



**COMITÉ INTERNATIONAL DE LA CROIX-ROUGE**

**CICR**

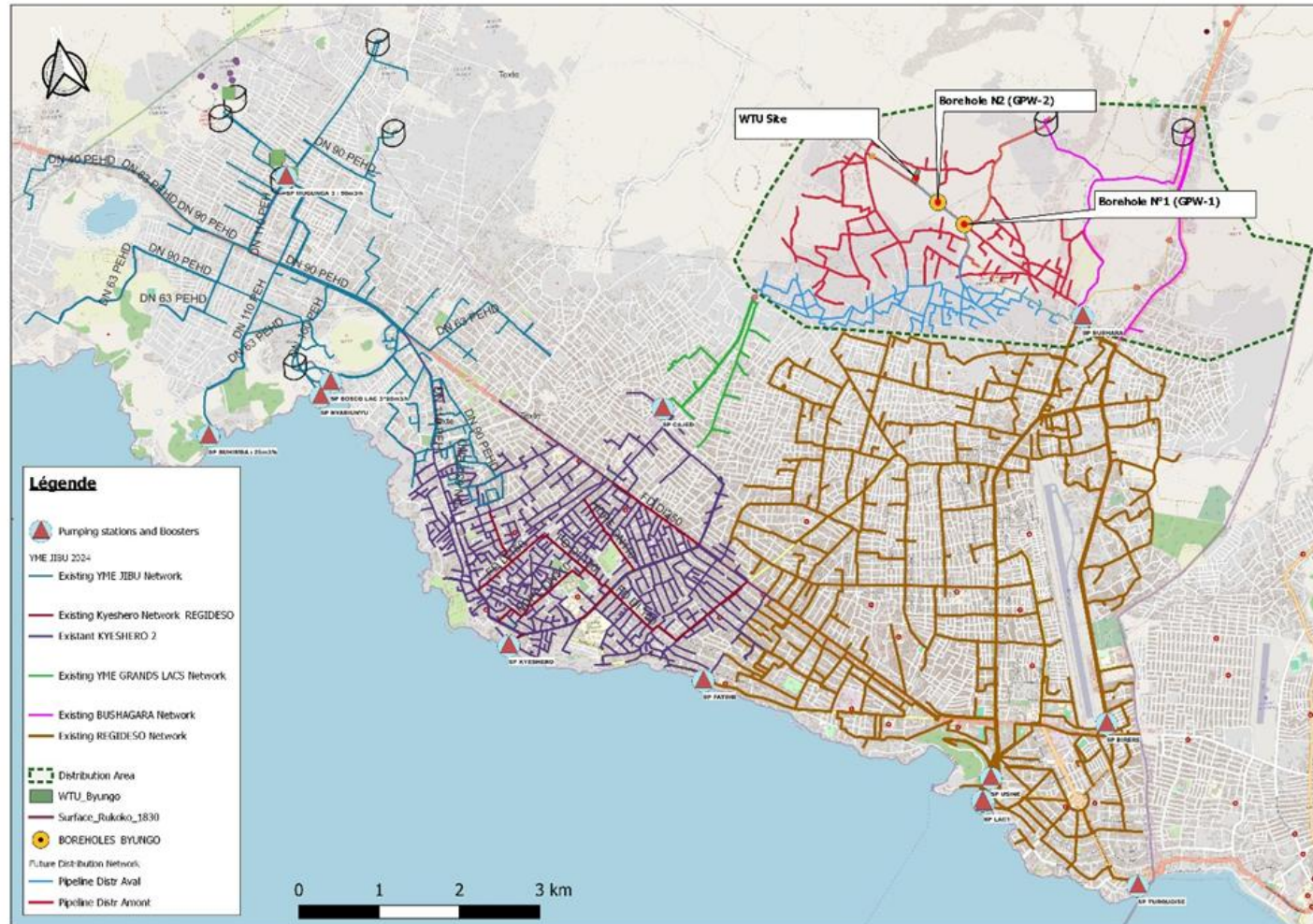
**SOUS-DELEGATION DE GOMA**

**LON26/00058 : APPEL A MANIFESTATION  
D'INTERET**

**PRODUCTION ET SOLUTION DE  
TRAITEMENT D'EAU ISSUE DE FORAGES  
A GOMA (RDC)**

**7200 m<sup>3</sup>/h (Extensible à 18000 M<sup>3</sup>/h)**

# Annexe 1 : Localisation





# Annexe 3 : Extrait APS- SHER (validé novembre 2025)

## 1.1. Procédés de traitement

### 1.1.1. Philosophie de conception

L'étude a pour finalité la confirmation puis la conception d'une unité de traitement de l'eau (UTE) dédiée à l'amélioration de la qualité physico-chimique de l'eau souterraine extraite. Les objectifs spécifiques consistent, d'une part, à confirmer la qualité de l'eau brute (analyses complémentaires) et ensuite à identifier des solutions techniques permettant de réduire la dureté de l'eau (mise à l'équilibre, adoucissement) et d'abaisser les concentrations en fluor et en manganèse à des niveaux conformes aux normes en vigueur. Par la suite, une solution technique sera dimensionnée en APD, grâce notamment à des tests de traitabilité. La qualité des eaux devra être conforme aux normes congolaises et sur base des valeurs guide internationales, notamment à celles de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Un tableau récapitulatif des valeurs de référence existantes est présenté Annexe 1. La norme la plus restrictive par paramètre est préconisée.

La philosophie de conception repose sur une approche pragmatique, tenant compte à la fois des contraintes locales et des performances attendues.

### 1.1.2. Options de traitement

#### 1.1.2.1. Considérations préliminaires

Dans le cadre de cette étude, plusieurs considérations préliminaires guident l'orientation des analyses et des propositions de traitement :

- Une unité de traitement est indispensable car l'option d'un mélange des eaux souterraines avec d'autres ressources en eau moins dures et moins contaminées semble peu réaliste, comme développé dans la suite du rapport ;
- Des unités modulaires seront envisagées afin de phaser au mieux la production d'eau potable ;
- Les solutions de traitement envisagées doivent rester simples à mettre en œuvre et faciles à entretenir ;
- Des méthodes de traitement pouvant réduire à la fois la dureté et les concentrations en fluorure et manganèse seront envisagées afin de simplifier la mise en œuvre, la maintenance, et réduire les coûts d'opération ;
- Il est à noter que les résultats du forage GO-PW1, concernant la quantité et la qualité de l'eau exploitable, seront extrapolés aux autres forages.

C'est sur la base de ces éléments que des procédés de traitement adaptés seront proposés dans la suite de cette étude, en cohérence avec les réalités techniques et contextuelles du terrain.

#### 1.1.2.2. Capacité de traitement et production

Il est estimé que chaque forage présente un débit de 200 m<sup>3</sup>/h, avec un fonctionnement de pompage prévu de 18 heures par jour. La situation actuelle prévoit la mobilisation de deux forages (le forage finalisé et un nouveau forage dont les travaux sont en cours), ce qui permettrait une production totale de 400 m<sup>3</sup>/h soit 7 200 m<sup>3</sup>/j. Cependant le schéma directeur prévoit à terme un champ captant de cinq forages avec une capacité de production potentielle à 18 000 m<sup>3</sup>/j.

