

## Analyse du cycle de vie, Impact environnemental et Biodiversité.

# L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES STRUCTURES EN PALPLANCHES ACIER – CAS D'ETUDE

João MARTINS

ArcelorMittal Commercial RPS Sàrl - Luxembourg

### 1. Résumé

L'acier est l'un des matériaux les plus utilisés dans la construction, et il contribue de façon significative aux émissions de gaz à effet de serre. Cependant, quand on compare plus en détail différentes solutions, on se rend compte que l'acier est un matériau plutôt écologique, car une partie des éléments en acier est réutilisée plusieurs fois avant que le tout ne soit recyclé à près de 100%.

Par ailleurs, l'objectif européen de la neutralité carbone à l'horizon 2050 est une ferme incitation pour les producteurs à investir dans des technologies propres. Cela a un coût et prendra du temps. Les aciéristes développent déjà des plans très ambitieux, mais le but ne pourra être atteint qu'avec le soutien des pouvoirs publics qui se doivent de promouvoir les solutions les plus écologiques, et non pas forcément les moins chères. Certains pays européens appliquent déjà des critères environnementaux dans de nombreuses soumissions publiques.

Notons qu'à court terme une analyse détaillée du cycle de vie (ACV), même lorsqu'on se limite aux paramètres principaux ayant une influence non négligeable, est une méthode transparente et équitable pour comparer l'impact environnemental de différentes structures. Il est également préférable d'utiliser les données du produit qui sera effectivement mis en œuvre, par exemple à l'aide des fiches de déclaration environnementales (FDES) des producteurs, plutôt que des données génériques ou des FDES collectives. Cette approche encouragera l'industrie à développer des produits et des solutions innovantes qui consommeront nettement moins de ressources naturelles. Ce processus continu est déjà en cours : en deux décennies, ArcelorMittal a amélioré l'efficacité de ses palplanches acier de l'ordre de 20%.

Cet article traite d'un cas d'étude réalisé par le bureau d'ingénierie belge *Tractebel* pour le compte d'ArcelorMittal. L'objectif est de comparer le coût total du cycle de vie et le bilan carbone sommaire de trois solutions alternatives pour la construction d'un mur de quai destiné à accueillir des paquebots de croisière qui serait construit dans un port belge.

L'ACV a démontré que dans ce cas d'étude spécifique l'empreinte carbone de la solution palplanches acier est 45% plus faible que celle des alternatives étudiées. Néanmoins cette conclusion ne peut pas être transposée à d'autres structures ou à d'autres pays sans l'application de facteurs de pondération locaux.

## 2. Objectifs durables dans le secteur de la construction

Pour atteindre les objectifs en matière de changement climatique, les gouvernements n'ont d'autre choix que de remettre en question les choix classiques des méthodes et des matériaux de construction en intégrant des critères sociaux et environnementaux dans leur politique d'achats. De nombreux fabricants se sont déjà engagés à réduire ou à compenser l'impact environnemental de leurs produits, mais pour atteindre cet objectif ambitieux dans un délai aussi court, 2050 étant l'objectif de neutralité carbone, de nombreux programmes de recherche et des investissements considérables sont nécessaires. Ces investissements en ressources humaines et financières requièrent une forte implication et un soutien financier de la part des investisseurs privés et publics. Il faut inciter les producteurs et les autres acteurs à être inventifs de façon à proposer des matériaux et des solutions de plus en plus écologiques.

Dans le secteur de la construction, les solutions durables seront obtenues en réduisant les quantités requises de ressources naturelles (optimisation), en réutilisant les éléments le plus souvent possible et en recyclant. Par exemple, au cours des 50 dernières années, les fabricants de palplanches en acier ont pu réduire de plus de 50% les quantités nécessaires à la construction d'écrans de soutènement similaires. Cela grâce à des améliorations continues et progressives dans la technologie de production de l'acier, dans les techniques de mise en œuvre et dans le dimensionnement des ouvrages : utilisation de limites élastiques plus élevées de l'acier, optimisation des géométries des palplanches, amélioration des modèles de sol et des méthodes de dimensionnement tant au niveau géotechnique que structurels, recours à des logiciels performants, ... Pour atteindre la neutralité carbone, les aciéristes devront développer de toutes nouvelles technologies. Le recyclage de la mitraille dans les fours électriques a déjà réduit de près d'un facteur quatre l'empreinte carbone de l'acier par rapport aux hauts-fourneaux, mais ce n'est pas suffisant car d'un côté il n'y a pas assez de mitraille pour répondre à la demande mondiale croissante, et de l'autre côté, même en passant à 100% d'énergies renouvelables dans les fours électriques, les procédés actuels ne permettent pas d'éliminer complètement les émissions de gaz à effet de serre (GES).

