

Analyse du cycle de vie de la rénovation d'un réservoir confiné dans une station d'épuration

Michel Donadio¹, Catrina Heider², Zeno Dan³

¹Sika Services AG, Suisse

²Sika Technology AG, Suisse

³Sika Europe Management AG, Suisse

APERÇU : Ce document présente une Analyse du Cycle de Vie (ACV) de trois scénarios de rénovation de structures confinées dans une station d'épuration : le premier avec un mortier de réparation à base de ciment Portland traditionnel, le second avec ce même mortier de réparation base ciment complété par un revêtement de protection réactif, et le dernier à l'aide d'un mortier de réparation utilisant une technologie 100 % aluminat de calcium. L'objectif de cette analyse était d'évaluer la durabilité et l'impact environnemental potentiel de chacun de ces scénarios selon trois critères : la demande cumulée en énergie (DCE), le potentiel de réchauffement planétaire (PRP), et le potentiel de formation d'ozone troposphérique. La comparaison et l'analyse des résultats, notamment en ce qui concerne l'allongement de la durée de fonctionnement des structures, ont permis de mettre en évidence les atouts de ces systèmes innovants pour les maîtres d'œuvre et les entrepreneurs, et par ricochet pour leurs clients.

1 Introduction

Les surfaces exposées à l'air des égouts et des réservoirs confinés des stations d'épuration sont très sujets à la corrosion biogénique. Cette corrosion biogénique [1] résulte de la transformation des sulfates présents dans les eaux usées domestiques en sulfure d'hydrogène puis en acide sulfurique sous l'action de diverses bactéries.

L'acide sulfurique se révèle particulièrement agressif pour les supports minéraux. Les systèmes de réparation des bétons contenant des résines réactives utilisés traditionnellement requièrent des surfaces saines et une application sans défauts, des conditions qui sont rarement réunies dans des environnements aussi contraignants.

Ces 20 dernières années, la rénovation de ce type de structures avec des mortiers 100 % aluminat de calcium (ciment et agrégats) a produit d'excellents résultats. Cette technologie présente en effet l'avantage de bloquer la transformation de sulfure d'hydrogène en acide sulfurique, comme l'ont démontré différentes publications [1], [2], [3].

Le choix d'une stratégie adéquate de réparation alliée à un produit de qualité permet non seulement de réduire considérablement la fréquence des rénovations, mais également d'accroître la longévité des structures et la performance économique globale des constructions.

La durabilité des rénovations est donc corrélée aux trois piliers du développement durable (social, économique et environnemental), et tient à plusieurs

paramètres : matériaux entrant, gain de temps, coût économique et impact environnemental.

Ce document compare les résultats de trois scénarios de rénovation d'un réservoir confiné (1000 m²) évalués sous trois angles : impact environnemental, longévité, et rapport coût/efficacité.

2 Méthode

L'analyse du cycle de vie (ACV) [4] est une méthode visant à quantifier et évaluer l'impact potentiel sur l'environnement tout au long du cycle de vie du produit : d'abord de l'extraction des matières premières à la production et à la mise en œuvre du produit ; puis, le cas échéant, de l'utilisation du produit à son traitement en fin de vie : déchet, incinération ou recyclage. C'est l'approche « du berceau à la tombe » selon la norme ISO 14044 (ISO 2006). Dans la présente étude, l'analyse porte sur le module de production (« du berceau à la sortie de l'usine ») et le prétraitement de la surface.

Pour un fabricant de matériaux de construction, l'ACV permet d'élaborer un profil environnemental quantitatif dans un contexte défini qui aidera notamment à apporter des améliorations ou à distinguer entre des produits et solutions en fonction de leurs bénéfices potentiels pour l'environnement. L'ACV des systèmes et produits de rénovation a été réalisée par le département Durabilité des produits du Groupe Sika selon les normes ISO 14044 (ISO 2006) et EN 15804 (CEN/TC 350 2012).