Dans le cadre du développement des capacités de traitement, un module de traitement de 400 m<sup>3</sup>/h sera proposé et développé, ce module sera multiplié en fonction de l'exploitation progressive du champ captant jusqu'à la capacité nominale de 1 000 m<sup>3</sup>/h, voire plus.

### 1.1.2.3. Données de qualité utilisées

Les données de qualité utilisées pour le dimensionnement de l'unité de traitement (UTE) sont les suivantes (Tableau 1). Elles ont été calculées en prenant la moyenne entre l'échantillon analysé par l'Office Congolais de Contrôle et l'échantillon '24h' analysé par le Laboratoire de Spiez. Les valeurs jugées aberrantes n'ont pas été prises en compte.

Tableau 1: Données de qualité utilisées pour le dimensionnement de l'UTE

Paramètres	Unité	Valeur utilisée (Eau de forage)	Valeur utilisée (Eau du lac)*
pH	-	7.11	8.8
Conductivité	μS/cm	3 180	1 200
Alcalinité	mg CaCO <sub>3</sub> /l	2 024	640
Dureté totale	mg CaCO <sub>3</sub> /l	1 200	360
Dureté carbonatée	mg CaCO <sub>3</sub> /l	1 200	360
Dureté permanente	mg CaCO <sub>3</sub> /l	±0	0
Calcium	mg CaCO <sub>3</sub> /l	223	17.5
Magnésium	mg CaCO <sub>3</sub> /l	877	345.7
Fluorure	mg F/l	3.05l	Entre 1.26 et 1.41 mg/l entre 0 et 20 m de profondeur
Manganèse	μg Mn/l	297	-

\* Résultats repris du schéma directeur actualisé pour l'approvisionnement en eau potable pour la ville de Goma (Juin 2022))

La température n'est pas disponible dans les résultats d'analyse et sera estimée à 25°C pour le dimensionnement de l'UTE.

### 1.1.2.4. Traitement de la dureté de l'eau

Comme mentionné précédemment, la dureté totale de l'eau correspond à la somme des concentrations en ions calcium et magnésium. La dureté totale est divisée en dureté carbonatée, qui correspond à la partie de la dureté totale chimiquement équivalente à la quantité des carbonates (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) et des bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), et la dureté non carbonatée (dureté permanente), qui correspond à la somme des ions calcium et magnésium liés aux sulfates, aux chlorures et aux nitrates (GLS 2006b) (Figure 1).

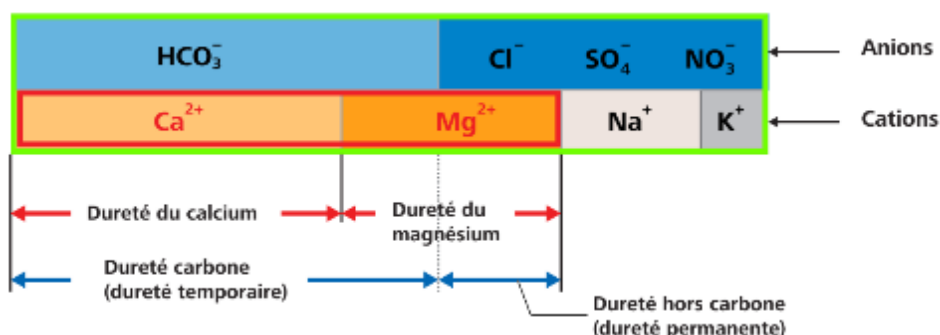


Figure 1 : Schéma conceptuel définissant la dureté totale (somme des ions Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup>), la dureté carbonatée (somme des ions CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), et la dureté permanente (soustraction de la dureté totale et carbonatée). (Source : Fiches thématiques de NUSSBAUM RN)

Une eau à forte dureté est généralement acceptable tant que le goût reste agréable pour les consommateurs et qu'il n'y a pas de précipitation de ces éléments au cours du transport. En effet, une forte teneur en calcium et magnésium n'entraîne pas nécessairement une tendance à l'entartrage, à

condition que l'eau reste à l'équilibre calcocarbonique tout au long de la chaîne de production - distribution. Le calcium et le magnésium peuvent devenir problématiques lorsque cet équilibre est perturbé, par exemple lorsque l'eau souterraine en équilibre au sein de l'aquifère change d'équilibre suite à la prise et aération ou lors du chauffage ou de l'ébullition de l'eau.

Les analyses développées dans la section précédente ont montré que l'eau subit une modification de son équilibre chimique dans le temps : l'équilibre de l'eau souterraine dans l'aquifère n'est pas conservé après exposition à l'atmosphère, ce qui entraîne une précipitation progressive du carbonate de calcium et du magnésium dans le (futur) réseau de distribution. Bien qu'une eau légèrement entartrante soit souhaitable pour limiter la corrosion des installations, cet effet doit être maîtrisé et c'est pourquoi un traitement adapté doit être considéré.

Outre la problématique de l'équilibre, les normes congolaises établissent des valeurs maximales de 500 mg/l pour la dureté totale, 70 mg/l pour le calcium (équivalent à 165 mg CaCO<sub>3</sub>/l) et 50 mg/l pour le magnésium (210 mg CaCO<sub>3</sub>/l) et devraient être respectées.

Différentes techniques de traitement existent pour réduire la dureté de l'eau, et par conséquent du calcium et du magnésium. Un résumé de ces techniques avec les inconvénients associés est repris au

Tableau 2.

Tableau 2: Méthodes de traitement de la dureté

Méthode	Avantages	Inconvénients
<b>Mise à l'équilibre forcée (aération et filtration sur dolomie)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pas d'ajout de réactif nécessaire ;</li> <li>Pas de remplacement de la dolomie à prévoir vu le pouvoir incrustant de l'eau ;</li> <li>Etape préalable pouvant être intégrée à d'autres procédés d'adoucissement ;</li> <li>Ajout d'un coagulant (sulfate d'aluminium ou chlorure ferrique) possible pour précipiter d'autres paramètres.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Efficacité limitée pour eaux très dures ;</li> <li>Disponibilité de la dolomie ;</li> <li>Lavage de la dolomie dépendant du pouvoir incrustant de l'eau ;</li> </ul>
<b>Décarbonatation à la chaux</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Réduction efficace de la dureté carbonatée ;</li> <li>Élimination partielle du magnésium avec excès de chaux ;</li> <li>Procédé courant ;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Production de boues ;</li> <li>Ne traite pas la dureté permanente (pas nécessaire au niveau des forages de cette étude) ;</li> </ul>
<b>Décarbonatation à la chaux et à la soude</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Réduction efficace de la dureté carbonatée et permanente ;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Augmentation de la concentration en sodium ;</li> <li>Production de boues ;</li> <li>Coût d'exploitation élevé ;</li> <li>Traite la dureté permanente (pas nécessaire au niveau des forages de cette étude) ;</li> </ul>
<b>Résines échangeuses d'ions</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Procédé compact et automatisable ;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Risque de colmatage par manganèse et fer ;</li> <li>Gestion complexe des saumures de régénération ;</li> <li>Besoin de remplacement des résines ;</li> </ul>
<b>Électro-décarbonatation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pas d'ajout de réactif ;</li> <li>Faible production de boues ;</li> <li>Procédé automatisé ;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Consommation énergétique importante ;</li> <li>Coût d'investissement élevé ;</li> </ul>
<b>Nanofiltration</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Élimine différents paramètres (nécessaire dans cette étude) ;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coût d'investissement élevé ;</li> <li>Consommation énergétique élevée ;</li> <li>Membranes fragiles (à remplacer tous les 3–4 ans) ;</li> <li>Pertes en eau importantes (jusqu'à 20 %) ;</li> <li>Production de rejets (solution saline) ;</li> </ul>

