

Une modélisation qualité pour l'économie circulaire de l'Eau Industrielle

Janv.
2024



AAP ZIBAC - Projet DKarbonation - Bâtir
un territoire leader de la décarbonation
industrielle

1. Introduction

Depuis 1973, le service d'eau industrielle accompagne le développement industriel de la région dunkerquoise en assurant l'approvisionnement en eau des grandes entreprises du secteur portuaire. Ce réseau, alimenté par de l'eau brute prélevée dans le canal de Bourbourg, permet de substituer l'eau potable dans les procédés industriels, contribuant ainsi à la préservation de cette ressource. Géré par le Syndicat de l'Eau du Dunkerquois (SED), il dessert aujourd'hui 16 industriels de la zone industrielle et portuaire de Dunkerque, avec une production qui s'élève à 22,6 millions de m³ en 2024.

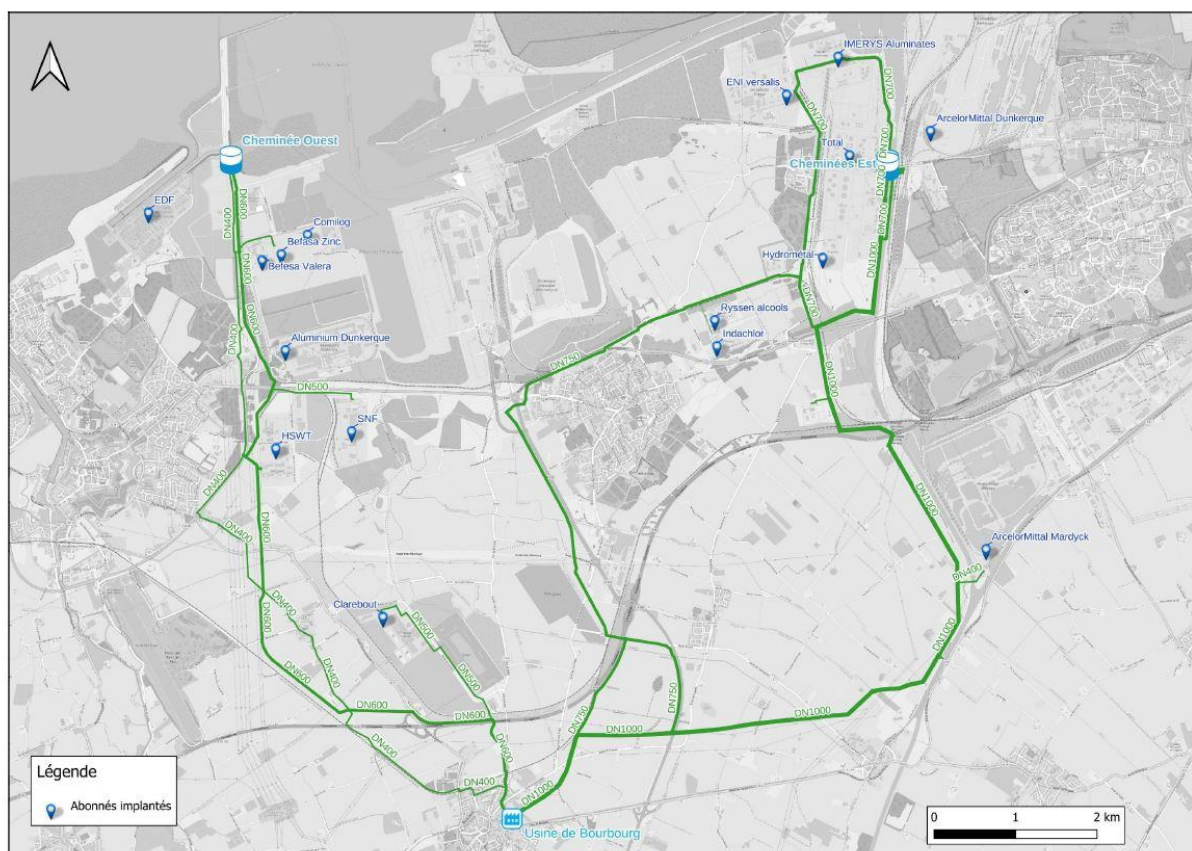


Figure 1 Réseau d'Eau Industrielle avec la Branche Est et la branche Ouest

Le territoire Dunkerquois s'investit activement dans la promotion de l'écologie industrielle et dans la mise en œuvre de principes d'économie circulaire appliqués à la gestion de l'eau. Les études menées jusqu'à présent ont permis de mettre en lumière des solutions innovantes, telles que la réutilisation des eaux de rejet issues des activités industrielles. Cette réutilisation peut s'effectuer soit directement entre différents sites industriels, soit par la réinjection de ces eaux dans le réseau d'Eau Industrielle existant. Une telle démarche contribue à réduire significativement la pression exercée sur la ressource en eau de surface.

