er port français pour l'importation de fruits en conteneurs, 1er port français pour l'importation de cuivre, et 2nd port français pour les échanges avec la Grande-Bretagne. Il s'illustre également sur d'autres segments tels le roulier transmanche sur la Grande-Bretagne, les conteneurs, les fruits...

Fort de la réforme portuaire de juillet 2008 et de la résolution de maintenir sa position de port leader du marché à l'échelle nationale et à l'échelle européenne, le Port de Dunkerque a défini son projet stratégique dont l'objet était d'une part d'évaluer sa position par rapport à ses principaux concurrents, et d'autre part de déterminer le trafic maritime et la typologie du fret de demain. Enfin, il s'agissait de déterminer si la configuration actuelle du Port peut répondre à ces évolutions, moyennant quelques adaptations, ou si des nouvelles infrastructures sont nécessaires pour rester attractif et maintenir ses positions aux rangs national et européen. L'élaboration du projet stratégique a également été l'opportunité pour le Port de faire un bilan des conséquences de ses activités sur l'environnement ayant abouti une prise conscience de la nécessité d'inscrire désormais les activités portuaires dans la démarche du développement durable.

La résultante de la volonté affichée de concilier activité et aménagement portuaires, préservation de l'environnement et anticipation des orientations réglementaires à venir, s'est ensuite exprimée au travers d'un Plan d'Aménagement et de Développement Durable, dont l'objectif est d'anticiper et planifier les enjeux d'avenir pour le Port, que ce soit en termes d'orientations stratégiques pour son développement économique ou d'objectifs de gestion durable de son territoire. Ce Plan d'Aménagement, qui s'inscrit pleinement dans les Grenelles et dans la Stratégie Nationale du Développement Durable, se décline en 5 grandes orientations fondamentales visant à améliorer l'attractivité économique du territoire et la qualité de vie tout en respectant le milieu naturel. L'une de ces orientations a pour objet la « mise en œuvre d'une économie portuaire verte et socialement responsable ». Pour ce faire, 4 objectifs sont fixés, dont l'un consiste à « réduire les impacts environnementaux et développer l'écologie industrielle en visant une optimisation efficace des ressources dans une zone d'application donnée.

Cette démarche présente différents avantages :

- Pour les entreprises, en les incluant dans leurs territoires, en limitant leurs pressions et leurs impacts sur l'environnement, et en augmentant de ce fait leur rentabilité économique.
- Pour les collectivités, en leur proposant des pistes d'aménagement du territoire plus durable, basés sur leurs ressources et générateurs d'emplois locaux.
- Pour la communauté, en permettant une augmentation de la qualité de vie, la création d'emploi, l'amélioration des infrastructures à moindre coût et en limitant les impacts...
- Pour l'environnement, en réduisant les émissions polluantes, la consommation d'énergie et la pression sur les ressources non renouvelables.

L'Écologie Industrielle est donc une démarche opérationnelle de mise en œuvre du développement durable. Si cette démarche est aujourd'hui bien connue et mise en pratique sur le Dunkerquois, il n'en demeure pas moins que des améliorations et des renforcements sont nécessaires. En effet, cette démarche complexe, demande des outils ou compétences qui ne sont pas toujours suffisamment disponibles sur le territoire, car :

- La dimension opérationnelle de l'écologie industrielle s'inscrit dans un champ étroitement encadré par les réglementations. La nature originale de ce concept met ainsi en jeu de nombreuses réglementations, qui n'étaient pas conçues initialement pour des projets d'Écologie Industrielle.
- La dimension économique d'une démarche d'écologie industrielle est influencée par de très nombreux facteurs purement économiques (cours des matières premières...), mais encore techniques (technologies à mettre en œuvre), logistiques ou réglementaires (coût des contraintes réglementaires), compétition entre les industries parties prenantes.

C'est pourquoi le Port de Dunkerque, conscient des freins qui demeurent, se fixe des objectifs de développement de l'écologie industrielle. Par ailleurs, cet objectif, associé à d'autres objectifs du Plan d'Aménagement tels que « favoriser la diminution des émissions industrielles sur le territoire de Dunkerque-Port » (Orientation 2), « privilégier la massification et le report modal » (Orientation 3) et l'orientation 5 (« faire de l'agglomération dunkerquoise une ville-port durable »), ouvre le champ de l'économie circulaire, concept plus récent qui concerne plus particulièrement le fonctionnement des produits et services, notamment les déchets, en rompant avec une logique linéaire, en passant de la possession à l'usage. Ces deux démarches, écologie industrielle et économie circulaire sont présentées dans ce qui suit.

## **2. L'ÉCOLOGIE INDUSTRIELLE**

« L'écologie industrielle » est une notion et une pratique du management environnemental visant à limiter les impacts de l'industrie sur l'environnement. Basée sur l'analyse des flux de matière et d'énergie, l'écologie industrielle cherche à avoir une approche globale du système industriel en le représentant comme un écosystème et à le rendre compatible avec les écosystèmes naturels.

La perspective est celle du développement durable. Il s'agit ici d'aller au-delà des politiques environnementales sectorielles et de répondre à des défis plus globaux et intégrés.

L'écologie industrielle recherche une optimisation à l'échelle de groupes d'entreprises, de filières, de régions, et même du système industriel dans son ensemble en s'inspirant du fonctionnement quasi cyclique des écosystèmes naturels.

En pratique, pour tendre vers cet objectif, l'écologie industrielle s'attache à :

- Valoriser les déchets d'une filière comme ressource pour cette même filière, ou pour une autre filière, de manière à ce qu'il ne reste que des déchets ultimes et en quantité minimale
- Boucler, tant que possible, les « cycles de matières » et minimiser les émissions dissipatives liées aux usages qui dispersent les produits polluants dans l'environnement ;
- Dématérialiser les produits et les activités économiques ;
- Boucler - tant que possible - les « cycles de matières » et minimiser les émissions dissipatives liées aux usages qui dispersent les produits polluants dans l'environnement ;
- Dématérialiser les produits et les activités économiques ;
- « Décarboniser » l'énergie.

À l'heure actuelle, les applications de l'écologie industrielle sont nombreuses, plus particulièrement près des zones portuaires, là où les flux de matières et de déchets industriels sont les plus importants, et où les entreprises peuvent plus facilement s'interpénétrer pour accroître la compétitivité en raison de leur proximité géographique.

## **3. DEVELOPPEMENT SUR LE DUNKERQUOIS**

Les premières pratiques d'écologie industrielle sur le territoire Dunkerquois sont anciennes, sous la houlette de l'entreprise sidérurgique ArcelorMittal basée sur le port, afin de répondre à des contraintes de process de production.

Mais l'essentiel des synergies entre entreprises, autrement appelées « symbiose industrielle » (Figure 1), sont mises en place dans les années 1990, pour répondre à une réglementation environnementale de plus en plus contraignante, notamment en termes de rejets dans l'atmosphère.