## 3. Les palplanches en acier

Les domaines d'application des palplanches acier sont nombreux. La majorité des palplanches acier se retrouvent dans les structures permanentes en contact avec de l'eau : constructions portuaires maritimes ou fluviales, construction ou renforcement de berges et de canaux, digues anti-crues, .... Les applications temporaires représentent une part importante également. Ce sont principalement des batardeaux, des écrans de soutènement d'excavations profondes, surtout lorsqu'on excave sous le niveau de la nappe phréatique. Finalement on les voit également dans les trémies, les parkings souterrains et plus rarement en tant qu'écran de confinement dans des sols ou eaux pollués.

Le cas considéré dans cette étude est une structure portuaire permanente. L'un des premiers murs de quai construits avec des palplanches en acier en Europe se trouvait aux Pays-Bas et a été exécuté à la fin des années 1920. Le début du 20<sup>ème</sup> siècle correspond à la période où les palplanches acier ont petit à petit remplacé les structures en bois car le bois devenait une source de plus en plus rare. La France, la Belgique, le Royaume-Uni, l'Italie, ... tous les pays européens ont utilisé dans le passé des palplanches métalliques dans les structures portuaires.



Figure 1. Terminal de paquebots de croisière - Port de Ronne, Danemark (2019).

L'Allemagne est un pays pionnier dans ce domaine, en partie dû à l'impulsion de l'industrie locale. Jusqu'à présent, presque tous les murs de quai principaux ont été réalisés avec des palplanches en acier, y compris le *JadeWeserPort*, l'une des plus grandes structures portuaires construites en Allemagne dans les années 2008. C'est le premier port qui a été exécuté avec un système innovant de parois combinées de type HZM/AZ, développé spécifiquement pour ce mégaprojet. Le défi était de dimensionner un mur de quai pour porte-conteneurs avec un tirant d'eau de 20,0 mètres pour un niveau de plateforme à plus de 7,0 mètres au-dessus du niveau des basses eaux. Plus récemment, l'estacade des nouveaux postes d'accostage P11 et P12 de *Calais Port 2015* ont également été exécutés avec le même système.

La question qu'il faut se poser est de savoir si malgré son impact environnemental non négligeable actuel, l'acier continuera à jouer un rôle majeur dans les futures structures portuaires. La réutilisation et la recyclabilité de l'acier plaident en sa faveur, mais pour répondre à cette question, ArcelorMittal a sollicité le bureau d'ingénierie belge *Tractebel* (groupe Engie) spécialisé dans l'ingénierie portuaire.

#### 4. Étude de cas : terminal de paquebots de croisière

*Tractebel* a choisi une géométrie typique de mur de quai pour un terminal de paquebots de croisière [1] qui représente une constellation où il est difficile de prédire quelle solution technique est la plus avantageuse. Le quai de 200 mètres de long serait construit dans un port belge tel qu'Anvers, avec un tirant d'eau de 13,0 mètres. Le niveau du terre-plein se trouve quant à lui à 5,0 mètres au-dessus du niveau moyen des basses eaux (+0,0 m), ce qui couvre les contraintes imposées par les plus gros paquebots de croisière actuels. Le niveau naturel du sol est à +0.0 m, de sorte que le dragage devant le mur sera effectué après l'exécution du mur. Des conditions de sol typiques de la côte belge ont été choisies (sables et argiles limoneuses). La durée de vie de la structure a été fixée à 50 ans.