2. Objectifs de l'étude

À ce jour, un potentiel de réinjection dans le réseau d'eau industrielle de près de 3 millions de m³ d'eau a été identifié. La réutilisation potentielle de ce volume d'eau impacterait positivement la ressource en eau et pourrait contribuer au développement des solutions de décarbonation basées sur l'utilisation de l'eau industrielle au sein de la ZIBaC.

Afin de poursuivre l'exploration et le développement de ces synergies, il apparaît indispensable d'intégrer un module qualité à la modélisation hydraulique du réseau d'eau industrielle. Ce module a pour objectif d'évaluer précisément l'impact de la réinjection sur la qualité de l'eau distribuée au sein du réseau.

Le module qualité devra permettre de mesurer la capacité du réseau à intégrer et accepter des ressources en eau de nature différente. Il devra également valider certaines hypothèses relatives à la réinjection directe, permettre l'évolution de scénarios existants et en concevoir de nouveaux, en fonction des besoins et des objectifs du territoire.

La modélisation de la qualité de l'eau, conçue comme un outil numérique évolutif, constituera un élément essentiel pour éclairer la prise de décision en matière d'écologie industrielle appliquée à la gestion de l'eau. Elle s'inscrit pleinement dans la dynamique de l'économie circulaire de l'eau, en tant que levier majeur au service de l'accompagnement et de la transformation industrielle du territoire Dunkerquois.

Dans cette perspective, le Syndicat de l'Eau du Dunkerquois (SED) a engagé un marché d'Assistance à Maîtrise d'Ouvrage, confié à SUEZ Consulting, pour la réalisation de cet outil. Le SED a ainsi exprimé le souhait que le modèle développé permette de mesurer l'impact de la réinjection sur la qualité du flux d'eau industrielle, en prenant en compte plusieurs paramètres spécifiques.

Les paramètres spécifiques sont les suivants :

pH	DCO
Température	Arsenic
Turbidité	Cadmium
Conductivité	Chrome
Nitrate	Cuivre
Nitrite	Nickel
Ammonium	Plomb
Chlorure	Zinc
Sulfate	Manganèse
Dureté	Fer
TAC	Mercure
Matières en suspension	Indice hydrocarbure
Calcium	Lithium
Magnésium	Orthophosphates
Sodium	Fluorure
Potassium	Bromure

En complément, il a été demandé au prestataire de mettre à l'épreuve le module qualité développé à travers l'examen de sept scénarios distincts. Cette démarche vise à s'assurer de la capacité du modèle à évaluer de manière fiable l'impact de différentes hypothèses de réinjection sur la qualité de l'eau industrielle.

Par ailleurs, la formation des agents du SED a été prévue afin de leur permettre une prise en main autonome du modèle. Cette étape garantit que les équipes du SED disposent des compétences nécessaires pour poursuivre les études et analyses de manière indépendante, assurant ainsi la pérennité des actions engagées et l'adaptabilité du territoire face aux enjeux futurs de gestion de l'eau industrielle.

3. Méthodologie

L'étude s'est déroulée en cinq grandes étapes :

1. Collecte et analyse des données : Mise à jour du modèle hydraulique du réseau avec les dernières données et mesures.
2. Construction du module qualité : Intégration de 32 paramètres physico-chimiques pour simuler la qualité de l'eau industrielle selon différents scénarios (période estivale, période hivernale, période pluviale).
3. Définition des scénarios de réinjection : Construction de 7 scénarios avec différents points et volumes d'injection en intégrant les données disponibles sur la qualité des rejets des industriels sélectionnés.
4. Simulation et analyse des impacts : Évaluation des écarts sur la qualité de l'eau pour chaque scénario.
5. Formation et accompagnement : Formation des agents du SED à l'utilisation du modèle pour garantir l'autonomie et la pérennité des analyses

4. Collecte, analyse des données & construction du module qualité

4.1 Description du module qualité du logiciel PICCOLO

La première étape a consisté à rassembler et analyser l'ensemble des données nécessaires à la modélisation.