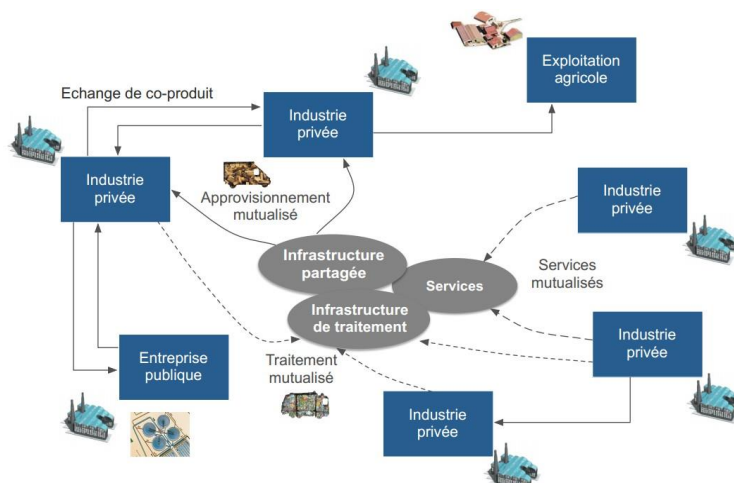


Figure 1 : Principe de la symbiose industrielle (CREA, 2014)

C'est ainsi qu'un véritable projet d'écologie industrielle a été initié en 2000 compte tenu de l'intérêt de cette démarche aux yeux des industriels. Une structure chargée de promouvoir l'écologie industrielle est créée : l'association ECOPAL (Économie et Écologie, Partenaires dans l'Action Locale), concrétisant le souhait des acteurs du territoire de favoriser le développement de l'écologie industrielle sur le bassin d'emploi. Au fil des ans, cette association a facilité la création d'un réseau industriel d'échanges en axant son effort sur les synergies de mutualisation en renforçant les échanges d'informations entre les services de l'environnement des grandes entreprises et les PME. En 2007, l'association ECOPAL réalise un inventaire des flux industriels (eau, énergie, matières premières, déchets, sous-produits, etc.) dans l'objectif de les répertorier, quantifier et intégrer à une base de données permettant par la suite de mettre en exergue les synergies possibles entre différentes entreprises. L'inventaire des flux industriels a également permis de mettre en évidence, entre autre, les flux potentiels pour de la mutualisation concernant les flux entrant, les flux sortant, les équipements et les services.

Sur le Dunkerquois, le cœur des flux concerne les industriels, principalement localisés sur le territoire du Port de Dunkerque. C'est donc ce dernier qui concentre la partie historique mais aussi la plus dense de la toile de l'écologie industrielle locale. En effet, les industries portuaires ont pleinement intégré ce concept qu'elles mettent en pratique depuis plusieurs années. Cette zone représente à ce jour l'expérience la plus aboutie en matière d'écologie industrielle sur le territoire français en terme d'échanges industriels (Figure 2).

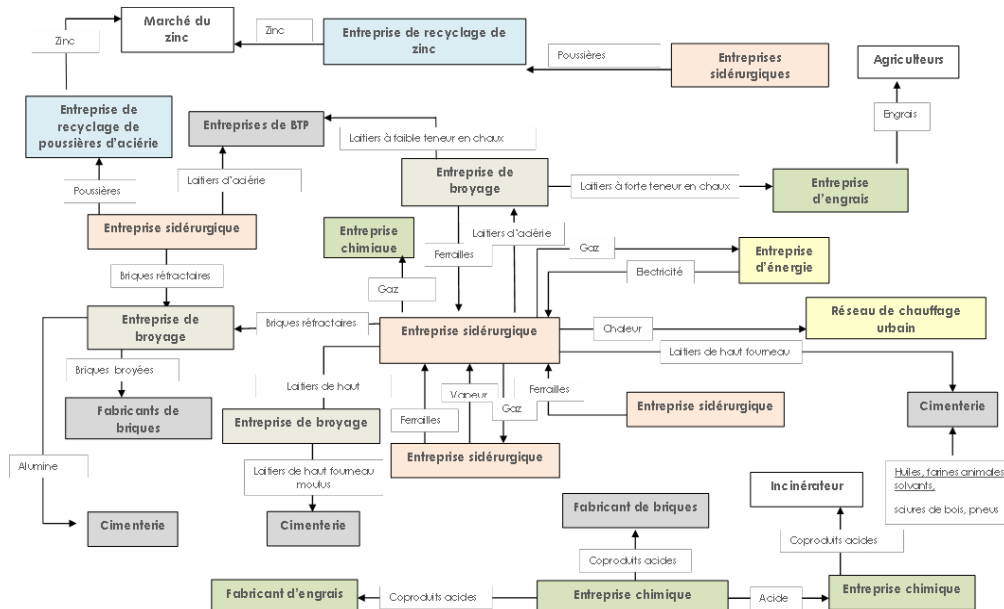


Figure 2 : Symbiose industrielle sur le territoire de Dunkerque (Beurain et Varlet, 2014)

A ce jour, tous les liens de la symbiose industrielle ne sont pas encore connus, les flux entre industriels étant une donnée considérée comme faisant partie du domaine de la confidentialité de fonctionnement des entreprises.

Le diagramme illustre la chaîne de valeur d'ArcelorMittal Dunkerque, organisée en trois sections principales :

- MARCHÉS NATIONAUX ET INTERNATIONAUX** (à gauche) : Inclut des acteurs comme GDF, DK6, Comilog, SG A, Europepe, CPM Dunkerque, DILLIGER international, et Marchés TP. Les flux de produits finis (brames d'acier, barres d'aciers spéciaux) y sont destinés.
- ACTEURS CLÉS** (au centre et à droite) :
  - ARCÉLORMITTAL Dunkerque** : Le cœur de la production, recevant des bobines et brames d'acier de Comilog et de l'Europepe, et fournissant des produits finis aux marchés.
  - ARCÉLORMITTAL Mardyck** : Reçoit des bobines d'acier de Dunkerque et fournit de l'acier à Sparkling Industrie et Valdunes.
  - Glencore** : Fournit du ferromanganèse à Dunkerque et du gaz à Air Liquide.
  - Polymère Europe** : Reçoit du gaz d'Air Liquide et fournit des produits minéraux non métalliques.
  - Etbs de Flandres** : Fournit du gaz à Air Liquide.
  - Polychim** : Reçoit du gaz d'Air Liquide et fournit des produits minéraux non métalliques.
  - CNPE** : Fournit de l'H<sub>2</sub> et O<sub>2</sub> à Air Liquide.
  - Dalkia** : Fournit de l'eau chaude à Dunkerque.
  - DK6** : Fournit du gaz hauts fourneaux (255 MW) à Dunkerque.
  - Comilog** : Fournit du silicomanganèse à Dunkerque.
  - SG A** : Fournit des laitiers d'acier à Europepe.
  - Europepe** : Fournit des brames d'acier à Dunkerque.
  - CPM Dunkerque** : Reçoit des produits finis de Dunkerque.
  - DILLIGER international** : Fournit des brames d'acier à Dunkerque.
  - Marchés TP** : Reçoit des barres d'aciers spéciaux de Dunkerque.
- ACTIVITÉS DE SUPPORT ET LOGISTIQUE** (en haut et en bas) :
  - Air Liquide** : Distributeur central de gaz (azote, gaz hauts fourneaux, gaz, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>) et fournisseur de produits minéraux non métalliques.
  - Holcim** : Fournit des granulats laitiers des hauts fourneaux à Dunkerque.
  - Chimie** : Fournit des produits minéraux non métalliques.
  - Sidérurgie** : Fournit du gaz à Glencore.
  - Energie** : Fournit du gaz à Glencore.
  - Produits minéraux non métalliques** : Fournit des produits minéraux non métalliques à Polymère Europe et Polychim.