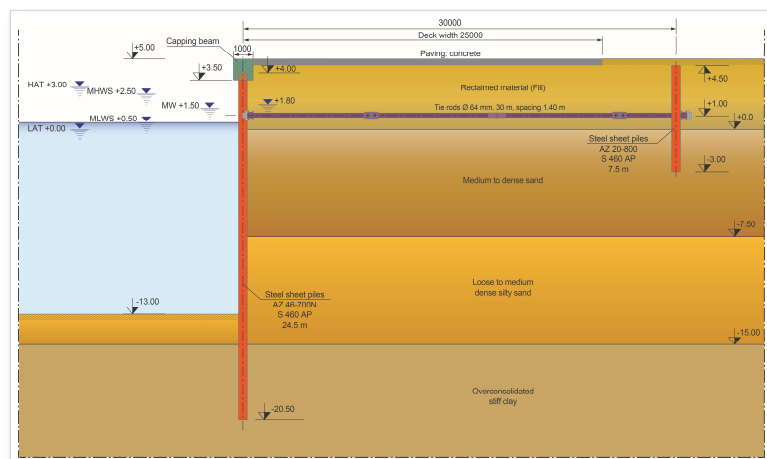


Figure 2. Coupe type du terminal de paquebots de croisière analysé.

Trois alternatives ont été étudiées en détail, à savoir un écran ancré en palplanches métalliques, un écran ancré en paroi moulée et un quai danois (dalle en béton sur pieux). Pour simplifier la comparaison, toutes ces structures sont réalisées avec des équipements terrestres.

Les écrans de soutènement sont conçus suivant l'Eurocode 7 – Partie 1, le dimensionnement des palplanches acier suit l'Eurocode 3 – Partie 5, alors que le dimensionnement des structures en béton se fait suivant l'Eurocode 2.

L'exécution dans cet environnement et dans ce type de sols peut être réalisée avec du matériel standard de mise en œuvre. Pour les palplanches, ce sont de puissants vibrofonçeurs ou marteaux hydrauliques, car le bruit et les vibrations ne constituent guère une gêne vu qu'il n'y a pas d'habitations aux alentours. Les méthodes d'installation composeraient un paramètre plus crucial dans un environnement urbain.

##### 1.1 Analyse technico-économique

La tâche principale des ingénieurs était d'optimiser chaque alternative en tenant compte de trois critères principaux : les aspects financiers, d'exécution, ainsi que des critères durables, en incluant la déconstruction et le recyclage des matériaux pour les solutions où cela est techniquement réalisable.

L'analyse économique montre que la solution en palplanches acier est environ 15% plus économique qu'une paroi moulée, alors que le quai danois est une solution bien plus coûteuse dans ce cas spécifique. Notons que la différence de coût s'élève à plus de 20% quand on tient compte de la déconstruction, et encore plus si l'on considère le retour sur investissement sur toute la durée de vie de la structure.

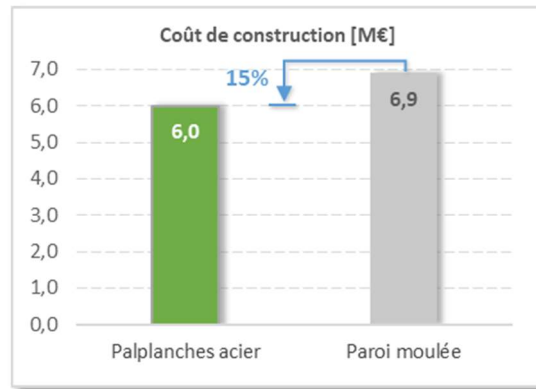


Figure 3. Comparaison des coûts de construction du mur de quai en fonction de l'écran.

De plus, la vitesse d'exécution de l'écran en palplanches est au moins 15% plus rapide que les alternatives, et comme cette tâche se trouve sur le chemin critique, elle augmente la différence de coût entre les solutions. Ces résultats sont en adéquation avec les retours d'entreprises de construction spécialisées dans le domaine portuaire. Notons toutefois que ces conclusions sont valables dans le cadre des hypothèses qui ont été faites et ne peuvent être transposées à d'autres types de structure, ni à d'autres pays, sans la considération de facteurs de correction. En Belgique et aux Pays-Bas le nombre important d'entreprises de battage et de bureaux d'études spécialisés dans ce domaine font en sorte que la palplanche acier est une solution fort économique. Les couches de sol peu compactes, voire très molles, ainsi que le niveau de la nappe phréatique contribuent également à l'essor de ces solutions acier dans ces deux pays.