SUEZ CONSULTING a réalisé une mise à jour du modèle hydraulique du réseau d'eau industrielle réalisé sur le logiciel PICCOLO. Cette mise à jour a pris en compte les dernières informations disponibles des ouvrages existants et projetés, ainsi que les dernières mesures hydrauliques disponibles. L'ossature du réseau est représentée sur la figure suivante, à travers la distribution des diamètres du réseau.

Le modèle est représentatif des conditions hydrauliques du 24/07/2024 (calage du modèle) et intègre les profils de consommation des différents industriels selon les mesures récupérées.

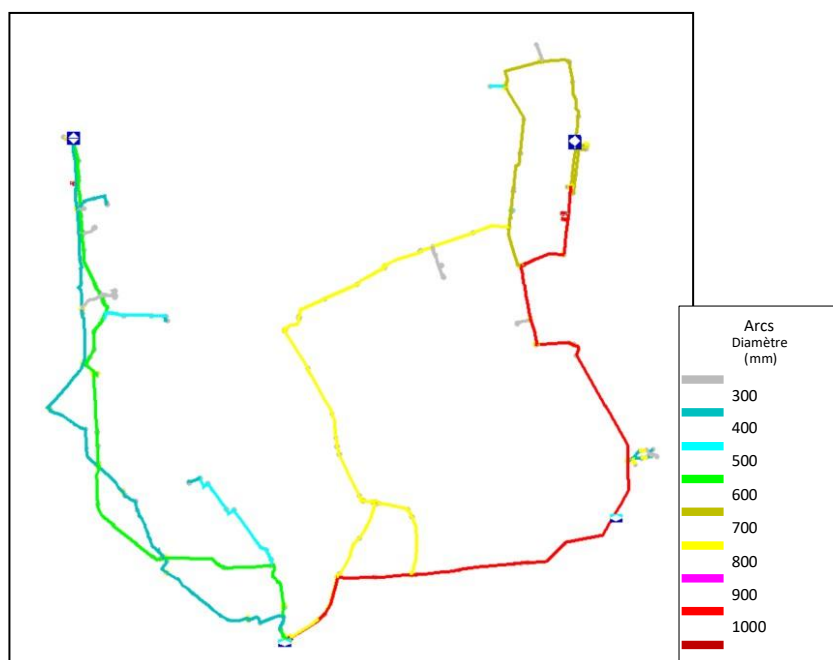


Figure 2 Schéma du réseau d'Eau Industrielle sur le logiciel de modélisation PICCOLO

Le module qualité de PICCOLO intègre des fonctionnalités avancées de modélisation de la qualité de l'eau dans les réseaux de distribution, notamment :

Le calcul des temps de séjour dans les conduites et les réservoirs ;

La détermination de l'origine de l'eau, des zones d'influence des ressources et réservoirs, et l'évaluation du renouvellement de l'eau dans les stockages ;

La modélisation de jusqu'à 36 produits conservatifs et stables, avec prise en compte des effets de dilution liés au mélange d'eaux d'origines différentes ;

La modélisation d'un produit non conservatif, avec une cinétique de dégradation assimilable à celle du chlore.

Ce module permet de simuler en régime permanent la propagation de composés dans le réseau, qu'ils soient conservatifs (sans réaction) ou non-conservatifs (avec disparition dans le temps ou réactivité chimique).

Dans le cadre de la présente étude, les 32 paramètres analysés sont considérés comme conservatifs. Cela signifie qu'ils ne subissent ni transformation chimique, ni adsorption sur les parois, ni dégradation au cours de leur transit dans le réseau. Leur évolution spatiale et temporelle est uniquement régie par les mécanismes de transport (advection, dispersion) et de dilution entre différentes eaux.

4.2 Ajustements et paramétrages

Les ajustements suivants sont apportés aux modèles :

- Intégration des paramètres de qualité de l'eau brute à l'usine de Bourbourg. Ce paramétrage est réalisé pour 3 périodes distinctes : Période d'été ; Période d'hiver ; Période de pluie.
- Intégration des débits et des paramètres de qualité associées aux projets de réinjection des eaux de process industriels.

4.3 Etude de la qualité d'eau brute au niveau du canal de Bourbourg

La qualité de l'eau au niveau de la prise d'eau a été étudiée sur la base des mesures d'autosurveillance conduites mensuellement entre 2018 et 2023 ainsi que sur les analyses du laboratoire CARSO de 2020.