La centrale électrique DK6, au premier rang des échanges avec ArcelorMittal, est souvent citée en exemple. D'une puissance de 790 mégawatts, elle fonctionne alternativement tantôt au gaz naturel et tantôt avec les gaz issus des hauts-fourneaux d'ArcelorMittal. Par ailleurs, elle fournit 255 MW d'énergie à ArcelorMittal.

Il est à souligner que les échanges entre industries se font préférentiellement entre entreprises d'un même groupe. Ceci s'explique par le fait que les entreprises souhaitent éviter les échanges de flux sur des secteurs d'activités où elles sont concurrentes. De plus, le coût du transport maritime est tel qu'il favorise également un fonctionnement intra-filial plutôt qu'inter-industries.

Une étude (Beaurain et Varlet, 2014), a fait le bilan des avantages de l'écologie industrielle sur le Dunkerquois. Pour cela, elle cible 7 entreprises ayant des relations de symbiose industrielle entre elles afin de dresser un panorama des retombées économiques, environnementales et sociales pour ses entreprises.

- Une société de valorisation des laitiers,
- Une industrie spécialisée dans la fabrication de ciment,
- Une industrie A de production d'acier,
- Une industrie chimique spécialisée dans la fabrication de produits acides,
- Une entreprise spécialisée dans le traitement de résidus de briques réfractaires,
- Une entreprise spécialisée dans de multiples prestations visant à optimiser les performances techniques, économiques et environnementales des installations,
- Une industrie B spécialisée dans la fabrication de l'acier.

5

Concernant les avantages économiques, trois types peuvent être identifiés :

- des revenus supplémentaires,
- des baisses de coûts de production (Figure 4), notamment en réduisant les coûts d'achats des matières et le coût du transport, les matières premières étant fournies par une des entreprises voisines,
- des créations de nouvelles activités sur le territoire.

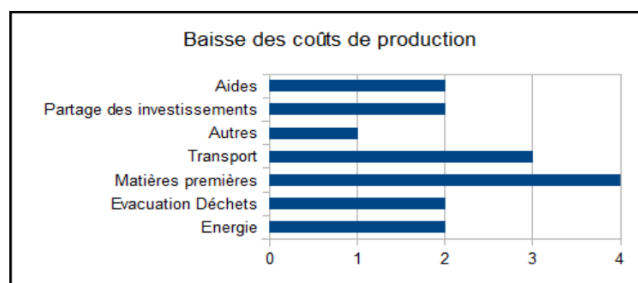


Figure 4 : Baisse des coûts de production induite par l'écologie industrielle (Beaurain et Varlet, 2014)

Pour les bénéfices environnementaux, là aussi plusieurs catégories se distinguent (Figure 5). Dans le cas des entreprises étudiées sur le territoire portuaire, l'analyse des données collectées auprès des industriels révèle que la préservation de ressources naturelles domine en raison des pratiques de recyclage de nombreuses firmes. Certaines entreprises intègrent également des matières secondaires en substitution des matières premières tandis que d'autres sont spécialisées dans des activités de broyage qui contribuent ainsi à vendre les résidus.

La valorisation des matières secondaires offre aux entreprises l'opportunité de diminuer les rejets de déchets en mer ou enfouis et a contribué à réduire les émissions atmosphériques (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> et poussières). Des espaces de stockage ont pu être libérés contribuant à favoriser un meilleur cadre de vie sur le Dunkerquois, et notamment pour les communes les plus proches du secteur portuaire.

Au total, les différentes initiatives des entreprises témoignent de nombreux avantages tels la préservation de matières ou la réduction des pollutions.

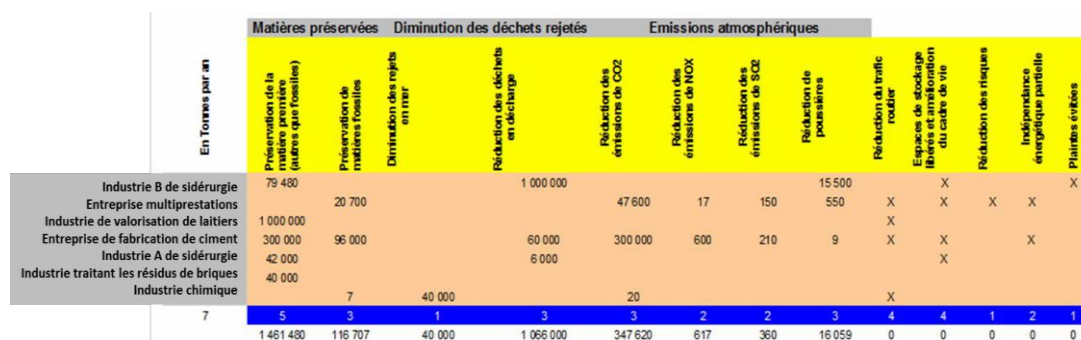


Figure 5 : Bénéfices environnementaux de l'écologie industrielle sur le Port (Beaurain et Varlet, 2014)

S'agissant, enfin, des bénéfices sociaux, les effets semblent plus limités, et se mesurent essentiellement en termes de création d'emplois (Figure 6).

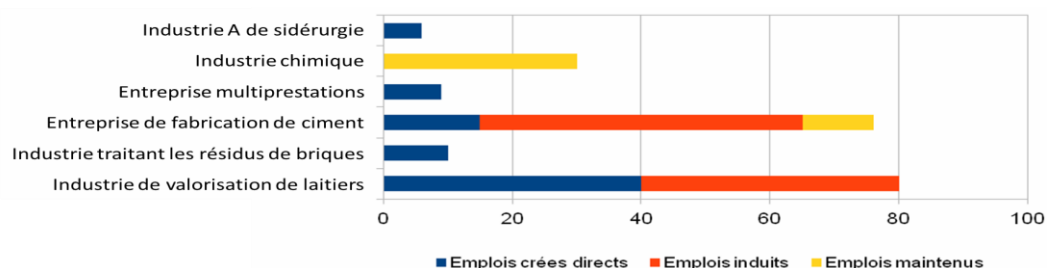


Figure 6 : Bénéfices en termes d'emplois de l'écologie industrielle sur Dunkerque (Beaurain et Varlet, 2014)

En outre, ces pratiques débouchent sur de nouveaux comportements qui permettent de limiter les impacts des activités industrielles sur l'environnement. Elles conduisent à réduire considérablement la quantité de déchets issue des processus de production (laitiers sidérurgiques, briques réfractaires, chutes de ferraille, huiles, solvants, farines animales, etc.) soit en leur donnant une seconde vie, soit en les utilisant à titre de combustibles en remplacement des ressources fossiles.

Les consommations énergétiques sont également maîtrisées, via la valorisation des gaz sidérurgiques, des combustibles et récupération de chaleur. Non seulement l'entreprise réduit ainsi sa dépendance à l'égard des ressources non-renouvelables, mais elle limite également les émissions atmosphériques. A titre d'exemple, Pour les entreprises étudiées, ce sont au total 16 059 tonnes de poussières, 347 620 tonnes de CO<sub>2</sub>, 617 tonnes de NO<sub>x</sub> et 360 tonnes de SO<sub>2</sub> qui sont évitées chaque année grâce aux pratiques de substitution des flux précédents.

À ces impacts positifs sur l'environnement s'ajoutent les effets d'une réduction du trafic routier liée à l'utilisation de résidus récupérés localement sur la consommation de ressources fossiles et les émissions de gaz à effet de serre. Au-delà, les bénéfices sociaux, quoique plus difficilement identifiables n'en paraissent pas moins significatifs, en termes de création d'emplois (dans les cas étudiés ici, ce sont 80 emplois directs, 90 emplois induits et 41 emplois maintenus que l'on a pu observer) ou en termes de formation du personnel et d'évolution des comportements au travail.