## 1.2 Aspects environnementaux

L'impact environnemental d'une structure est actuellement encore trop peu souvent un critère de sélection dans les appels d'offres, bien que la directive européenne sur la passation des marchés publics de 2014 offre la possibilité de choisir *l'offre économique la plus avantageuse*, en incorporant dans le catalogue des critères d'attribution des caractéristiques environnementales ou sociales en plus des critères techniques. Etant donné que cette approche n'est pas encore ancrée dans la plupart des pays européens, le choix de tels critères peut mener à contestation, ce qui explique peut-être pourquoi les maîtres d'œuvre hésitent encore à introduire des critères environnementaux. Il existe différentes méthodes, chacune ayant ses avantages et inconvénients. Une Analyse du Cycle de Vie (ACV) a l'avantage d'être normalisée, bien qu'en fonction des matériaux de construction, elle est parfois sujette à interprétation. L'ACV d'un projet complet peut s'avérer fort complexe, mais il y a aussi moyen de simplifier l'ACV en se concentrant sur les matériaux et services qui contribuent le plus à l'impact environnemental, par exemple en se fixant un ordre de grandeur de par exemple 80%, et en négligeant dans un premier temps les éléments ayant un moindre impact.

Une ACV équitable se base sur des Fiches de Déclaration Environnementales et Sanitaires (FDES), de préférence d'un produit et d'un seul producteur. Cependant, on trouve actuellement principalement des FDES collectives qui regroupent des ACV de plusieurs producteurs, voire de plusieurs produits différents. Rappelons que les FDES pour le secteur de la construction doivent être conformes à la norme européenne EN 15804.

Le recours à des FDES spécifiques plutôt que collectives, en combinaison avec des critères écologiques, incitera sans aucun doute les producteurs à revoir la conception et la fabrication de leurs produits (eco-conception) s'ils veulent rester compétitifs.

Une Déclaration Environnementale de Produit (DEP) est l'équivalent d'une FDES française, à la différence que certains indicateurs d'une FDES ne sont pas repris dans une DEP standard. Par ailleurs, force est de constater que certaines DEP concernant les produits en acier ne sont pas élaborées de manière très rigoureuse et contiennent des erreurs qui laissent planer un doute quant à leur validité scientifique. La modélisation des flux dans l'industrie de l'acier est assez complexe (réutilisation, recyclage, etc) de sorte que ces EPD devraient être réalisés par des experts en la matière en collaboration très étroite avec les experts de usines.

Une constatation intéressante concernant les DEP et FDES : le logiciel utilisé pour effectuer l'ACV dans le cadre de l'élaboration d'une DEP, ainsi que la base de données utilisée, peut avoir une influence non négligeable sur les valeurs de certains indicateurs. Il est par conséquent recommandé d'utiliser dans la mesure du possible des DEP et FDES cohérentes, de préférence issues d'un même titulaire du programme de DEP, et contenant tous les modules (du berceau à la tombe). En France il s'agit des FDES de l'INIES, mais étant donné que d'autres pays requièrent également des DEP spécifiques au pays, la tâche des producteurs actifs à l'international n'est pas des plus simples.

### 1.3 Analyse du Cycle de Vie (ACV)

Dans le cadre de l'étude effectuée par *Tractebel*, l'ACV a été réalisée par le département de la R&D d'ArcelorMittal sur base des listes de matières fournies par *Tractebel*. Cette ACV a fait l'objet d'un examen par un panel de trois experts indépendants qui ont validé la méthodologie et les résultats obtenus [2], conformément aux normes ISO en vigueur lorsqu'il s'agit de comparer différentes solutions. Cette analyse assez détaillée démontre que dans le cas particulier étudié, le potentiel de réchauffement global (PRG, exprimé en émissions de CO<sub>2</sub>-éq) de la solution palplanches acier est inférieur d'environ 45% à celui de la paroi moulée.

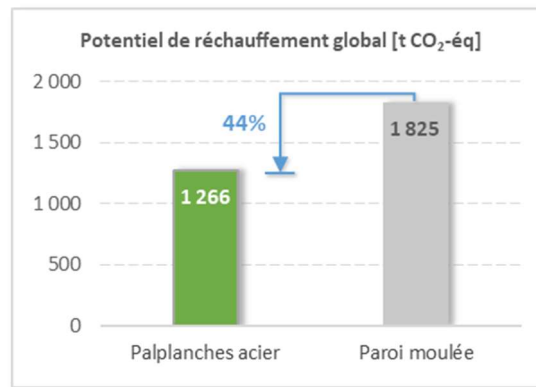


Figure 4. Critère environnemental : potentiel de réchauffement global (gaz à effet de serre GES).