Une analyse statistique a été menée sur les deux jeux de données. Ces derniers présentent des valeurs proches, avec un écart relatif inférieur à 10 % dans 66 % des cas. Afin de représenter au mieux les concentrations observées, la moyenne des deux séries de mesures a été retenue pour constituer le jeu de données d'entrée utilisé dans le modèle.

La période estivale est définie sur une durée de six mois, s'étendant de mai à octobre inclus, tandis que la période hivernale couvre les mois de novembre à avril.

La détermination des périodes pluviales a été réalisée à partir du jeu de données Météo France de la station météorologique n°59183001 [Dunkerque Sémaphore]. Un jour est qualifié de pluvial lorsque le cumul de précipitations journalières (RR) dépasse le 90e percentile ($k > 0,9$), soit un seuil de 6,4 mm. Le 9 mars 2020, un cumul de 10,7 mm a été enregistré, correspondant au 93e percentile, ce qui confirme le caractère pluvial de cette journée. Le laboratoire CARSO a effectué des prélèvements et analyses le 10 mars 2020. Il est donc proposé de considérer les concentrations mesurées par CARSO le 10 mars 2020 sur les 32 paramètres étudiés comme représentatives d'un épisode pluvial.

5. Scénarios de réinjection étudiés

Une fois les modèles construits, différents scénarios de réinjection ont été définis. Cette étape vise à explorer plusieurs hypothèses de réutilisation des eaux industrielles, en fonction des besoins identifiés et des objectifs du territoire, afin d'évaluer les impacts potentiels sur la qualité de l'eau distribuée.

L'étude a analysé un panel de synergies et a retenu 9 industriels candidats à la réinjection au regard de critères quantitatifs et qualitatifs.

Ainsi, 7 scénarios réinjection sont étudiés et exposés dans le Tableau ci-dessous :

N° scénario	Intitulé
1	Réinjection REUT STEP de Gravelines pour alimenter les futurs EPR
2	Réinjection Versalis
3	Réinjection Hyet Sweet
4	Réinjection combinée Hyet Sweet & REUT STEP de Gravelines
5	Réinjection Air Liquide
6	Réinjection Versalis bis (nouveau point d'injection)
7	Réinjection « REUT STEP de Gravelines » avec l'implantation d'une nouvelle cheminée d'équilibre

Dans le modèle Piccolo, les points de réinjection théoriques intégrés doivent respecter certains critères :

- Être placés sur le réseau structurant ;
- Être placés en respectant le sens de l'écoulement dans le réseau structurant pour maximiser le mélange des effluents de réinjection et d'éviter la réintroduction des effluents dans le branchement de l'industriel concerné.

Chaque scénario préalablement défini a ensuite été étudié en détail. Cette analyse permet d'apprécier les effets de chaque configuration de réinjection sur le réseau, de valider ou d'infirmer certaines hypothèses, et d'identifier les meilleures pratiques à adopter pour préserver la ressource en eau.

La modélisation qualité du réseau d'eau industrielle de Dunkerque a évalué sept scénarios de réinjection sur 32 paramètres physico-chimiques. Chaque impact est mesuré par un critère d'écart relatif (de 0 à 6) entre la concentration simulée et la concentration de référence (critère 0 = <10% d'écart ; critère 6 = >200% d'écart). Les simulations montrent que certains paramètres critiques subissent des écarts très marqués selon le scénario et la localisation des sites industriels.

- Calcul de l'écart relatif (σ) de chaque paramètre par rapport à la qualité de l'eau industrielle, selon différentes périodes de l'année, mettant en évidence l'impact de la réinjection sur chaque industriel, par paramètre.

$$\sigma = \left| \frac{\text{Concentration modélisée} - \text{Concentration de référence}}{\text{Concentration de référence}} \right|$$

Critères	Ecart relatif à la valeur considérée dans l'eau brute (σ)
Critère 0	$\underline{\sigma} < 10\%$
Critère 1	$10 \% < \sigma < 30\%$
Critère 2	$30 \% < \sigma < 50\%$
Critère 3	$50 \% < \sigma < 100\%$
Critère 4	$100 \% < \sigma < 150\%$
Critère 5	$150 \% < \sigma < 200\%$
Critère 6	$\underline{\sigma} > 200\%$

6. Résultats principaux

Scénario 1 – injection des eaux de rejet issues de la STEP de Gravelines

L'injection journalière (1 300–3 000 m³/j) affecte Befesa Zinc et EDF. Ce dernier voit ses paramètres chlorures, sodium et potassium atteindre les critères 4–5 (écarts >100%). Befesa Zinc (positionné juste après l'injection) présente les 3 mêmes paramètres aux critères 4–6 auxquels s'ajoute le zinc. En période pluviale, ces écarts s'amplifient (passage au critère 6) et touchent même des paramètres jusque-là moins affectés (conductivité, sulfates, bromures). Les autres industriels (Clarebout, SNF, Hyet Sweet amont, etc.) ne sont pas impactés et conservent une qualité équivalente à celle de l'eau brute.