## **5. LA PRISE EN COMPTE DANS LE PROJET STRATEGIQUE**

A ce jour, le Port de Dunkerque a défini son projet stratégique pour la période 2014-2018. Si ce projet fixe les grands axes de développement du port afin de maintenir son niveau de compétitivité vis-à-vis des ports du range nord-européens, il s'inscrit également pleinement dans la démarche de développement durable. Les projets affichés, et plus particulièrement l'articulation de ces projets entre eux, mais aussi avec les structures existantes, devront désormais contribuer à la symbiose industrielle et venir la renforcer et la développer par :

- L'implantation de nouvelles industries ;
- La diversification des secteurs d'activité : l'accueil d'activités complémentaires, et non directement concurrentes, à celles existantes sur le territoire portuaire favorisera la création de nouveaux flux d'énergie et de matières inter-industriels ;
- L'innovation, permettant un développement plus respectueux de l'environnement et économisant les ressources ;
- Le développement du multimodal (orientation 3 du PA2D du GPMD) qui multiplie les possibilités d'organisation des flux de matières ou d'énergies sur leur territoire portuaire. Il permettra également de capter des flux extérieurs, renforçant de fait le potentiel en matière d'écologie industrielle et offrant l'opportunité d'un nouveau positionnement international.

## **6. LE CONCEPT DE L'ECONOMIE CIRCULAIRE**

Si aujourd'hui l'écologie industrielle n'a pas montré toute son efficacité et a encore un bel avenir devant elle, elle doit désormais compter sur l'économie circulaire.

Il n'existe pas actuellement de définition « normalisée » ni même stabilisée du concept relativement récent d'économie circulaire. Selon l'ADEME, l'économie circulaire peut se définir comme « un système économique d'échange et de production qui, à tous les stades du cycle de vie des produits (biens et services), vise à augmenter l'efficacité de l'utilisation des ressources et à diminuer l'impact sur l'environnement ».

L'économie circulaire, basée sur les 3R (réduire, réutiliser, recycler) s'oppose ainsi au modèle classique dit d'économie linéaire (extraire - produire - consommer - jeter). Pour autant, « cela ne signifie pas seulement de raisonner en « matières premières secondaires », mais aussi « en économie de matières », en modifiant les modes de production, en allongeant la durée de vie de la matière, en inventant de nouveaux modèles de ventes, et en développant des modèles d'économies en cascade, c'est-à-dire en générant plusieurs boucles de valeurs à partir des mêmes matières » (Conférence Environnementale, 2013).

L'économie circulaire induit donc de produire autrement, en intégrant une exigence écologique à tous les niveaux. Dans ce modèle, les sources d'énergie utilisées doivent être le plus possible renouvelables et le recours aux produits chimiques évité, mais le maillon essentiel est bien le « zéro déchet ».

L'économie circulaire s'inscrit en effet dans des objectifs de transformer les déchets en matière première réutilisée pour la conception des produits ou pour d'autres utilisations. En d'autres termes, ne plus créer de résidus que les systèmes industriels et naturels ne puissent absorber. La « boucle » pourrait ainsi être « bouclée » avec, à la clé, un gain de compétitivité pour les industries qui ont une totale maîtrise de leur flux de matières premières.

L'économie circulaire repose ainsi sur 7 axes combinés afin d'atteindre une démarche vertueuse (Figure 7) :

**L'éco conception :** Désigne une démarche de management environnementale centrée sur le produit (biens ou services). C'est une approche préventive et multicritère des problèmes environnementaux : eau, air, sol, bruit, déchets, matières premières, énergie, ... L'objectif principal de la démarche est de diminuer quantitativement et/ou qualitativement les impacts d'un produit ou d'un service, tout en conservant ses qualités et ses performances intrinsèques ;

**L'écologie industrielle** évoquée précédemment ;

**L'économie de la fonctionnalité :** privilégie l'usage à la possession et tend à vendre des services liés aux produits plutôt que les produits eux-mêmes. On remplace la vente du bien par la vente de son usage dans des solutions fondées sur une intégration de biens et de services ;

**Le réemploi :** permet de remettre dans le circuit économique les produits ne répondant plus aux besoins du premier consommateur (ex : vente de produits d'occasion) ;

**La réparation :** retrouver une deuxième vie par le biais de la réparation avec des pièces neuves ou d'occasion issues du processus de réutilisation ;

**La réutilisation :** certains déchets peuvent être réparés ou démontés et les pièces encore en état de fonctionnement triées puis revendues.

**Le recyclage :** réintroduction directe d'un déchet dans le cycle de production dont il est issu, en remplacement total ou partiel d'une matière première neuve.

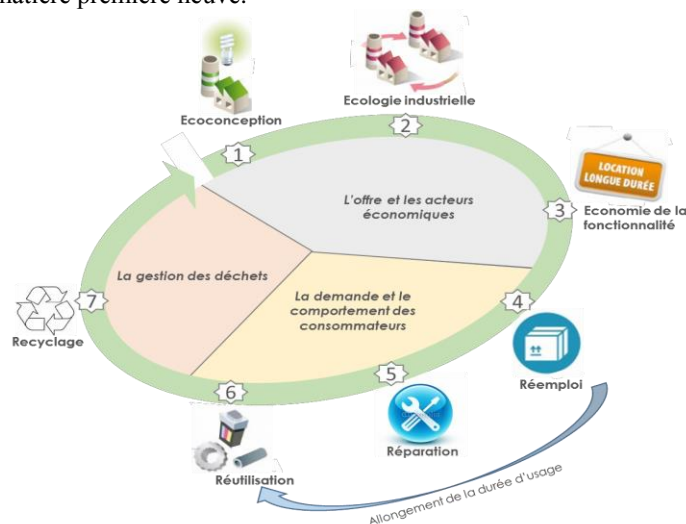


Figure 7 : Les 7 axes de l'économie circulaire (IDRA, 2014)

En toute logique, une économie circulaire aboutie redonne également une dimension régionale au développement économique en limitant les besoins en ressources et les déchets sur le territoire considéré.

## 7. L'ECONOMIE CIRCULAIRE SUR LE TERRITOIRE PORTUAIRE

Si l'écologie industrielle est aujourd'hui pleinement entrée dans les mœurs des industriels dunkerquois et transparait clairement au travers de la toile élaborée par l'Agence Générale d'Urbanisme (AGUR), il n'en va pas de même pour l'économie circulaire ; En effet, à ce jour, rares sont les exemples de matériaux intégrant la boucle vertueuse de l'économie circulaire, que ce soit sur le Dunkerquois ou le territoire portuaire.



Il convient de souligner que l'économie circulaire n'est synonyme de développement durable que si les diverses phases du « cycle de vie » du produit ne nécessitent pas des apports importants en ressources naturelles.

L'un des exemples d'économie circulaire portuaire est la gestion des sédiments marins du Port de Dunkerque. Chaque année, le Port drague 50 000 m<sup>3</sup> de sédiments non immergeables devant être stockés et gérés à terre. Pour ce faire, le port a opté pour des filières qui entrent dans la dynamique de l'économie circulaire. En effet, il a décidé de valoriser (et donc « réemployer ») ses sédiments ayant statut de « déchets ». C'est donc également une forme de « recyclage ».