3 Champ de l'analyse

L'unité fonctionnelle choisie pour l'ACV est la rénovation d'un réservoir confiné sélectionné de manière aléatoire dans une station d'épuration des eaux usées, d'une surface de 1000 m² et sur une durée de 50 ans.

L'étude part de l'hypothèse que les surfaces exposées à l'air de la structure de ce réservoir sont sujettes à la corrosion biogénique. Pour réaliser l'ACV, il a fallu procéder à une analyse d'inventaire, qui consiste à collecter et calculer des données pour quantifier les entrants et les sortants impliqués dans chaque système.

Effectuée par le fabricant des produits, la collecte de données a porté sur des données mesurées ou qualifiées touchant notamment à la formulation des produits, à leur transport, à leur conditionnement et à leur production. Les systèmes ont ensuite été modélisés dans le logiciel d'ACV GaBi 8.7.0 sur la base des données collectées ainsi que d'éléments issus de bases de données publiques comme celles d'ELCD (European Reference Life Cycle Database), de Thinkstep et d'Ecoinvent. Le transport des matériaux sur le site, leur mise en œuvre (à l'exception du prétraitement de surface) et leur traitement en fin de vie ont été exclus de cette ACV.

Dans la phase d'évaluation de l'impact, les données d'inventaire sont ensuite associées aux catégories d'impact environnemental (utilisation de la méthode CML 2001). Pour cet exemple, trois catégories d'impacts ont été considérées comme particulièrement pertinentes car correspondant aux indicateurs de durabilité des rénovations ; il s'agit de l'empreinte carbone, de l'efficacité de l'utilisation des ressources (et énergétique), et des émissions de polluants (également liées à la santé et la sécurité des ouvriers).

3.1 Demande cumulée en énergie (DCE)

La demande cumulée en énergie correspond à la somme totale des énergies primaires issues de sources renouvelables et non renouvelables. Elle est mesurée en MJ.

3.2 Potentiel de réchauffement planétaire (PRP sur 100 ans)

Le potentiel de réchauffement planétaire évalue la contribution potentielle des émissions de gaz à effet de serre au changement climatique. Il est mesuré en kg (ou tonnes) équivalent CO₂ (dioxyde de carbone) à un horizon de 100 ans.

3.3 Potentiel de formation d'ozone troposphérique (POCP)

Le potentiel de formation d'ozone troposphérique correspond à la contribution potentielle au « smog estival », qui résulte notamment de l'ozone formé par l'action des rayons du soleil sur des composés organiques volatils (COV) et des oxydes d'azote (NOx). Il est mesuré en kg équivalent éthylène.

4 Scénarios de rénovation analysés

Les différents systèmes ont fait l'objet de calculs sur une période de 50 ans en partant d'une surface arbitraire de

1000 m². Les scénarios et les produits utilisés sont détaillés ci-dessous.

4.1 Description des scénarios

L'étude a comparé trois scénarios différents. Le premier scénario est celui d'une rénovation à l'aide d'un mortier de réparation du béton à base de CEM III de classe R4 selon EN 1504-3 (classe la plus élevée, ciment résistant aux sulfates). Sur la base des observations sur site et de l'analyse en laboratoire, il a été estimé que la couverture de la surface totale sur une épaisseur de 50 mm devrait être renouvelée tous les 7 ans afin de protéger les barres d'acier de renforcement contre la corrosion.

Le second scénario utilise un mortier CEM III modifié aux polymères de classe R4 selon EN 1504-3, complété par un revêtement en ciment et résine époxy qui crée une barrière temporaire contre l'humidité et dont la surface lisse permet d'appliquer un enduit de protection en résine époxy 100 % solide. Sur la base des observations sur site, nous avons estimé qu'un remplacement serait nécessaire tous les 10 ans.