Méthode	Avantages	Inconvénients
Dilution	<ul style="list-style-type: none"> <li>Economique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nécessite la présence d'une autre ressource à plus faible dureté ;</li> </ul>

La première méthode consiste à réaliser une mise à l'équilibre forcée de l'eau afin de déplacer l'équilibre calcocarbonique vers la précipitation du carbonate de calcium. Pour cela, l'aération de l'eau est réalisée afin d'éliminer le dioxyde de carbone dissous. En complément, la filtration sur dolomie (minéral composé de carbonate de calcium) permet d'intégrer dans la filière de traitement les précurseurs de précipitation pour accélérer la mise à l'équilibre (précurseurs). Ce traitement, passif et sans ajout de réactifs chimiques, est efficace pour réduire la dureté de l'eau. Cette méthode peut également être réalisée en amont d'une autre méthode d'adoucissement.

Une autre méthode pour traiter la dureté, au-delà de la simple mise à l'équilibre est la décarbonatation à la chaux et/ou à la soude. La décarbonatation à la chaux consiste à injecter de l'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) dans l'eau afin de provoquer la précipitation du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ). Le traitement est généralement mis en œuvre dans un réacteur équipé de zones de mélange, de croissance cristalline, de clarification et de concentration des boues. Des agents flocculants peuvent être ajoutés pour améliorer la décantation des cristaux formés. Le procédé permet de ramener l'alcalinité résiduelle à des valeurs d'environ 20-30 mg  $\text{CaCO}_3/\text{l}$ , ce qui nécessite souvent un mélange avec une fraction d'eau brute pour garantir une minéralisation suffisante à la fin du procédé. Cette réaction est particulièrement efficace pour réduire la dureté carbonatée, mais n'agit pas sur la dureté permanente liée aux chlorures ou aux sulfates de calcium et magnésium. L'ajout d'un excès de chaux dans le traitement permet de prolonger la réaction de précipitation et d'éliminer, au-delà du calcium carbonaté, une partie du magnésium dissous, sous forme de carbonate ou d'hydroxyde de magnésium. Le procédé nécessite toutefois une élévation du pH à des valeurs supérieures à 10, ce qui implique une correction en aval pour éviter des eaux trop basiques. La gestion des boues est également plus complexe du fait des volumes importants produits. La maîtrise des cinétiques de précipitation et des paramètres d'agitation est essentielle pour garantir un rendement optimal, et pour éviter des phénomènes de colmatage dans les unités de clarification. Lorsque l'eau présente une dureté magnésienne élevée, un traitement séparé peut être utilisé ('split' traitement) qui consiste à traiter avec un excès de chaux une certaine proportion de l'eau puis de la mélanger avec l'eau brute (exemple, 80-20%). Cette option permet de réduire la quantité de dioxyde de carbone nécessaire à la recarbonatation de l'eau et de réaliser des économies sur l'apport de chaux.

La décarbonatation à la chaux et à la soude permet d'élargir le champ d'action du traitement en agissant à la fois sur la dureté carbonatée et la dureté permanente. La chaux précipite les bicarbonates de calcium et de magnésium, tandis que la soude ( $\text{NaOH}$ ) permet de précipiter les sels de calcium associés à des anions non carbonatés tels que les chlorures et les sulfates. Ce double traitement vise donc un adoucissement plus complet que la décarbonatation simple à la chaux. L'inconvénient principal réside dans l'augmentation de la concentration en sodium dans l'eau traitée, pouvant poser des problèmes en cas de réutilisation domestique. Le contrôle précis du pH et des doses de réactifs est indispensable pour éviter une précipitation excessive ou des déséquilibres calcocarboniques. L'ajout d'un excès de chaux et de soude vise à éliminer l'ensemble de la dureté, qu'elle soit carbonatée ou non carbonatée. L'efficacité du procédé dépend d'une régulation fine des dosages, des temps de contact, et d'une gestion efficace des boues générées. Il permet d'obtenir une eau à dureté résiduelle très faible, mais son coût d'exploitation et la complexité de l'installation le réservent à des applications ciblées.

Une autre méthode, la décarbonatation sur résines échangeuses d'ions, repose sur un échange ionique entre les cations présents dans l'eau et des ions hydrogènes ( $\text{H}^+$ ) fixés sur une résine. Le calcium et magnésium sont ainsi remplacés par des ions hydrogène, ce qui permet d'éliminer la dureté. Ces résines sont régénérées périodiquement à l'aide d'un acide fort, produisant des effluents acides ce qui peut présenter une gestion complexe des déchets. De plus, il existe un risque non négligeable de colmatage des résines par le fer, le manganèse ou les matières organiques.

L'électro-décarbonatation repose sur la précipitation électrolytique du carbonate de calcium. L'eau traverse un réacteur équipé d'électrodes alternées (cathodes et anodes). À la cathode, des ions  $\text{OH}^-$  sont générés, induisant un environnement basique qui favorise la précipitation de  $\text{CaCO}_3$ . Simultanément, à l'anode, des ions  $\text{H}^+$  réagissent avec les bicarbonates pour libérer du  $\text{CO}_2$ , qui doit être évacué par stripping ou neutralisation. Ce procédé ne nécessite pas l'ajout de réactifs chimiques, ce qui le rend intéressant d'un point de vue environnemental. Il permet de produire des boues de carbonate de calcium relativement pures et faciles à déshydrater. Toutefois, la consommation énergétique reste importante et limite son application. Son coût d'investissement est élevé, mais il présente l'avantage d'un pilotage automatisé et d'une grande précision dans le contrôle de la dureté résiduelle.