Le cycle suivi par les sédiments dragués est schématisé ci-après (Figure 8) :

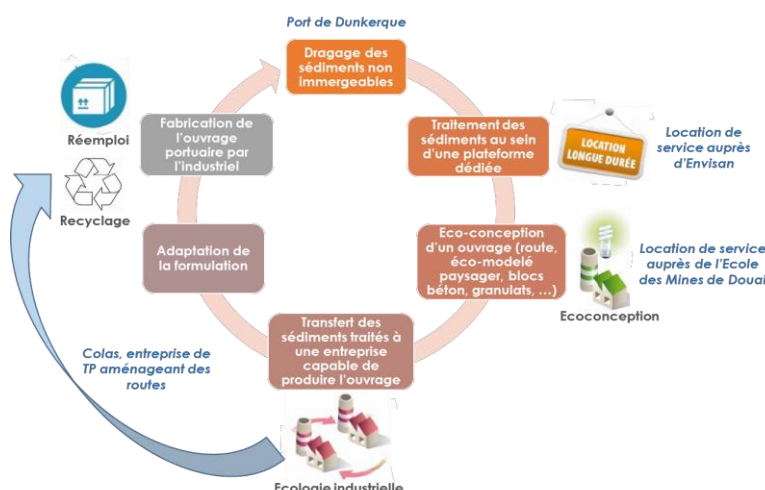


Figure 8 : Economie circulaire des sédiments et valorisation en techniques routières (IDRA, 2014)

Entre 2009 et 2015, le GPMD a ainsi dragué et valorisé 400 000 m<sup>3</sup> de sédiments au travers de diverses filières faisant intervenir plusieurs entreprises, que ce soit pour de la conception, de la prestation de service, et l'échange de matière et de la production d'un ouvrage.

Une chaire d'enseignement et de recherche, ECOSSED (ECONomie circulaire des SEDiments) a d'ailleurs été créée en 2014 par l'Ecole des Mines de Douai. Elle regroupe 12 partenaires, dont 8 fondateurs (GPMD, COLAS, HOLCIM, ARF, NEO-ECO recycling, Carrières du Boulonnais, Département du Nord et les Voies Navigables de France) et 4 associés (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE), Conseil Régional, Lille Métropole Communauté Urbaine, Agence de l'Eau Artois Picardie).

## 8. VALORISATION DES SEDIMENTS

Le Port de Dunkerque se doit de maintenir les tirants d'eau nécessaires à la navigation dans l'ensemble de ses bassins. Suite à la construction future du terminal méthanier, ce sont 6.5 Mm<sup>3</sup>/an qui devront être dragués. La mise en place d'un Schéma Directeur des Dragages fait du Port de Dunkerque un précurseur quant aux possibilités de filières de gestion des sédiments. Dès 2007, le port gère les sédiments issus des dragages en mer ou à terre selon leur qualité au regard des seuils réglementaires avec un réseau de surveillance renforcée sur son territoire (Figure 9).

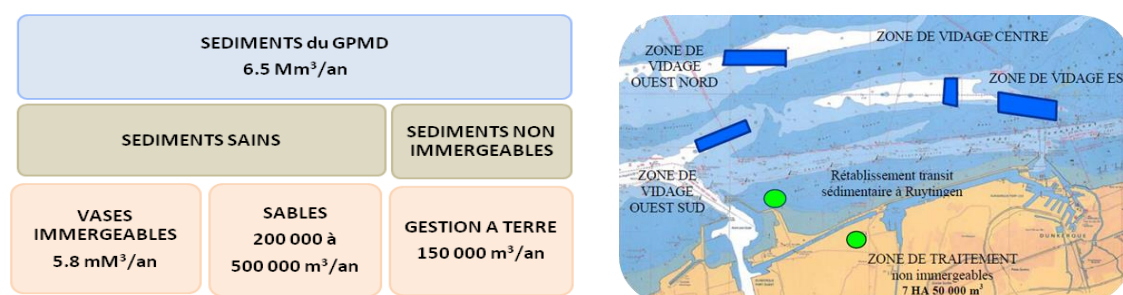


Figure 9 : filières de gestion des sédiments du GPMD.

La surveillance et la connaissance du milieu reposent sur un suivi régulier de l'état chimique et biologique des milieux sédimentaires et aquatiques résolument exhaustives (Figure 10). L'objectif est également de pouvoir œuvrer à la réduction des sources de rejets de contaminants, le port étant le réceptacle aval des eaux des bassins versants amonts.

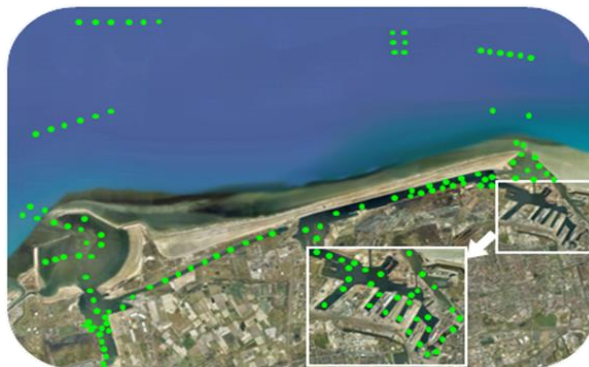


Figure 10 : Localisation des stations de suivi.

Les Grenelles de l'environnement et de la mer ont permis de mettre en avant de nouvelles formes de gouvernance environnementale pour les ports. Fort de cette évolution, le Port de Dunkerque a poursuivi ses efforts en renforçant sa stratégie de gestion en 2010 par un outil opérationnel indispensable pour une gestion optimale : le Plan de Gestion Opérationnelle des Dragages. Ce plan assure au Port une gestion durable des dragages en intégrant les évolutions réglementaires.

Le Port de Dunkerque mène donc une politique de gestion des sédiments lui assurant une amélioration constante du milieu. Seuls les sédiments sains sont immergés en mer, avec un clapage des vases sur les 4 zones d'immersion du port. Les sables propres sont également immergés ; toutefois, la zone d'immersion a été choisie d'après l'étude PLAGE menée par le Syndicat Mixte de la Côte d'Opale sur l'évolution du trait de côte qui démontre que le transit sédimentaire a besoin d'être rétabli artificiellement. L'immersion des sables constitue donc une véritable source de valorisation pouvant servir à la lutte contre l'érosion du trait de côte bien que le trait de côte situé face au port de Dunkerque soit largement fixé et peu érosif.

Par opposition, 500 000 m<sup>3</sup> de sédiments non immergeables en raison d'une qualité insuffisante sont gérés à terre depuis la mise en place du SDD, démarche tout à fait originale spécifique au port de Dunkerque. Cette nouvelle filière de gestion prend appui sur une plate-forme de traitement par déshydratation naturelle permettant d'accueillir 50 000 m<sup>3</sup> de vases par campagne de stockage (Figure 11).



Figure 11 : Plate-forme de traitement du Port de Dunkerque

Cette filière qui entre dans le cadre du projet national SEDIMATERIAUX propose des débouchés intéressants en matière de réutilisation des sédiments (béton, route, ...) et un volet recherche ambitieux auquel participe le Port de Dunkerque.

Novateur sur de nombreux aspects (surveillance exhaustive du milieu, convention de rejets, gestion à terre et valorisation innovante des sédiments non immergeables,...), le Port poursuit ses efforts de gestion portés par la volonté d'être un Port maritime exemplaire.