L'ACV spécifique au projet a considéré tout le cycle de vie, à commencer par la production (du berceau à la porte), l'installation et la déconstruction après la durée de vie, le recyclage de l'acier, ainsi que le transport des principaux matériaux de construction. De manière générale, on peut affirmer que le transport ainsi que l'installation ont un faible impact sur le résultat comparé à la production de l'acier et du béton. La maintenance n'a pas une grande influence non plus. Cela n'empêche pas d'imposer des critères sur le transport pour favoriser le transport multimodal chaque fois que cette alternative a du sens.

Une caractéristique intéressante des palplanches en acier est qu'elles peuvent être récupérées facilement et réutilisées (bien que cela soit assez rare après 50 ans) et recyclées à 100%. L'ACV suppose que les palplanches acier seront récupérées à 99% et recyclées à 100%, alors que pour la solution en béton, seule une partie pourrait l'être.

L'ACV a été faite avec la DEP des palplanches en acier *EcoSheetPiles™* d'ArcelorMittal publiée par l'Institut allemand IBU, alors que pour les autres éléments tel que les ronds à béton, le béton, etc... l'expert a utilisé également des DEP de l'IBU afin de ne pas introduire de distorsions dues aux méthodes de calcul des DEP. Bien que les gaz à effet de serre (GES) soient actuellement la préoccupation principale, d'autres indicateurs environnementaux ne devraient pas être négligés. Ceux-ci ont également été analysés, et en général, la tendance pour ces indicateurs est identique à celle du CO<sub>2</sub>-éq, à l'exception de deux indicateurs dont le potentiel pour la dégradation abiotique de ressources fossiles.

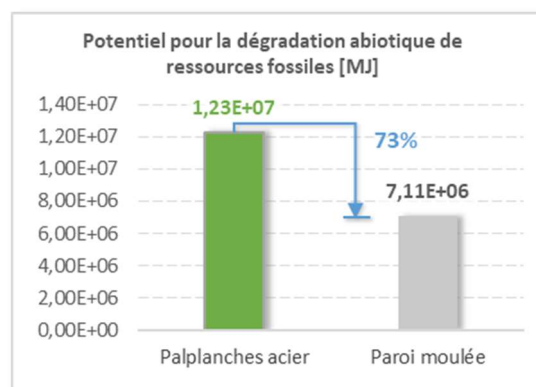


Figure 5. Critère environnemental : potentiel pour la dégradation abiotique de ressources fossiles

Par ailleurs, une ACV comprend une étude de sensibilité dans laquelle on fait varier les paramètres les plus pertinents afin de vérifier la sensibilité de l'analyse effectuée. La variation de ces paramètres n'a pas changé de façon notable les résultats. Notons cependant que les bétons à bas carbone n'ont pas été considérés à cause de la problématique autour de la non-considération des impacts des scories d'aciérie utilisées dans les ciments à bas carbone. C'est un thème qui est en cours de résolution au niveau européen.

Nous allons décrire brièvement dans le prochain chapitre la méthode hollandaise qui permet de valoriser différents indicateurs environnementaux.

## 1.4 L'optimisation de l'ingénierie à la rescousse de solutions durables

L'objectif de neutralité carbone en quelques décennies est un défi. Comme indiqué précédemment, l'amélioration, la réutilisation et le recyclage des produits peuvent réduire considérablement la consommation de ressources naturelles, mais l'optimisation de la conception est une autre technique permettant de diminuer sensiblement l'empreinte carbone sans mettre en péril la sécurité de l'ouvrage. L'optimisation peut être atteinte en développant des solutions innovantes, en améliorant les normes de conception, etc. Par exemple, du point de vue purement écologique, il serait préférable d'analyser plusieurs coupes transversales d'un ouvrage très long afin d'optimiser le dimensionnement en fonction des propriétés variables du sol le long de l'ouvrage. L'optimisation peut certes nécessiter des ressources humaines et financières supplémentaires, mais elle préserve les ressources naturelles, et par conséquent la nature.