Le troisième scénario s'appuie sur un mortier de réparation utilisant la technologie aluminat de calcium (tant la matrice cimentaire que les agrégats étant à base d'aluminat de calcium). La matrice aluminat empêchant la transformation de l'H₂S en acide sulfurique [1], la durabilité à long terme [6] est atteignable ; pour cette ACV, nous avons estimé qu'un seul remplacement serait nécessaire sur la période définie de 50 ans.

4.2 Détails de l'application

4.2.1 Scénario 1

Rénovation tous les **7 ans** avec le mortier de réparation ; aucun revêtement de protection après l'application :

- Préparation de la surface par jet d'eau haute pression
- Reprofilage avec le mortier de réparation sur 50 mm, projection par voie humide (100 tonnes par rénovation).

4.2.2 Scénario 2

Rénovation tous les **10 ans** avec le mortier de réparation ; revêtement de protection à base de résine époxy après l'application :

- Préparation de la surface au jet d'eau haute pression
- Reprofilage avec le mortier de réparation sur 25 mm, projection par voie humide (50 tonnes par rénovation)
- Resurfacement et pare-humidité temporaire sur 3 mm d'épaisseur, projection par voie humide (1030 kg par rénovation)
- Protection du béton avec 2 couches de revêtement époxy, @500g/m² par couche, application airless.

4.2.2 Scénario 3

Une seule rénovation sur la période définie :

- Préparation de la surface par jet d'eau haute pression
- Reprofilage avec le mortier de réparation du béton à base d'aluminat de calcium sur 25 mm, projection par voie humide (60 tonnes).

4.3 Description des produits

Tableau 1 : Matériaux de rénovation utilisés

Type de produit	Description
Scénario 1	
Mortier de réparation	Mortier de réparation mono-composant, non modifié aux polymères (CC), de classe R4 selon EN 1504-3
Scénario 2	
Mortier de réparation	Mortier de réparation mono-composant, modifié aux polymères (PCC), de classe R4 selon EN 1504-3
Mortier de resurfaçage	Mortier de resurfaçage tri-composant conforme à la norme EN 1504-3 et -2, ne requérant pas de séchage et permettant un revêtement rapide à l'aide d'une résine époxy
Résine époxy	Revêtement de protection conforme à la norme EN 1504-2 – 100 % de corps solides
Scénario 3	
Mortier de réparation	Mortier de réparation mono-composant, 100 % aluminat de calcium, de classe R4 selon EN 1504-3

5 Résultats de l'ACV

L'ACV est une analyse complexe. Par souci de simplification, une partie de l'étude est résumée dans des graphiques représentant les impacts généraux sur les trois catégories (voir fig. 1, 2, 3, 4 & 5).

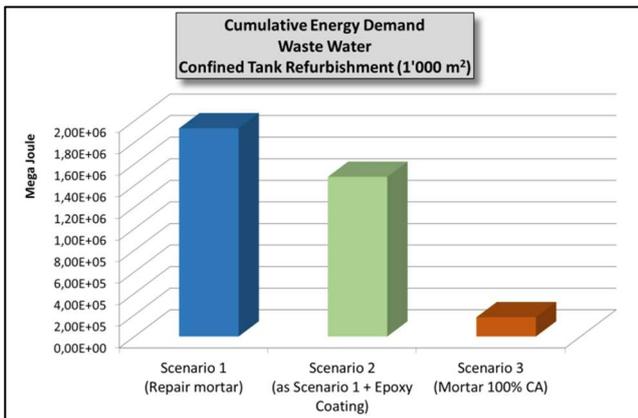


Fig. 1 : Demande cumulée en énergie (DCE) sur une période de 50 ans.