## 9. APPLICATION A LA TECHNIQUE ROUTIERE

Le domaine routier permet d'exploiter des matériaux de nature très variée et répondant à des caractéristiques mécaniques peu élevées, de quelques MPa, en fonction de la position du matériau dans la structure routière.

La partie terrassement comprend la plate forme support, et éventuellement un remblai de complément selon le profil en long recherché, ainsi qu'une couche de forme. La couche de forme a pour rôle de protéger le sous sol contre la pluie et les effets de cycle gel-dégel, de permettre le bon déroulement du chantier à travers le passage des engins, et de séparer le sol récepteur et les couches de chaussée pour éviter tout transfert de matière et permettre le maintien des propriétés des couches de chaussée. Parmi les familles de structure de chaussées, on trouve des chaussées constituées, d'une couche de fondation, d'une couche de base et d'une couche de roulement (Figure 12) :

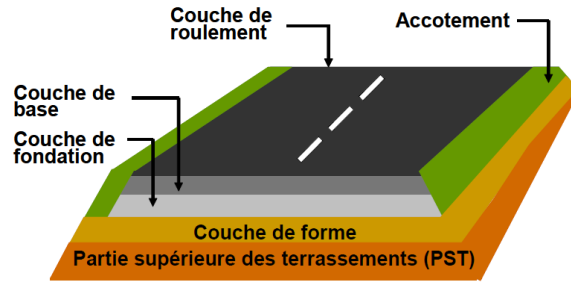


Figure 12 : Exemple de structure routière

Les deux premières couches reprennent les efforts verticaux statiques et permettent la distribution de ces charges sur le sol. La troisième couche reprend les efforts dynamiques et horizontaux. Ce type de structure est le cas le plus courant. Les efforts sont répartis entre les différentes couches jusqu'au sol.

Les travaux composés d'une étude sur sédiments bruts et de l'étude de valorisation en technique routière se divisent en quatre étapes :

- l'étude environnementale, physique et minéralogique des sédiments bruts.
- l'étude mécanique, réalisée sur des sédiments à l'état pâteux et sur des sédiments consolidés.
- la préparation à la formulation.
- la mise au point et la validation de formulations.

La méthodologie d'élaboration du matériau de couche d'assise de la chaussée constituée de sédiments marins est basée sur :

- les choix et les dosages des différents constituants,
- l'ensemble des essais mécaniques et environnementaux, réalisés en laboratoire, permettant d'évaluer la durabilité des formulations,
- la réalisation d'une planche expérimentale pour confronter les résultats d'essais en laboratoire aux contraintes du chantier,

Les éléments d'étude qui suivent ont pour objectif de montrer la possibilité de valorisation du sable issu des dragages dans le cadre d'une grave routière.

### a) Caractérisation du sable

Dans un premier temps, une caractérisation complète du sable de dragage est présentée : analyses minéralogiques, chimiques, et géotechniques. L'objectif de ce travail préliminaire est d'évaluer le potentiel polluant du sable et de déterminer ses caractéristiques physiques nécessaires pour les formulations.

### b) Analyses chimiques et minéralogiques

Il s'agit d'identifier ici la nature des minéraux du sable afin de voir le type de polluants associés à ces minéraux. Les analyses ont été effectuées par fluorescence X et diffraction X.

Le spectromètre de fluorescence X utilisé, de type Siemens, est destiné à la détermination de la composition chimique (à partir du bore jusqu'à l'uranium, excepté l'azote) d'échantillons solides ou liquides. Les résultats obtenus sur le sable de dragage sont repris dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1. Composition chimique du sable de dragage obtenue par fluorescence X (% massique)

CO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cl
5,0	79,9	8,7	2,2	0,8	0,8	0,6	0,7	0,02 0,03*

\* mesurée par solubilité à l'eau

Le diffractomètre aux rayons X utilisé, de type Siemens, est destiné à l'identification des phases cristallines dans un composé donné. Cela nous a permis de montrer que le sable de dragage est principalement composé de Quartz (SiO<sub>2</sub>), avec la présence aussi de Calcite (CaCO<sub>3</sub>).

#### c) Test de lixiviation

Le test de lixiviation (X31-210) est considéré actuellement comme un outil indispensable pour la prédiction de comportement à long terme des déchets. En France, la circulaire « Mâchefers d'Incineration d'Ordures Ménagères » (Ministère français de l'environnement, 1994) impose la caractérisation du potentiel polluant par la réalisation de tests de lixiviation X31-210.

C'est ce type d'essai que nous retenons ici. Ce test repose sur la solubilisation des éléments chimiques présents dans le sable. Il est effectué sur un échantillon non séché et consiste en la mise en contact de 100 grammes d'échantillon avec un litre d'eau pendant 3x16 heures à l'aide d'un agitateur va-et-vient à une vitesse de 60 oscillations/minute. C'est l'essai de lixiviation X31-210 qui semble offrir les conditions les plus agressives (AFNOR, 1992).

La séparation échantillon résiduel-lixivié est réalisée par centrifugation suivie d'une filtration à 0,45 µm. Les éléments suivis sont les minéraux généralement cités dans les réglementations française, hollandaise et canadienne. Il s'agit du mercure, du cadmium, de l'arsenic, du plomb, du chrome VI, du cuivre, du zinc, des sulfates, des nitrates et des chlorures. On recherche également les composés organiques totaux (COT) (Journal officiel des Communautés Européennes, 2000).

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau ci-dessous. On trouvera également, à titre de comparaison, les valeurs limites définies dans la circulaire « MIOM » de 1994, en dessous desquelles les mâchefers peuvent être considérés comme valorisables en techniques routières.

Tableau 2. Résultats du test de lixiviation X31-210

Eléments	mg/kg de matière sèche, après 3 extractions (48h)	Critères de valorisation d'un mâchefer
COT	140	<1500 mg/kg
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<790	<10000 mg/kg
Cr VI	<0,6	<1.5 mg/kg
As	<0,07	<2 mg/kg
Cd	<0,3	<1 mg/kg
Hg	<0,03	<0.2 mg/kg
Pb	<6	<10 mg/kg

En outre, le chlore présent dans le sable est en quantité négligeable (tableau 1) ; et la pollution en Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) est faible.

Ces résultats nous permettent de conclure que le sable de dragage est faiblement pollué et peut être valorisé en techniques routières.

#### d) Analyses physiques et géotechniques

Il s'agit ici de déterminer les caractéristiques géotechniques des sables nécessaires avant toute tentative de valorisation de ce matériau comme constituant des chaussées. Les paramètres retenus sont ceux définis dans le guide « Réalisation des remblais et couches de forme » (SETRA, 1992) : teneur en eau, granulométrie, masse volumique apparente et absolue (au pycnomètre à hélium), essai au bleu de méthylène, équivalent de sable, module de finesse.

Les différents résultats, excepté la granulométrie, sont présentés ci dessous :

- Teneur en eau naturelle (%) : 5,5
- Masse volumique apparente (g/cm<sup>3</sup>) : 1,41
- Masse volumique absolue (g/cm<sup>3</sup>) : 2,62
- Equivalent de sable visuel : 93,8
- Equivalent de sable (piston) : 82,4
- Valeur au bleu de méthylène (pour 100 g) : 0,1
- Module de finesse : 0,9
- Test d'alcali réaction (Essai microbar) : Non réactif

La figure 13 montre la granulométrie du sable de dragage.