La nanofiltration est une technique de filtration membranaire située entre l'ultrafiltration et l'osmose inverse. Les membranes de nanofiltration se caractérisent par une élimination partielle mais efficace des ions divalents tels que le calcium et le magnésium et permettent le passage significatif des ions monovalents (qui contribuent le plus à la pression osmotique), ce qui se traduit par une demande énergétique relativement faible. L'élimination du calcium est généralement de l'ordre de 95 %. Une station de nanofiltration comprend généralement: i) un prétraitement physico-chimique pour protéger les membranes contre l'encrassement et l'entartrage par les sels de calcium; ii) une pompe d'alimentation pour pressuriser l'eau (pression d'alimentation de 5 à 10 bar); iii) des récipients sous pression contenant des éléments membranaires disposés en série, généralement en trois étages, permettant d'atteindre des facteurs de conversion compris entre 80 % et 90 %; iv) un post-traitement visant à rétablir l'équilibre calcocarbonique, la reminéralisation et la désinfection du perméat; et, v) un système de nettoyage chimique des membranes. La nanofiltration constitue donc une solution adaptée pour le traitement des eaux difficiles, malgré certains inconvénients : la nécessité de reminéraliser le perméat par injection de réactifs chimiques et/ou par mélange avec de l'eau non traitée ; une consommation énergétique significative ; et des coûts d'investissement élevés, pouvant être disproportionnés dans le contexte local. De plus, la nanofiltration inclut la production de déchet liquide salin et la fragilité des membranes élevée nécessite un remplacement fréquent de celles-ci (tous les 3 à 4 ans). Différents types de membranes existent et sont commercialisés.

Finalement, la dilution peut être également considérée. Il s'agit de mélanger la source d'eau à traiter avec une autre eau présentant des concentrations plus faibles pour les paramètres dépassant les normes. Cette solution, très économique, suppose toutefois la disponibilité de ressources alternatives à plus faible dureté. L'eau du lac a une dureté de 360 mg/l ce qui est assez élevé que pour réaliser une dilution avec les eaux de forage dont la dureté est de 1 200 mg/l. Dans le cas d'une dilution, moins de 15% d'eaux de forage pourrait être diluée avec plus de 85% des eaux du lac pour obtenir une dureté de 500 mg  $\text{CaCO}_3$ /l.

#### **1.1.2.5. Traitement du fluor**

La concentration maximale autorisée en ions fluorure dans l'eau potable est fixée à 1.5 mg/l par l'OMS et 2 mg/l par l'OCC. Par précaution vis-à-vis des risques de santé humaine, la présente analyse retient la norme la plus restrictive, à savoir celle de l'OMS fixée à 1.5 mg/l. Or, les analyses réalisées montrent des teneurs maximales atteignant 3.6 mg/l, ce qui impose impérativement la mise en œuvre d'un traitement de défluoration afin de ramener la concentration à un niveau acceptable. Cela implique l'élimination d'environ 2.1 mg/l de fluor.

Le fluor n'est jamais présent dans l'eau sous forme libre : il se combine à d'autres ions tels que le calcium, le sodium ou l'aluminium. Cette forme ionique influence fortement l'efficacité des technologies de traitement envisageables. Il convient également de souligner que les installations de défluoration sont encore peu répandues dans le monde, en raison notamment de leur complexité, de leur coût, et d'un manque de retour d'expérience à large échelle.

Différents traitements existent pour réduire le fluor de l'eau brute (GLS 2006c) et sont résumés dans le *Tableau 3*.

Tableau 3 : Méthodes de traitement du fluor

Méthode	Avantages	Inconvénients
<b>Adsorption</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Régénération avec du sulfate d'aluminium ;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Interférence avec dureté, fer, silice</li> </ul>
<b>Echange d'ions sur phosphate tricalcique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Solution simple et accessible ;</li> <li>Intégrable dans des traitements conventionnels ou avec la filtration sur dolomie (pour traitement de la dureté).</li> </ul>	
<b>Coagulation-floculation (sulfate d'alumine ou chlorure ferrique)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Intégrable dans des traitements conventionnels de clarification ou avec la filtration sur dolomie (pour traitement de la dureté) ;</li> <li>Faible action sur la dureté ;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Besoin de grandes quantités de coagulant ;</li> <li>Peu rentable pour eaux très fluorées (ce qui n'est pas le cas dans notre étude) ;</li> <li>Production importante de boues.</li> </ul>
<b>Décarbonatation à la chaux</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Synergie avec traitements de réduction de la dureté ;</li> <li>Faible perte en eau et production de boues.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Efficace seulement si calcium &gt; 200 mg/l et magnésium &gt; 50 mg/l.</li> </ul>
<b>Électrocoagulation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Faible production de boues ;</li> <li>Pas d'ajout de réactif</li> <li>Peu d'entretien ;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Consommation énergétique importante ;</li> <li>Coût d'investissement élevé</li> </ul>
<b>Nanofiltration</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Taux de réduction des fluorures élevé ;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coûts d'investissement et d'exploitation élevés ;</li> <li>Consommation énergétique importante ;</li> <li>Membranes fragiles ;</li> <li>Pertes en eau importantes .</li> </ul>
<b>Résine échangeuse d'ions</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Taux de réduction des fluorures élevé ;</li> <li>Procédé compact ;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coût d'investissement élevé ;</li> <li>Augmentation des chlorures dans l'eau traitée ;</li> <li>Production effluents concentrés en fluor ;</li> </ul>
<b>Dilution</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Economique ;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nécessite la présence d'une autre ressource à plus faible concentration;</li> </ul>

La première option est l'adsorption sur alumine activée qui repose sur le passage de l'eau à travers un lit de matériau poreux à base d'oxyde d'aluminium ( $Al_2O_3$ ), capable de retenir les ions fluorures par adsorption. L'alumine activée peut être régénérée avec du sulfate d'alumine. L'efficacité de cette technique dépend fortement de la composition chimique de l'eau à traiter, la présence en particulier d'ions concurrents comme la dureté, le fer ou la silice. D'autres produits pour adsorber le fluor existent, tels que le charbon actif, et sont commercialisés (ex. GraPro, produit BluAct). Toutefois, la régénération de ces produits n'est pas toujours évidente, ainsi que leur obtention localement.

La coagulation-floculation permet d'exploiter l'affinité du fluor en injectant du sulfate d'alumine ou du chlorure ferrique dans l'eau à traiter pour former des floccs capables d'adsorber les ions fluorures. Pour que cette méthode permette une défluoration significative, il est nécessaire d'utiliser des quantités très importantes de coagulant, souvent comprises entre 50 et 150 grammes par gramme de fluor à éliminer. Cette exigence rend la méthode peu rentable et difficilement applicable aux eaux fortement fluorées. En pratique, elle n'est utilisée que pour des eaux où la concentration en fluor est modérée, voire faible. La coagulation-floculation produit également une quantité importante de boues, ce qui engendre des coûts de traitement supplémentaires et des contraintes opérationnelles. Ainsi, cette technique ne constitue généralement qu'une solution d'appoint ou complémentaire à d'autres procédés plus spécifiques.