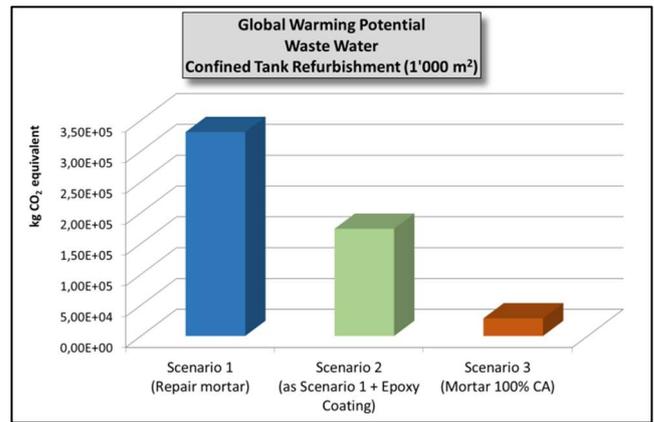


Fig. 2 : Potentiel de réchauffement planétaire (PRP) sur une période de 50 ans.

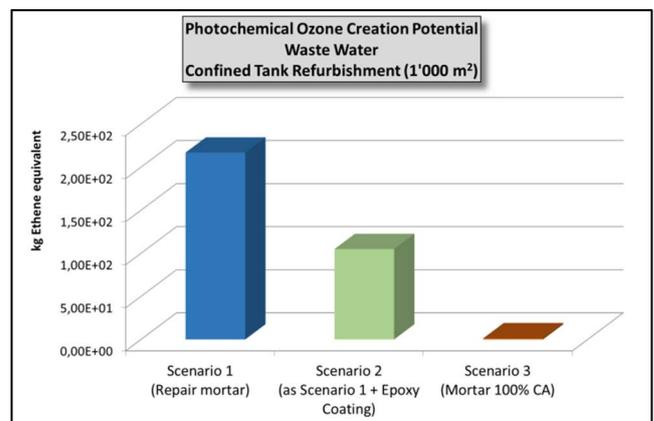


Fig. 3 : Potentiel de formation d'ozone troposphérique sur une période de 50 ans.

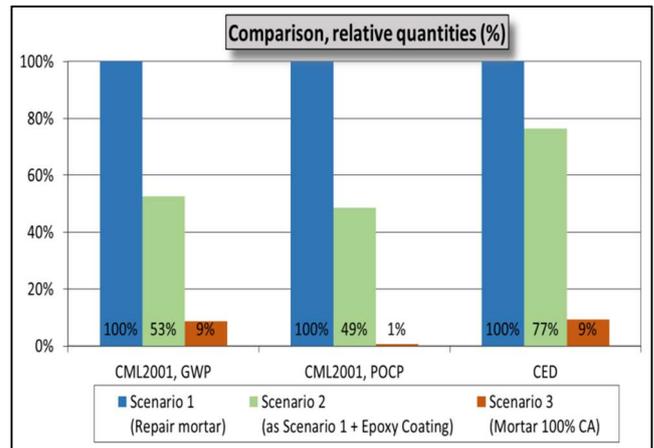


Fig. 4 : Comparaison relative des trois catégories – Le scénario 1 servant de référence.

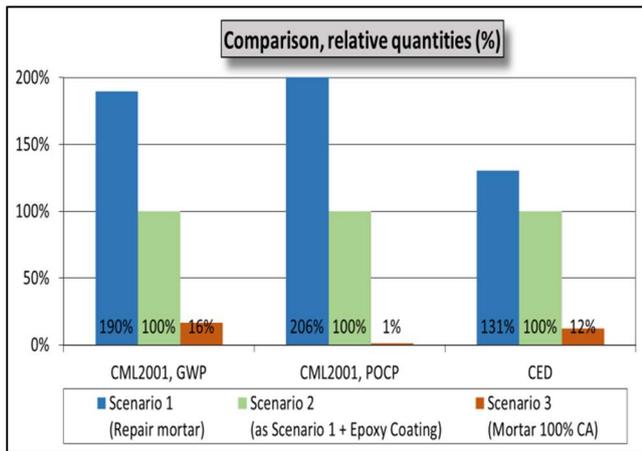


Fig. 5 : Comparaison relative des trois catégories – Le scénario 2 servant de référence.