Scénario 2 – injection des eaux de rejet issues de Versalis

Le rejet de 1 000 000 m³/an impacte fortement Kerneos, très proche du point de rejet, 11 des 32 paramètres simulés s'établissent au critère 6 (écarts relatifs multipliés par 6 à 20). Quatre autres paramètres atteignent les critères 4–5. Ces dépassements s'expliquent par une charge organique et minérale élevée du rejet Versalis – très forte DCO et hydrocarbures, métaux dissous et ions (chlorures, sulfates, sodium). Plus en aval, Total bénéficie d'une dilution importante (la plupart de ses écarts passent aux critères 0–2), alors qu'Air Liquide, malgré sa dilution partielle, conserve 16 paramètres aux critères 4 et plus en raison de son débit de prélèvement très élevé.

Scénario 3 – injection des eaux de rejet issues de Hyet Sweet

L'effluent d'Hyet Sweet (~490 000 m³/an) injecté sur la branche Ouest impacte de façon homogène les quatre clients aval (EDF, SNF, Befesa Zinc, Aluminium Dunkerque). Plusieurs paramètres-clés atteignent systématiquement le critère 6 (>200% d'écart) : DCO, nitrites, chlorures, sulfates, indice hydrocarbures et sodium. Ces écarts sont cohérents avec la composition chimique du rejet (chlorures, sulfates, sodium aux milliers de mg/L, soit ~100 fois plus élevé que l'eau brute ; DCO, nitrites, hydrocarbures sont multipliés d'un facteur 10 à 30 par rapport à la référence). À l'inverse, des paramètres comme la température, les nitrates, les MES ou le pH restent peu affectés (écarts limités, critères 0–2).

Scénario 4 – injection des eaux de rejet issues de Hyet Sweet et de la STEP Gravelines (combiné)

La double réinjection cumule les effets précédents sur la branche Ouest (niveau d'injection total ~964 000 m³/an en sec et 1 584 000 m³/an en pluvial).

Seuls Clarebout et Hyet Sweet ne sont pas touchés. Pour tous les autres, l'empreinte est multiple : les paramètres dominants (DCO, nitrites, chlorures, sulfates, hydrocarbures, sodium issus d'Hyet Sweet) restent aux critères 4–6, tandis que la STEP apporte également ses contributions marquées sur la conductivité, le zinc et le potassium (écarts classés en critères 3–4).

Les autres paramètres (nitrates, bromures, magnésium, TAC) ne montrent que des écarts modérés (critères 1–2), et la température, les MES et le pH demeurent stables (écarts ponctuellement <10%). En période pluviale, l'augmentation du débit STEP amplifie encore les contrastes et élève plusieurs paramètres vers le critère 6.

Scénario 5 – injection des eaux de rejet issues d'Air Liquide

L'injection d'Air Liquide affecte la branche Est. Le site de Total apparaît le plus impacté : 5 des 9 paramètres sont aux critères 5–6 (DCO, chlorures, zinc, sulfates et hydrocarbures).

Ceci reflète la forte minéralisation de l'effluent d'Air Liquide (par ex. chlorures ~400 vs 46 mg/L dans l'eau brute ; sulfates ~850 vs 38 mg/L ; zinc 650 vs 12,7 µg/L ; DCO 60 vs 11 mg/L ; hydrocarbures 5 vs <0,1 mg/L). Air Liquide lui-même conserve 4 paramètres majeurs en 4–6 (chlorures, zinc, sulfates, hydrocarbures), mais l'impact global sur son propre approvisionnement est atténué par son très fort prélèvement (~1,4 Mm³/an, ce qui dilue le rejet).

Scénario 6 – injection des eaux de rejet issues de Versalis bis

Le scénario n°6 reprend la configuration du scénario n°2 mais avec un point d'injection déplacé en aval. Les simulations confirment que ce déplacement permet d'épargner l'industriel Kerneos, désormais situé en amont du rejet. En revanche, les effets se maintiennent pour Air Liquide et Total qui conservent un nombre important de paramètres classés au critère ≥ 4 (les profils de DCO, hydrocarbures et certains métaux restant fortement impactés par rapport à l'eau brute).