L'échange d'ion à travers phosphate tricalcique repose sur une réaction d'échange ionique entre les fluorures dissous dans l'eau et les carbonates de calcium présents dans l'apatite. Cette réaction forme de la fluoroapatite, un composé insoluble qui précipite et peut être séparé de l'eau. Le phosphate

tricalcique est commercialisé sous forme de poudre ou peut être généré in situ à partir de réactifs tels que l'acide phosphorique et le chlorure de calcium. Il s'utilise comme le sulfate d'aluminium. Cette méthode constitue une solution accessible et simple pour des contextes décentralisés. Elle peut être également intégrée avec une étape de filtration.

La décarbonatation à la chaux consiste à ajouter de la chaux ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) dans l'eau, ce qui provoque la précipitation des fluorures sous forme de fluorure de calcium ( $\text{CaF}_2$ ). Un second mécanisme intervient si l'eau contient du magnésium : la chaux favorise alors la formation d'hydroxyde de magnésium ( $\text{Mg(OH)}_2$ ), qui peut adsorber les ions fluorures avant décantation. Cette méthode, classiquement utilisée pour réduire la dureté de l'eau, peut dès lors contribuer à éliminer les ions fluorures, à condition que la concentration en calcium soit suffisante et supérieure à 200 mg/l et une concentration en magnésium supérieure à 50 mg/l. Ce procédé est donc cohérent dans les cas où la dureté de l'eau justifie un tel traitement.

L'électrocoagulation repose sur l'utilisation d'électrodes (souvent en aluminium ou en fer) immergées dans l'eau brute (Waghmare and Arfin, n.d.). Sous l'effet d'un courant électrique, ces électrodes libèrent des ions métalliques qui forment des hydroxydes agissant comme agent coagulant et qui capturent les ions fluorure sous forme de floccs facilement séparables. Cette méthode présente plusieurs avantages : elle nécessite un équipement simple, peu d'entretien et génère peu de boues. En revanche, les inconvénients majeurs sont la dissolution des électrodes qu'il faut régulièrement remplacer et une consommation électrique parfois élevée. L'électrocoagulation peut également réduire simultanément la dureté et le fluor dans l'eau brute en créant des ions aluminiums qui précipitent le calcium et le magnésium et sur lesquels vont s'adsorber le fluor.

La filtration membranaire permet de retenir les fluorures, mais les coûts d'investissement et d'exploitation sont très élevés et la mise en œuvre exige une expertise technique, une alimentation énergétique fiable et un système de maintenance rigoureux. Le risque est important que ces conditions ne puissent être réunies de manière durable au niveau de Munigi. Différents produits ont été développés, telle que les membranes BlueAct qui sont à base d'un mélange de fibrilles de protéines, de charbon actif et de fibres de cellulose.

La technique de résine échangeuse d'ions (échange des ions fluorures par des ions chlorures) permet une élimination efficace du fluor, mais présente des coûts d'investissement et d'exploitation élevés, la concentration en chlorures augmente dans l'eau, la régénération de la résine produit des effluents riches en fluor difficiles à gérer, et le temps de traitement est relativement long.

Finalement, la dilution peut être considérée. Cette solution, très économique, suppose toutefois la disponibilité de ressources alternatives à plus faible concentration. La concentration en fluor dans les eaux du Lac Kivu est comprise entre 1.26 et 1.41 mg/l entre 0 et 20 m de profondeur. Dans l'hypothèse optimale où la concentration en fluor est de 1.25 mg/l et ne présente pas de tendance à la hausse dans le temps, il faudrait recourir à un mélange composé de moins de 15 % des eaux de forage et de plus de 85 % des eaux du lac pour respecter la norme internationale de 1.5 mg/l. Cela implique également qu'il n'y ait pas de variation de concentration au sein du forage (moyenne de 3.05 mg F/l utilisée, or des valeurs jusqu'à 3.6 mg/l ont été observées). La valorisation des eaux de forages devrait dans ce cas se faire avec des apports du lac garantissant de manière permanente une dilution avec des apports en eau de l'ordre de 40 000 m<sup>3</sup>/j (valorisation de 2 forages, cf. infra) à 100 000 m<sup>3</sup>/j (5 forages).

#### **1.1.2.6. Traitement du manganèse**

La concentration maximale autorisée en manganèse est fixée à 80 µg/l. Or, les analyses réalisées montrent des teneurs maximales atteignant 500 µg/l (Office Congolais) et 103 µg/l (Laboratoire Spiez), ce qui impose la mise en œuvre d'un traitement afin de ramener la concentration à un niveau acceptable. Cela implique l'élimination entre 20 et 420 µg/l de manganèse.

Différents traitements existent pour réduire le manganèse de l'eau brute (GLS 2006a) et les avantages et inconvénients sont résumés dans le *Tableau 4*.

Tableau 4: Méthodes de traitement du manganèse

Méthode	Avantages	Inconvénients
Oxydation (aération ou $KMnO_4$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>Méthode fiable ;</li> <li>Intégrable dans des traitements conventionnels et avec la filtration ;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Interférence de la matière organique ou autres chimiques ;</li> </ul>
Oxydation avec bioxyde de chlore ou ozone	<ul style="list-style-type: none"> <li>Réaction rapide ;</li> <li>Efficacité élevée ;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coût élevé ;</li> <li>Complexité de mise en œuvre ;</li> </ul>
Coagulation (chlorure ferrique ou sulfate d'alumine)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Intégrable dans des traitements conventionnels de clarification ou avec la filtration sur dolomie (pour traitement de la dureté) ;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Efficacité peu élevée</li> </ul>
Démanganisation biologique	<ul style="list-style-type: none"> <li>Faible consommation de réactifs ;</li> <li>Bonne qualité des boues ;</li> <li>Procédé autonome à maturité ;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Contrôle strict des conditions ;</li> </ul>
Décarbonatation à la chaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>Synergie avec traitements de réduction de la dureté ;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Faible perte en eau (3-5 %) ;</li> </ul>
Résines échangeuses d'ions		<ul style="list-style-type: none"> <li>Interférence avec calcium et magnésium ;</li> </ul>
Nanofiltration	Élimine différents paramètres (nécessaire dans cette étude)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coût d'investissement élevé</li> <li>Consommation énergétique élevée</li> <li>Membranes fragiles (à remplacer tous les 3–4 ans)</li> <li>Pertes en eau importantes (jusqu'à 20 %)</li> <li>Production de rejets (solution saline)</li> </ul>
Dilution	Economique	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nécessite la présence d'une autre ressource à plus faible concentration ;</li> </ul>

La première méthode est l'oxydation qui transforme le manganèse dissous en un composé insoluble. Cette oxydation peut être réalisée via simple aération si le pH a une valeur supérieure à 9.5 pour que la vitesse de réaction devienne appréciable. Elle peut également se faire au moyen du permanganate de potassium ( $KMnO_4$ ). L'oxydation étant immédiate, cette méthode est adaptée aux eaux ne contenant pas de matière organique excessive ni d'interférences chimiques. Le manganèse insoluble est ensuite retenu par filtration. Le média filtrant se charge progressivement en  $MnO_2$ , ce qui permet de catalyser la réaction et de réduire les doses d'oxydants à injecter. Cette méthode est fiable et largement utilisée. Du chlore peut également être injecté sur un media filtrant contenant initialement du dioxyde de manganèse ( $MnO_2$ ) qui sert à la fois de support de filtration et de catalyseur pour l'oxydation du manganèse. Le chlore est injecté en amont du filtre pour activer le pouvoir oxydant du média, formant du permanganate. Celui-ci réagit avec le manganèse dissous pour produire un dépôt de  $MnO_2$  supplémentaire. Le processus est autonome après amorçage et efficace dans une large gamme de pH mais la vitesse de réaction est lente. Cette méthode offre une bonne capacité de rétention et convient aux débits importants. Cependant, un contrôle rigoureux de la chloration est essentiel pour éviter toute formation de sous-produits indésirables ou de dépassement des normes de goût et d'odeur. De plus, le pH a tendance à baisser ce qui peut avoir une influence sur l'alcalinité de l'eau. D'autres oxydants existent, tels que le bioxyde de chlore qui offre une réaction très rapide mais dont l'application est très limitée en raison de son coût, et l'oxydation par l'ozone.