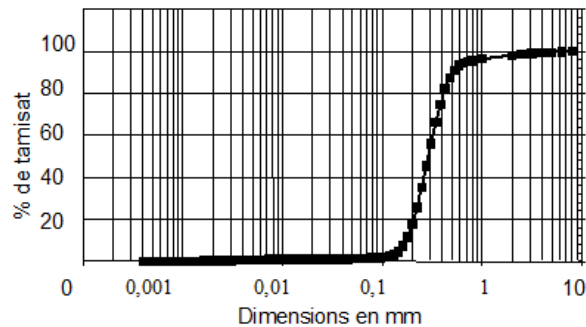


Figure 13. Granulométrie du sable de dragage

Avec 2% d'éléments inférieurs à 0,08 mm et 90% d'éléments inférieurs à 0,5 mm, ce sable peut être classé d'un point de vue granulaire comme un sable moyen. Sa faible valeur au bleu permet de confirmer le caractère propre du sable. La granulométrie est très serrée : près de 90% des grains ont un diamètre compris entre 0,1 mm et 0,5 mm. Cela laisse supposer que le sable seul ne pourra pas avoir une compacité suffisamment grande, et par la suite un Indice Portant Immédiat adéquat. Un traitement aux liants hydrauliques et l'utilisation d'un matériau correcteur se révéleront certainement indispensables.

#### e) Formulations

Les graves routières, en particulier celles destinées aux couches d'assise de chaussée, doivent répondre à des caractéristiques mécaniques bien précises : Indice Portant Immédiat, module d'élasticité, résistance à la traction.

L'IPI d'un sable caractérise son aptitude à être porté à une densité élevée (compactabilité), et à ne pas se déformer au jeune âge sous le trafic de chantier. Un compactage aisé et une traficabilité correcte dans les conditions normales de sollicitation seront obtenus avec un indice portant immédiat (IPI) compris entre 40 et 60. Il est recommandé, pour faciliter le déroulement du chantier, de viser une valeur moyenne de l'IPI non inférieure à 35 (couche de fondation) et 45 (couche de base). En aucun cas, les valeurs minimales ne devront être inférieures à 25 (couche de fondation) et 35-40 (couche de base).

Comme le laissait prévoir la granulométrie non étalée du sable, après détermination des caractéristiques de compactage à l'énergie Proctor modifié du sable de dragage seul, il apparaît une insuffisance notable de ce matériau en densité sèche d'une part et en Indice Portant Immédiat d'autre part :

- densité sèche ( $\gamma_d$ ) : 1,63 t/m<sup>3</sup> à l'optimum (15% d'eau),
- IPI maximal : 3, et sur une faible plage de teneur en eau (sensibilité à ce paramètre).

Il est donc nécessaire de faire appel à des matériaux correcteurs pour améliorer la portance du sable.

L'utilisation, en outre, en assises de chaussée nécessite un traitement aux liants hydrauliques. Pour des raisons de maniabilité, ces liants doivent être à prise lente. C'est pourquoi le ciment CEM III/C 32,5 PMES (à base de laitier, anciennement CLK) de la cimenterie de Lumbres (groupe Ciment d'Obourg) a été choisi. La recherche des autres constituants ainsi que des proportions relatives est particulièrement développée dans Abriak et al. (2003). Le fil conducteur est dans un premier temps l'obtention d'un IPI suffisamment élevé.

A la fin de cette étape, trois formulations respectant les conditions nécessaires ont été retenues :

- 52 % de sable de dragage, 40 % de sable du Boulonnais 0/4 mm, 8% de CEM III/C 32.5 PMES,
- 60 % de sable de dragage, 30 % de sable du Boulonnais 0/4 mm, 10 % de CEM III/C 32.5 PMES,
- 72 % de sable de dragage, 21 % de sable du Boulonnais 0/4 mm, 7 % de CEM III/C 32.5 PMES.

Il est à noter également qu'il ne faut pas essayer à tout prix de s'inscrire dans le fuseau granulométrique préconisé pour les graves 0/20 mm : ceci conduirait à n'utiliser que 10% de sable de dragage, ce qui n'est pas le but de la valorisation.

La détermination de la formulation optimale se fait par la détermination des caractéristiques mécaniques qui permettent de classer la micro-grave. Cette étape se fait selon la norme NFP 98-113 (AFNOR, 1994).

#### f) Recherche des performances mécaniques

Le passage obligé pour caractériser définitivement une grave consiste à mouler par vibrocompression des éprouvettes diamètre 16 cm, hauteur 32, avec une zone centrale réduite de manière à ce que la rupture se produise dans cette partie de l'éprouvette, instrumentée pour pouvoir mesurer les déformations sous charge selon la norme NF P 98-114-2 (AFNOR, 1994). L'essai à réaliser est un essai de traction directe, très délicat à mettre en œuvre. En cas de difficultés, la norme prévoit une simplification de la procédure : des essais de traction par fendage peuvent alors être réalisés ; des coefficients d'équivalence permettent de revenir à des valeurs de traction directe.

Une approche rapide des performances mécaniques résistance à la traction par fendage sur des éprouvettes de diamètre 5 cm et de hauteur 10 cm, obtenus par compression statique selon la norme NFP 98-230-2 (AFNOR, 1993) a montré que le mélange E comportant 40% de sable correcteur et 8% de ciment est moins performant que les deux autres. Par conséquent, nous ne faisons l'étude sur les grandes éprouvettes qu'avec les deux autres formulations.

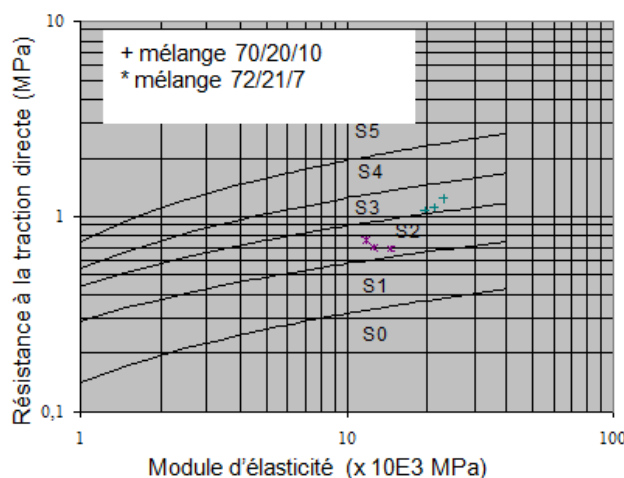


Figure 14. Performances mécaniques des éprouvettes- classements des graves suivant la norme NFP 98-230-2

Des séries de trois éprouvettes sur les deux mélanges retenus ont été confectionnées et testées à 28 jours. Les valeurs obtenues tant en résistance qu'en module d'élasticité sont projetées en valeurs équivalentes à un an grâce à des coefficients empiriques donnés par la norme. La figure 15 qui suit montre les résultats obtenus pour les deux formulations ainsi que les classements qui en découlent.

Ces résultats doivent être analysés selon deux points de vue : mécanique et économique.