Des concepts novateurs, tels que les murs de quai avec deux niveaux d'ancrage, dont au moins un se situe sous le niveau de l'eau, ont été utilisés il y a quelques décennies en France et dans d'autres pays. Étant donné que les procédures d'installation sont plus complexes et parfois plus risquées, ces solutions ont été abandonnées dans la plupart des pays. Il y a quelques exceptions, comme au Danemark, où une poignée d'entrepreneurs installent encore des tirants quelques mètres sous le niveau des basses eaux. Le dernier projet connu est un mur de quai dans le port de Kalundborg (2017).

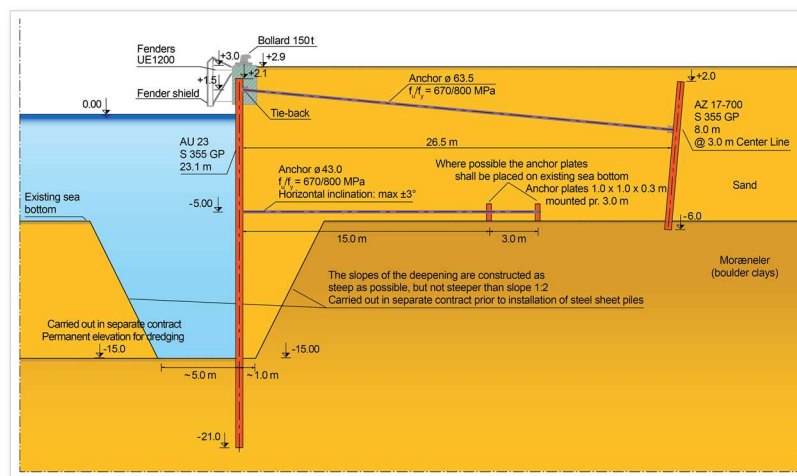


Figure 6. Mur de quai avec deux niveaux d'ancrage - Port de Kalundborg, Danemark (2017).

L'avantage indéniable de cette solution est la réduction significative des moments de flexion et de la longueur des palplanches. Cette solution permet à fortiori d'utiliser un mur de palplanches standard (de type U ou Z) au lieu d'un système de paroi combinée plus lourd tel que le système HZ-M/AZ. Ceci permet de réaliser des économies substantielles en termes de coût et de consommation d'acier.

Le principal inconvénient de l'optimisation au niveau de la conception est la perte de flexibilité dans le futur, par exemple en cas de réaménagements ou de modification de l'utilisation de la structure (en raison de charges variables plus élevées, etc.).

## 5. Valorisation des critères environnementaux

Un aspect difficile pour évaluer l'offre économiquement la plus avantageuse est la valorisation des critères d'attribution environnementaux. La *monétisation* est une méthode simple et plus ou moins équitable pour transformer un critère environnemental (ou plusieurs) en un système monétaire. Les Pays-Bas ont développé une telle méthode et l'appliquent depuis plusieurs années pour les projets d'infrastructure de grande envergure. A ce stade, la méthode est bien rodée, et malgré quelques incohérences dans certains appels d'offres, l'attribution des marchés publics y a recours de plus en plus souvent. Les grandes entreprises se sont rapidement dotées des compétences nécessaires à proposer des solutions écologiques afin de pouvoir profiter des conditions qui favorisent cette démarche. En effet, les pouvoirs publics accordent un crédit « fictif » aux entreprises qui arrivent à proposer des solutions avec un index environnemental dénommé MKI (abréviation de *MilieuKostenIndicator* en hollandais) en dessous de celui calculé pour la solution de base de l'appel d'offre. Ce crédit varie en fonction du maître d'ouvrage et des projets, mais en règle générale il est de l'ordre de 5%. En gros le maître d'ouvrage est prêt à déboursé jusqu'à 5% en plus par rapport à une solution écologiquement



équivalente à celle de l'appel d'offre, le crédit étant proportionnel à la réduction de l'impact environnemental escompté.