Un traitement complémentaire peut être réalisé pour améliorer la réaction d'oxydation via aération, soit en injectant un oxydant puissant tel que le permanganate de potassium (le bioxyde de chlore et l'ozone étant complexes d'utilisation) qui offre une réaction très rapide soit en une coagulation si les précipités obtenus sont très fins, tel que le sulfate d'aluminium ou le chlorure ferrique.

Une autre méthode est la démanganisation biologique qui s'appuie sur des bactéries spécifiques capables d'oxyder le manganèse dissous ( $Mn^{2+}$ ) en  $MnO_2$ . Ces microorganismes, souvent hétérotrophes, se développent dans des filtres à sable lorsqu'un apport en oxygène et un pH approprié

(souvent supérieur à 7) sont assurés. L'eau est d'abord oxygénée (souvent entre 50 et 90 % de saturation) en amont du filtre pour favoriser leur activité. Le manganèse oxydé est alors progressivement piégé sous forme solide dans le filtre. Ce procédé est particulièrement intéressant pour son autonomie, sa faible consommation de réactifs et la qualité élevée des boues produites. Toutefois, il nécessite un démarrage progressif, et une surveillance rigoureuse des conditions biologiques.

Lorsqu'une décarbonation à la chaux est réalisée pour réduire la dureté de l'eau, le traitement du manganèse peut tirer parti de l'élévation du pH induite par l'ajout de chaux. En effet, dans les eaux à forte alcalinité, le manganèse dissous ( $Mn^{2+}$ ) peut précipiter sous forme de carbonate de manganèse ( $MnCO_3$ ) si le pH est suffisamment augmenté. Cette précipitation devient efficace lorsque le pH atteint environ 10, seuil auquel la solubilité du  $MnCO_3$  est minimale. Ainsi, dans les stations de traitement qui mettent déjà en œuvre un adoucissement à la chaux, cette méthode permet de faciliter l'élimination du manganèse en le coprécipitant avec les carbonates formés, notamment le carbonate de calcium.

Enfin, les résines échangeuses d'ions peuvent être efficaces pour traiter des eaux très peu chargées en manganèse, mais elles ne sont pas spécifiques et retiennent aussi  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$ . De plus, il faut éviter l'oxygène, car l'oxydation du manganèse entraîne sa précipitation, risquant d'obstruer la résine et de nuire à son efficacité.

La nanofiltration permet également d'éliminer le manganèse, avec les avantages et désavantages décrits plus haut.

Finalement, la dilution peut être considérée. Cette solution, très économique, suppose toutefois la disponibilité de ressources alternatives à plus faible concentration. Le manque de données pour le manganèse dans les eaux du Lac ne permet toutefois pas de valider ou non cette disponibilité.

#### **1.1.2.7. Procédés techniques envisagés**

Le choix des techniques de traitement retenues s'appuie sur plusieurs considérations développées ci-dessus, notamment sur une majeure celle qui souhaite privilégier un ensemble de procédés homogènes pour réduire à la fois la dureté, le fluor et le manganèse, afin de simplifier la logistique, faciliter la maintenance, réduire l'investissement initial et les coûts d'exploitation, tout en limitant l'emprise au sol. Parmi ces techniques aux principes similaires figurent la mise à l'équilibre physico-chimique par aération et filtration avec ajout d'un coagulant, la décarbonatation, la nanofiltration et la dilution.

La dilution peut être envisagée, dans le meilleur des cas et sous réserve de concentrations stables dans le temps, en mélangeant moins de 15 % d'eaux de forage à plus de 85 % d'eau brute du lac (réduction du fluor), sans garantie sur le manganèse et un effet plus que limité sur la dureté (Etude CICR sur l'eau du Lac). Toutefois, l'efficacité vis-à-vis du manganèse demeure incertaine faute de données suffisantes sur l'eau du lac. Dans ces conditions, s'en remettre à la seule dilution pour gérer le risque sanitaire des eaux souterraines apparaît fragile. En outre, pour une contribution aussi marginale, l'intégration des forages dans le bilan de production - avec des contraintes supplémentaires, notamment l'augmentation de l'emprise au droit de la station existante, la centralisation de la distribution, etc. - ajoute une complexité opérationnelle et de maintenance non négligeable.

La nanofiltration, bien qu'attrayante par sa capacité à abaisser simultanément tous les paramètres problématiques, présente des inconvénients majeurs dans un contexte comme celui de Goma : coûts d'investissement très élevés, forte consommation énergétique, pressions de service élevées (5–10 bars en plus de la pression de pompage), membranes fragiles à remplacer tous les 3–4 ans, pertes d'eau importantes (jusqu'à ~20 %) et production d'un concentrat salin à gérer.

L'électrocoagulation permet une réduction efficace conjointe de la dureté et du fluor, avec un équipement simple, peu d'entretien et une production limitée de boues. En revanche, elle se heurte à une consommation énergétique très élevée (environ 30 fois supérieure à celle de la décarbonatation), à la dissolution progressive des électrodes (aluminium ou fer), dont le remplacement fréquent peut

poser des difficultés d’approvisionnement, et à une stabilité opérationnelle dépendante de la qualité de l’alimentation électrique et du courant appliqué.

En comparaison, la filière de mise à l’équilibre (aération) + ajout de coagulant/oxydant + filtration réduit de manière notable la dureté, le fluor et le manganèse, avec des CAPEX/OPEX modérés, une exploitation plus simple et des pertes d’eau négligeables. Elle devrait permettre d’atteindre les normes de fluor et de manganèse (fondées sur le risque sanitaire), mais pas l’atteinte de la norme de la dureté (qui n’est pas basée sur un risque pour la santé humaine) peut rester limite.

Finalement, la décarbonatation offre un contrôle plus fin des paramètres que la seule aération-coagulation-filtration, et demeure nettement moins complexe à mettre en œuvre que la nanofiltration.