Un dosage de 7% de ciment permet d'obtenir une classe S2 suffisante pour les couches d'assise de chaussée. La situation des valeurs de la formulation au centre de la classe S2 n'impose pas, avant étude de l'influence des paramètres, d'adopter un dosage de 8%. Quant au dosage de 10% de ciment, on voit qu'il permet d'atteindre la classe de résistance S3, mais d'un double point de vue économie et sensibilité à la fissuration (le ciment apporte un comportement fragile), il est moins intéressant : il est sans doute préférable de majorer l'épaisseur de la couche de fondation de cette grave plutôt que d'augmenter son dosage en ciment.



g) Sensibilité aux paramètres

Pour être complète, l'étude doit permettre de mesurer l'influence des paramètres inhérents à la fabrication : la densité sèche, la teneur en eau et la quantité de liant. Plusieurs essais ont été réalisés en faisant varier séparément chacun de ses paramètres, de la façon suivante :  $*d = 0,95(*d \text{ réf.})$  ;  $*d = 1,02(*d \text{ réf.})$  ;  $W = W \text{ réf.} + 0,5\%$  ;  $W = W \text{ réf.} - 1\%$  ;  $l = 0,8 \text{ liant}$  ;  $l = 1,2 \text{ liant}$ .

L'ensemble des résultats est résumé ci-dessous :

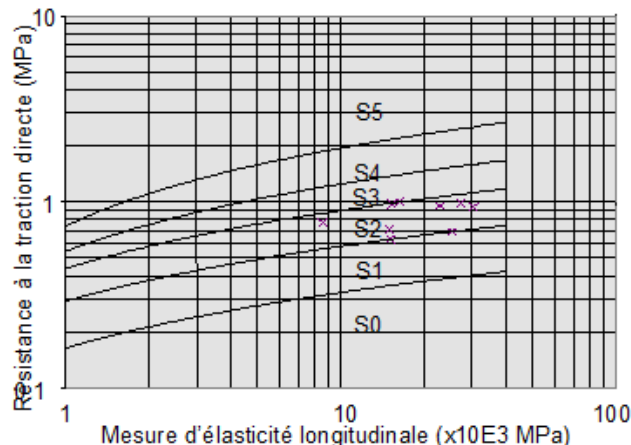


Figure 15 - Classements des graves suivant les performances mécaniques à 360 jours

Tous les résultats obtenus restent dans la classe de résistance S2, mais dans certains cas, les résultats assez faibles montrent qu'il faudra être prudent avant un démarrage de chantier.

En synthèse, le Port de Dunkerque dispose annuellement d'une quantité considérable de sable de dragage extrait de ses chenaux et de son l'avant-port pour éviter son ensablement. La présente étude a eu pour objectif la valorisation de ce sable dans le cadre d'une grave routière. Pour réaliser cela, la formulation à déterminer doit répondre à certaines caractéristiques : compacité, portance, résistance et doit présenter en outre des avantages économiques. Ce sont ces 4 paramètres qui ont servi de fil directeur dans la recherche d'une formulation de grave optimale. Finalement, un mélange répondant à toutes ces questions a pu être mis en avant.

## 10. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Au cours de la seconde Conférence environnementale de 2013, 50 mesures pour l'écologie ont été proposées, dont 12 ayant trait à l'économie circulaire :

- Définir une stratégie d'utilisation des ressources et des objectifs de long terme et un plan déchets 2014-2020,
- Changer nos modes de consommation et de production, de distribution et de logistique, vers une économie plus efficace dans l'utilisation des ressources ;
- Favoriser l'éco-conception des produits pour augmenter leur durabilité, leur réutilisation et leur réparabilité ainsi que leur recyclage ;
- Lutter contre les pratiques d'obsolescence programmée et mettre en œuvre concrètement les nouveaux droits du consommateur ;
- Renforcer le pilotage, la gouvernance et la mobilisation des filières à responsabilité élargie du producteur par la puissance publique au service de la transition vers une économie circulaire ;
- Accompagner entreprises et collectivités locales dans cette transition par des outils financiers et réglementaires ;
- Créer le cadre favorable à l'amélioration du tri, par les citoyens comme par les entreprises ;
- Lutter contre les trafics illégaux ;
- Accroître la connaissance des flux de déchets et de matières, des coûts et financements associés à leur gestion. Simplifier et faciliter l'accès à l'information correspondante, y compris pour le citoyen ;
- Mettre en place les outils d'incitation financière à la réinjection des déchets dans le cycle économique, sans accroître les charges globales pour les acteurs ;
- Développer l'écologie industrielle et territoriale dans les territoires ;
- Conserver les ressources sur le territoire, notamment les plus stratégiques.

L'économie circulaire apparaît de plus en plus comme étant un projet de territoire. Le projet stratégique du Grand Port Maritime de Dunkerque a également pour vocation d'être un projet dédié au développement durable du territoire portuaire. Le Port, dont les ambitions en termes de politique environnementale globale sont clairement affichées, peut saisir l'opportunité de la définition de son projet stratégique 2014-2018 pour l'intégrer dans la démarche de l'économie circulaire en appliquant à son territoire les mesures définies lors de la Conférence Environnementale.

Si l'écologie circulaire est une démarche aujourd'hui assimilée sur le Dunkerquois démontrant ses avantages pour les industries et le cadre de vie, il n'en demeure pas moins que des améliorations restent possibles par une meilleure maîtrise des flux (flux entrants, et flux sortants tels que les émissions industrielles) et des modes de transport sur le territoire portuaire pouvant œuvrer au renforcement et au développement de la symbiose industrielle. L'essor de la symbiose industrielle passe également par la levée des freins tels que les accords cadre entre entreprises d'un même groupe qui priment sur les possibilités d'échanges entre entreprises de groupes distincts et concurrents. Des incitations sont sans doute à trouver pour modifier ces modes de pensée et de fonctionnement.

L'économie circulaire semble à ce jour à son balbutiement sur le Dunkerquois compte tenu des rares informations existantes sur cette démarche. Il est vrai que le concept d'économie circulaire est nettement plus récent que celui d'écologie industrielle et qu'un amalgame entre les deux est souvent fait. Pour autant, ces deux concepts sont bien distincts, l'écologie industrielle n'étant qu'un des maillons de l'économie circulaire.

Afin de pouvoir déterminer quels peuvent être les meilleurs axes de travail sur lesquels concentrer ses efforts pour développer l'économie circulaire, il apparaît nécessaire d'établir un état initial des actions existantes à ce jour sur les 7 axes composant l'économie circulaire à l'échelle du territoire portuaire. Cet état des lieux offrira par la suite la possibilité de fixer des objectifs permettant de satisfaire les mesures définies par la Conférence Environnementale en matière d'économie circulaire.

## **11. REFERENCES**

- ABRIAK N.E., GREGOIRE P. 2003. Amélioration de la portance du sable de dragage extrait de l'avant-port de Dunkerque, 2ème Symposium International sur les Sédiments Contaminés, Québec.
- AFNOR. Décembre 1992. Déchets, essai de lixiviation. Normalisation française X31-210
- AFNOR. Août 1993. Préparation des matériaux traités aux liants hydrauliques ou non traités. Normalisation française NF P98-230-2.
- AFNOR. Novembre 1994. Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques. Normalisation française NF P94-114-2
- AFNOR. Novembre 1994. Sables traités aux liants hydrauliques et pouzzolaniques. Normalisation française NF P98-113.
- Journal Officiel des Communautés Européennes. 14 juin 2000. Arrêté relatif aux niveaux de référence à prendre en compte lors d'une analyse de sédiments marins ou estuariens présents en milieu naturel ou portuaire.
- Ministère français de l'Environnement. 9 mai 1994. Circulaire DPPR/SEI/BPSIED/FC/FC, n°94.IV.I.
- Ministère français de l'Équipement, du Logement et du Transport. Septembre 1992. Réalisation des remblais et couches de forme. Guide technique (éd. SETRA).