6 Discussion

6.1 Scénario-1

Comparé aux deux autres scénarios, le scénario-1 est celui qui a le plus d'impact sur l'environnement, dans les trois catégories. Ce résultat tient à la répétition nécessaire de la rénovation, les systèmes basés sur un ciment Portland ordinaire étant tous particulièrement sensibles aux attaques acides dues à l'activité biogénique.



Fig. 6 & 7 : Mortier OPC contenant des cendres volantes, des fumées de silice et utilisant du sable de silice après 1 an en chambre d'incubation simulant la corrosion biogénique ; la photo de gauche montre le cube au début du test, celle du milieu, 1 an après (3).

Fig. 8 : La photo de droite montre un grand collecteur près de Paris dont la réparation s'effrite sans difficulté en raison de sa dégradation par la corrosion biogénique, quelques années seulement après sa mise en œuvre.

6.2 Scénario-2

Le scénario 2 révèle également un impact significatif dans chacune des trois catégories, mais inférieur au scénario 1.

Le système comprend en effet des matériaux à base de résine époxy qui ont un impact environnemental.

En outre, la répétition nécessaire de la réparation, à une fréquence relativement élevée, vient alourdir cet impact.



Fig. 9 : Photo prise en Israël, où un système similaire au scénario 2 a présenté une détérioration précoce, 5 ans après sa mise en œuvre.

6.3 Scénario-3

Le scénario 3 est celui qui présente l'impact le plus faible sur l'environnement dans les trois catégories.

Ce résultat est dû à la longue durée de fonctionnement ainsi qu'à la longévité du mortier de réparation à base d'aluminate de calcium dans ce type d'environnement. Les analyses en chambre d'incubation [6] et en conditions réelles similaires ont mis en évidence une vitesse de dégradation très réduite pour ces mortiers.

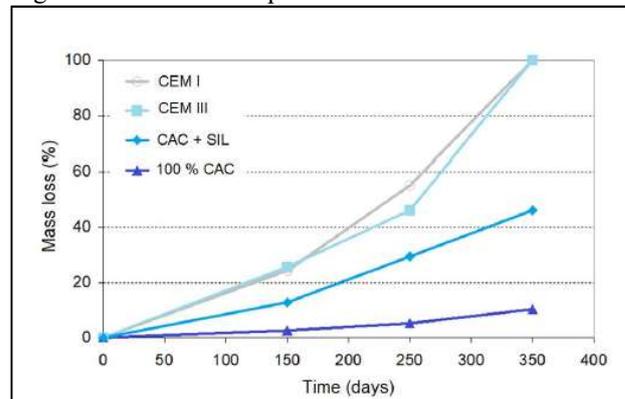


Fig. 10 : Évolution de la perte de masse de quatre matériaux cimentieux placés dans la chambre de simulation de Hambourg [6] pendant un an.



Fig. 11 : Cube de mortier 100% CAC placé dans la chambre de simulation de Hambourg [6] pendant 1 an. La photo de gauche a été prise au début de l'étude, celle de droite un an plus tard.

6.4 Demande cumulée en énergie

Le scénario 3 présente l'impact le plus faible en termes de demande cumulée en énergie provenant de sources renouvelables et non renouvelables.

Comparé au scénario 1, l'économie d'énergie annuelle résultant de l'utilisation d'un mortier 100 % aluminate de calcium est équivalente à l'énergie nécessaire pour produire ~40 tonnes de pétrole (et pour produire ~28 tonnes de pétrole comparé au système utilisé dans le scénario-2).

6.5 Potentiel de réchauffement planétaire

L'utilisation de la technologie 100 % aluminat de calcium minimise la contribution potentielle au changement climatique en réduisant de manière significative les émissions de dioxyde de carbone.