Tableau 5: Comparaison qualitative des différentes techniques envisagées afin de réduire la dureté et les concentrations en fluor et manganèse dans l’eau souterraine. Le symbole ‘+++’ indique la meilleure valeur pour le critère considéré, tandis que ‘-’ représente la moins favorable.

	Dilution	Aération, coagulation et filtration	Décarbonatation	Nanofiltration	Electro-coagulation/décarbonatation
Réduction des risques sanitaires	-	++	++	+++	+++
Atteinte de la norme pour la dureté	-	+	++	++	++
Coûts investissement	+++	+	+	-	-
Coût d’exploitation	+++	++	+	-	-
Difficulté d’exploitation	+++	+	+	-	-
Pertes en eau	+++ (< 1 %)	++ (< 3 %)	++ (3-5 %)	- (10-20 %)	++ (< 3 %)
Emprise foncière	++	++	+	+	+

En conséquence, l’étude retient les filières aération–coagulation–filtration et décarbonatation. En effet, elles offrent le meilleur compromis entre conformité aux normes, coûts (CAPEX/OPEX) et facilité d’exploitation/maintenance. Ces deux procédés peuvent par ailleurs être combinés afin de permettre un ajustement plus fin des dosages de réactifs et optimiser les performances.

#### 1.1.2.8. Données à acquérir pour fournir les paramètres de conception et critères de dimensionnement.

Étant donné que l’utilisation de réactifs est recommandée pour les deux méthodes techniques envisagées, il est nécessaire de réaliser un test de traitabilité pour les différentes techniques présélectionnées afin de définir les concentrations en réactifs optimales. Le test de traitabilité ("jar test") constitue une méthode efficace pour évaluer de manière mécanique et physique l’efficacité des différents traitements chimiques sur des échantillons d’eau, en reproduisant les conditions réelles d’une station de traitement afin d’optimiser les performances du procédé retenu. Le protocole pour réaliser le test de traitabilité est présent à l’Annexe 2.

#### 1.1.3. Paramètres de conception et critères de dimensionnement

Sur base des résultats d’analyse des laboratoires décrits précédemment et des normes existantes (et les plus restrictives) au niveau national ou au niveau de l’Organisation Mondiale de la Santé, les valeurs utilisées pour dimensionner le traitement de l’eau brute sont présentes au *Tableau 6*. Ce tableau reprend également les valeurs cibles pour l’eau traitée.

Tableau 6: Valeurs utilisées et cibles pour le dimensionnement de l’Unité de traitement

Paramètres	Unité	Valeurs utilisées	Valeurs cibles
pH		7.11	7
Conductivité	µS/cm	3 180	1 500

Paramètres	Unité	Valeurs utilisées	Valeurs cibles
Alcalinité	mg CaCO <sub>3</sub> /l	2 024	
Dureté totale	mg CaCO <sub>3</sub> /l	1 200	500**
Dureté carbonatée	mg CaCO <sub>3</sub> /l	1 200	500**
Dureté permanente	mg CaCO <sub>3</sub> /l	± 0	
Calcium	mg CaCO <sub>3</sub> /l	223	175**
Magnésium	mg CaCO <sub>3</sub> /l	877	208**
Fluorure	mg F/l	3.05	1.50
Manganèse	µg Mn/l	297	100
Température	°C	25	-
CO <sub>2</sub> libre*	mg CO <sub>2</sub> /l	213	-

\* Mesuré au moyen de la méthode Hallopeau & Dublin. pour une température de 25 °C.

\*\* Valeurs cibles qui ne sont pas basées sur des risques sanitaires.

# Annexe 4 : Extrait APD- SHER (traitement)

## Rappels de l'APS et points d'attention

### Rappels de l'APS

Le scénario 2 retenu à l'issue de l'Avant-Projet Sommaire (APS) correspond à une configuration à 5 forages associée au procédé de traitement A combinant le réseau primaire du scénario 2 et l'option de distribution B.

Selon les prévisions du schéma directeur de 2022, cinq forages sont prévus, dont trois nouveaux à réaliser en complément du forage existant GO-PW1 et du forage en cours de réalisation GO-PW2. Chaque ouvrage est dimensionné pour une exploitation de 200 m<sup>3</sup>/h sur une durée moyenne de 18 heures par jour. Cette estimation, fondée sur les résultats du forage GO-PW1 et appuyée par les observations géophysiques, demeure indicative en attendant les essais de pompage longue durée qui permettront d'affiner les caractéristiques hydrauliques et de vérifier l'absence d'interférences entre forages.

L'eau prélevée sera dirigée vers la station de traitement (UTE) située à proximité des forages. Le procédé de traitement envisagé reposera sur une filière de traitement adaptée à la qualité physico-chimique et bactériologique de la ressource souterraine. L'analyse des résultats de la qualité de l'eau réalisée lors de l'APS montre que les eaux souterraines du forage GO-PW1 sont fortement minéralisées, de type bicarbonaté calcique et magnésien, avec une dureté ( $\approx 1\ 200$  mg/l) et une alcalinité ( $\approx 1\ 800$  mg/l) très élevées. La dureté est essentiellement carbonatée/temporaire et la dureté permanente est très faible, voire nulle. Les résultats des deux campagnes d'analyse, réalisées à l'issue de prélèvements d'eau brute en décembre 2024, sont globalement cohérents et indiquent également des dépassements en fluorure (jusqu'à 3.6 mg/l) et manganèse (jusqu'à 500 µg/l) au-dessus des normes nationales et des valeurs guides de l'OMS, posant dès lors un risque sanitaire. L'eau présente par ailleurs un équilibre calco-carbonique instable, avec un risque d'entartrage lors du pompage et du traitement, ce qui constitue un autre enjeu technique pour le dimensionnement des installations. Les principales concentrations sont présentes dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Résultats d'eau brute – Données de base (Décembre 2024)

Paramètre	Unité	Résultat de l'Office Congolais de Contrôle	Résultat du Laboratoire de Spiez
Alcalinité	mg/l CaCO <sub>3</sub>	2 248	1 800
Dureté totale (TH)	mg/l CaCO <sub>3</sub>	1 024	1 400
Dureté calcique (TCa)	mg/l Ca	88	89
Dureté magnésique (TMg)	mg Mg/l	213	200
Fluor*	mg/l F	2.5	3.6
Manganèse**	mg/l Mn	0.5	0.11

\* Valeur guide actuelle de l'OMS = 1.5 mg/l, Norme de l'OCC = 2 mg/l

\*\* Ancienne valeur guide de l'OMS = 0.4 mg/l, Valeur guide actuelle de l'OMS = 0.08 mg/l