L'index MKI est le fruit de la multiplication des valeurs des 11 indicateurs environnementaux principaux des DEP hollandaises (*MRPI - Stichting Milieu Relevante Product Informatie*) par un facteur de pondération de l'indicateur en question. Par exemple, le facteur de pondération d'une tonne d'émissions d'équivalent CO<sub>2</sub> est de 50 € dans la méthode hollandaise [3]. Cependant, chaque maître d'ouvrage est libre de modifier ces facteurs de pondération s'il veut mettre en exergue un indicateur bien particulier. En général, l'influence des gaz à effet de serre est prépondérante, de l'ordre de 50% pour les aciers.

Le calcul de cet index se fait à l'aide du logiciel *DuboCalc* développé par un institut public, ou de tout autre logiciel agréé, mais la base de données que l'on peut utiliser est unique, ce qui met tous les acteurs sur un pied d'égalité. Une autre singularité est qu'il y a plusieurs catégories de DEP dans cette base de données nationale, et que les DEP non spécifiques à un produit (ceux de catégorie 3) sont pénalisés par l'augmentation de l'index MKI par une valeur forfaitaire de 30%. Le but est d'inciter les producteurs à justement élaborer et publier des DEP spécifiques, et indirectement à réduire leur impact environnemental s'ils veulent rester concurrentiels. Ce genre d'incitations équitables interpellent l'ensemble de la chaîne industrielle, du fabricant aux entrepreneurs. Cette méthode permet également de favoriser les modes de transport à faibles émissions (voies navigables et rail) et les circuits de livraison courts.

Prenons un exemple concret des aciers produits dans la filière électrique au Luxembourg : les fours électriques qui transforment la ferraille en acier liquide sont très gourmands en énergie électrique, et le passage à du courant provenant exclusivement de ressources renouvelables permet de réduire de 15% à 20% les émissions de CO<sub>2</sub>-éq. Vu que cette énergie verte est plus chère, les soumissionnaires sont prêts à payer le prix fort s'ils ne sont pas pénalisés par rapport à d'autres entreprises qui se préoccupent moins de l'environnement. D'où l'intérêt de l'approche implémentée par les autorités hollandaises.

## 6. Conclusions

La conception et l'exécution de nouvelles structures portuaires doivent prendre en compte leur impact sur le changement climatique. Outre les défis techniques ainsi que de nouveaux paramètres tel que l'élévation du niveau de la mer, les critères environnementaux constituent aujourd'hui un paramètre essentiel.

Une étude de cas comparant trois alternatives a été réalisée par le bureau d'ingénierie *Tractebel*. Elle porte sur un terminal de paquebots de croisière à construire dans un port maritime en Belgique. L'indicateur de performance choisi est **le coût total du cycle de vie** du mur de quai, et inclue la maintenance, la déconstruction et le recyclage potentiel des matériaux de construction. L'analyse montre que dans le cadre des hypothèses qui ont été considérées, pour une durée de vie de l'ouvrage de 50 ans, un mur de quai de 200 mètres de long construit avec des palplanches acier est 20% plus économique qu'une paroi moulée. Parmi les autres avantages, citons la réduction de 15% du temps d'exécution. Le troisième paramètre principal étudié est l'impact environnemental, pour lequel l'écran en palplanches acier a une empreinte carbone sensiblement plus faible (44% d'émissions de CO<sub>2</sub>-éq en moins). L'acier est un matériau durable et respectueux de l'environnement en raison de ses excellentes propriétés mécaniques, mais aussi de son caractère réutilisable et recyclable.

L'étude a également mis en évidence un défi majeur : le secteur de la construction devra appliquer une méthode simple et équitable capable d'inclure les impacts environnementaux dans le coût total du cycle de vie. Les investisseurs privés et publics joueront un rôle primordial dans ce processus décisionnel complexe, car la solution la plus respectueuse de l'environnement est rarement celle qui est la moins chère.

## 7. Références

- [1] 2019 *Methodic Comparison of Retaining Wall solutions – P011348* (Belgique: Tractebel Engineering)
- [2] 2019 *Comparative study of Steel Sheet Pile and Concrete Slurry wall in quay infrastructure application – Life Cycle Assessment methodological report* (Luxembourg: ArcelorMittal R&D)
- [3] 2019 *Determination Method – Environmental performance – Buildings and civil engineering works, Version 3.0* (Rijswijk, Pays Bas: Stichting Bouwkwaliiteit)