Comparé au scénario-1, l'économie annuelle de CO₂ générée par l'utilisation d'un mortier 100 % aluminat de calcium équivaut aux émissions de CO₂ produites par le transport de 24,7 tonnes (capacité typique d'un camion) de marchandise par camion sur plus de ~150 000 km, soit plus de trois fois la circonférence de la Terre (quantité réduite de moitié pour le scénario-2 avec ~67 000 km).

6.6 Potentiel de formation d'ozone troposphérique

Le scénario-3 est celui dont l'impact sur le potentiel de formation d'ozone est le plus faible.

Comparé au scénario-1, la réduction des émissions de COV par an induites par l'utilisation d'un mortier 100 % aluminat de calcium équivaut à une économie de ~115 tonnes d'enduit base solvant (ce chiffre étant de ~49 tonnes comparé au scénario-2).

7 Conclusion

La corrosion biogénique est un phénomène croissant dans les égouts et les stations d'épuration des eaux usées en raison de plusieurs facteurs (réduction de la consommation d'eau, réduction des odeurs conduisant à la fermeture de nombreux réservoirs à ciel ouvert, etc.).

Les observations *in situ* ont révélé des défaillances répétées des systèmes traditionnels tels que ceux décrits dans les scénario-1 et scénario-2, qui ont conduit à des séquences de rénovation répétées.

La répétition de ces procédures de rénovation a non seulement des répercussions économiques (coût des matériaux, arrêts temporaires, dérivation, etc.), mais également un impact significatif sur l'environnement.

L'utilisation d'une technologie 100 % aluminat de calcium adaptée pour rénover des surfaces endommagées ou pour protéger des structures neuves permet de réaliser des économies significatives. En effet, cette technologie bloquant la production d'acide sulfurique, les surfaces en béton de la partie exposée à l'air de la structure ne seront plus sujettes à la corrosion biogénique une fois la mise en œuvre achevée.

Outre ces économies substantielles de temps et d'argent, l'utilisation de ce type de mortier réduit de manière significative l'impact environnemental (réductions de 90 à 99% comparé au scénario-1 - cf. Fig. 4 ci-dessus ; et de 98 à 83 % comparé au scénario-2 – cf. Fig. 5 ci-dessus).

Pour conclure, comparé aux solutions traditionnelles, les résultats de l'utilisation d'un système axé sur la durabilité pour la rénovation de réservoirs confinés potentiellement sujets à la corrosion biogénique sur une durée de fonctionnement de 50 ans peuvent être résumés comme suit :

- Meilleures performances = réduction de la fréquence et de l'ampleur des rénovations = bénéfices environnementaux, économies de matériaux, de temps et de coûts
- Économies d'énergie (équivalentes à ~40 tonnes de pétrole)
- Réduction des émissions de carbone (équivalente au transport par un poids lourd à pleine charge sur ~150 000 km)
- Réduction des émissions de COV (équivalente à une économie de ~115 tonnes de peinture à base de solvants).

Références

1. J. Herisson, Thèse, *Bio-degradation of cement material in sewer refurbishment – comparative study of aluminat cement and Portland cement*. (2012)
2. F. Saucier et al., *Use of Calcium Aluminat Technology*; The Institute of Concrete technology, (Year book 2015-2016)
3. V.A. Geoffroy et al., *Calcium Aluminat Cements: Proceeding of the Centenary Conference*, Fentiman CH, Mangabhai RJ and Scrivener KL. (éditeurs), (2008)
4. CEN/TC 350 2012, *Sustainability of construction works - Environmental product declarations - core rules for the product category of construction products*, EN 15804:2012, (2011).
5. GabBi 8.7.0; *Software-System and Database for Life Cycle Engineering*. Thinkstep AG (Leinfelden-Echterdingen), (1992-2018)
6. S. Ehrlich & all, *Journal of Materials in Civil Engineering, Biogenic and Corrosion Sulfuric Acid Corrosion of Mortars*, (1999)