Scénario 7 – injection des eaux de rejet issues de la STEP de Gravelines avec l'implantation d'une nouvelle cheminée d'équilibre

Le scénario n°7 conserve le point d'injection testé en scénario n°1 mais modifie sensiblement les volumes réinjectés ($\approx 650 \text{ m}^3/\text{j}$ en période sèche et $\approx 2\,350 \text{ m}^3/\text{j}$ en période pluviale) et intègre la future cheminée d'équilibre de $5\,000 \text{ m}^3$ sur la branche Ouest. Globalement, l'effet combiné de la réduction des volumes et du déplacement de la cheminée d'équilibre diminue l'impact observé dans le scénario n°1.

Par ailleurs, la redistribution des écoulements induite par la cheminée modifie la spatialisation des impacts : Befesa Zinc, fortement affecté en S1, est désormais épargné, tandis que SNF et Aluminium Dunkerque présentent ponctuellement des impacts qualitatifs en période pluviale.

7. Conclusion et perspectives

Les scénarios montrent que certains paramètres (chlorures, sodium, potassium, DCO, hydrocarbures, sulfates) sont particulièrement impactant pour la réinjection. Selon le scénario et la localisation, des augmentations importantes de ces paramètres peuvent être observées, parfois multipliées par 10 à 20 par rapport à la référence. Les effets varient selon la période de l'année (sèche, pluviale) et la configuration du réseau.

Le module qualité développé est désormais opérationnel et maîtrisé par les équipes du SED. Les simulations permettent d'optimiser les scénarios de réinjection dans le réseau d'Eau Industrielle. Les travaux se poursuivent pour affiner les scénarios et planifier des actions concrètes avec les industriels concernés. La modélisation reste un outil évolutif, au service de la circularité de l'eau et de la décarbonation du territoire dunkerquois.

L'économie circulaire de l'eau industrielle représente une opportunité majeure pour le territoire dunkerquois. Grâce à la modélisation avancée et à l'implication des acteurs locaux, il est possible de concilier développement industriel, préservation de la ressource et transition écologique. Le SED, en partenariat avec les acteurs locaux et les industriels, poursuit ses efforts pour mettre en œuvre des solutions innovantes et durables, au bénéfice de l'ensemble du territoire.

RÉSUMÉ

Le Syndicat de l'Eau du Dunkerquois (SED), gère un réseau d'Eau Industrielle alimentant 16 industriels, favorisant la préservation de l'eau potable grâce à l'utilisation d'eau brute du canal de Bourbourg. Dans une dynamique d'écologie industrielle et d'économie circulaire, le projet vise à réutiliser les eaux de rejet industrielles, réduisant la pression sur la ressource en eau. L'étude identifie un potentiel de réinjection de près de 3 millions de m³/an dans le réseau d'Eau Industrielle, nécessitant l'intégration d'un module qualité à la modélisation hydraulique du réseau.

Ce module, développé sous PICCOLO par SUEZ Consulting, permet d'évaluer l'impact de la réinjection sur la qualité de l'eau distribuée, en simulant 32 paramètres physico-chimiques selon différents scénarios et périodes (été, hiver, pluie). Sept scénarios de réinjection ont été étudiés, impliquant différents industriels et points d'injection. Les simulations montrent que certains paramètres (chlorures, sodium, potassium, DCO, hydrocarbures, sulfates) sont particulièrement sensibles à la réinjection, avec des écarts pouvant être multipliés par 10 à 20 selon le scénario et la localisation des points d'injection.

Les résultats soulignent l'importance du positionnement des points d'injection et du volume réinjecté pour limiter les impacts négatifs sur la qualité de l'eau. Des ajustements, comme le déplacement des points d'injection et l'ajustement des volumes réinjectés permettent d'atténuer certains effets indésirables. La modélisation qualité est un outil pleinement maîtrisé permettant d'identifier les solutions de réinjection d'eau issue de process industriel et contribuant à la décarbonation du territoire Dunkerquois.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

CITATION DE CE RAPPORT

Syndicat de l'Eau du Dunkerquois, SUEZ Consulting. 2024. **Assistance à Maitrise d'Ouvrage – Eau Industrielle – Circularité et optimisation de la desserte. Intégration d'un module « qualité » à la modélisation hydraulique ; Rapport final.** 65 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.