Les options de traitement ont été définies lors de l'APS en tenant compte des contraintes techniques et contextuelles du projet. Le recours à une unité de traitement est indispensable pour traiter le fluor et manganèse, et réduire la dureté, l'option de dilution avec d'autres ressources étant peu réaliste. Dès lors, trois variantes de traitement ont été proposées : A) une mise à l'équilibre par aération,

suivie d'une coagulation (au phosphate tricalcique, sulfate d'aluminium ou chlorure ferrique) et une filtration sur dolomie ; B) une décarbonatation totale sur une partie du débit et une coagulation et filtration sur l'autre partie du débit ; et, C) une décarbonatation partielle sur la totalité du débit. L'intérêt de ne décarbonater qu'une partie du débit, et de mélanger l'eau avec une partie de l'eau brute, est d'obtenir un pH moins élevé à corriger. La première variante permet une réduction du fluor et manganèse mais une très légère réduction de la dureté, tandis que les deuxièmes et troisièmes variantes permettent d'atteindre une dureté inférieure à 500 mg/l (valeur guide) ainsi qu'une réduction du fluor et du manganèse sous les normes. Ces variantes, au-delà de respecter les objectifs sanitaires pour le fluor et le manganèse, mais présentent des compromis différents. La variante A est la plus simple, la moins coûteuse, la plus facile à exploiter et celle qui génère le moins de boues, avec des réactifs globalement accessibles ; en revanche, elle ne permet pas d'atteindre la norme sur la dureté, même si elle en limite les effets en termes d'entartrage. Les variantes B et C permettent quant à elles d'atteindre la norme de dureté, mais au prix d'installations plus complexes, de coûts d'investissement et d'exploitation plus élevés, d'une emprise foncière plus importante, d'une production accrue de boues et d'une dépendance plus forte à des réactifs parfois difficiles d'accès.

L'APS conclut que, dans ce contexte, la variante A apparaît comme la solution initiale la plus robuste et la plus réaliste, avec la possibilité d'évoluer ensuite vers la variante B.

## Points d'attention

### Processus de traitement de l'eau

À la suite des recommandations formulées lors de l'APS, des essais de traitabilité ont été réalisés entre les phases APS et APD afin de confirmer et d'affiner le choix du procédé de traitement. Ceux-ci se sont concentrés sur la caractérisation de la qualité de l'eau brute du forage GO-PW1, afin de compléter les données existantes et vérifier l'adéquation des procédés de traitement proposés dans l'APS aux conditions réelles de la ressource, et sur la réalisation d'essais de traitabilité afin d'identifier les conditions optimales de réduction de la dureté, du fluor et du manganèse.

La méthodologie et les résultats détaillés sont présentés dans le rapport de conclusions d'essais et les principales conclusions sont reprises ici.

### Qualité de l'eau brute

L'eau brute a été testée deux fois sur le terrain, et deux échantillons ont également été envoyés à deux laboratoires différents (WASAC et Aqualytic, au Rwanda). Les résultats obtenus sont globalement cohérents avec les analyses antérieures des laboratoires SPIEZ et de l'OCC, notamment pour les paramètres clés que sont la dureté, le fluor et le manganèse (Tableau 8). Le fluor oscille en effet entre 2.0 et 3.6 mg/l, le manganèse varie entre 0.060 et 0.121 mg/l, et la dureté entre 1 020 et 1 200 mg/l de CaCO<sub>3</sub>. Certaines valeurs observées (notamment pour l'alcalinité, mesurée à 100 mg/l par le laboratoire WASAC) n'ont pas été retenues. Certaines différences entre paramètres ont également été identifiées (notamment la conductivité, plus élevée pour les échantillons analysés durant la mission, ceci malgré les concentrations plus faibles ou plus élevées pour certains cations (sodium, fer et aluminium) ou anions (chlorures et sulfates)) ; ces différences sont probablement liées à des incertitudes analytiques plutôt qu'à une évolution réelle de la qualité de l'eau.

Tableau 8 : Résultats d'eau brute – Données complémentaires (janvier 2026)

Paramètre	Unité	Résultat de WASAC	Résultat de Aqualytic
Alcalinité	mg/l CaCO <sub>3</sub>	100***	-
Dureté totale (TH)	mg/l CaCO <sub>3</sub>	1060	1 080
Dureté calcique (TCa)	mg/l Ca	72	115
Dureté magnésique (TMg)	mg Mg/l	211	236
Fluor*	mg/l F	3.1	2.2
Manganèse**	mg/l Mn	0.1	0.12

\* Valeur guide actuelle de l'OMS = 1.5 mg/l, Norme de l'OCC = 2 mg/l

\*\* Ancienne valeur guide de l'OMS = 0.4 mg/l, Valeur guide actuelle de l'OMS = 0.08 mg/l

\*\*\* Valeur non retenue – il s'agit sans doute de 1 000 mg/l de CaCO<sub>3</sub> et c'est cette valeur qui sera utilisée par la suite. Il est toutefois à noter qu'une valeur d'alcalinité de 1900 a été mesurée à partir des mesures de terrain.

#### Tests de traitabilité

Les résultats des tests de traitabilité réalisés en janvier 2026 indiquent tout d'abord qu'une aération de l'eau brute entraîne une modification de l'équilibre de l'eau en sortie de forage, avec un dégazage du CO<sub>2</sub>, une augmentation du pH (de 6.46 lors du prélèvement à 7.96 après 48 h d'aération) et une diminution progressive de la dureté et du calcium (de 33 mg/l à environ 7 mg/l de Ca).

Les essais de traitabilité réalisés avec le phosphate tricalcique, dans le cadre d'un abattement spécifique du Fluor donnent des résultats peu fiables. Une augmentation du fluor corrélée avec une augmentation de la concentration ajoutée, est très certainement due à une contamination en fluor des deux réactifs différents de phosphate tricalcique proposés lors des tests de traitabilité. Cela indique des spécificités liées à l'approvisionnement en produit de qualité.

Les essais réalisés avec le sulfate d'aluminium indiquent que l'utilisation du sulfate d'aluminium permet une réduction du fluor, mais nécessite des doses élevées et reste insuffisante pour atteindre les normes pour le fluor sur base des résultats obtenus. Le chlorure ferrique montre, quant à lui, une bonne efficacité avec un abattement croissant avec le dosage, permettant d'atteindre les normes pour le fluor, mais au prix de fortes consommations et avec des contraintes importantes d'approvisionnement.

Enfin, la chaux présente les résultats les plus probants, avec une capacité à réduire simultanément la dureté, le fluor et le manganèse. Toutefois, des doses élevées (supérieures à 1 500 mg/l) sont nécessaires. Ce procédé ouvre néanmoins la possibilité d'un traitement partiel du débit, combiné à une dilution avec de l'eau brute en sortie de décarbonatation. Les résultats des tests de traitabilité indiquent que l'utilisation de chaux à de fortes concentrations augmente évidemment considérablement la turbidité (jusqu'à 2800 UTN mesuré au niveau du laboratoire WASAC pour un échantillon avec 1 500 mg/l de chaux non filtré).

#### Conclusion sur les tests de traitabilité

Les tests de traitabilité n'ont pas permis de confirmer la variante 1 pour réduire les concentrations en fluor sous les normes et valeurs guides de l'OMS. L'option qui sera dès lors développée dans l'APD est donc la variante 2 (décarbonatation totale sur une partie du débit). Cette option est en effet considérée plus sécuritaire, étant aussi mieux documentée.

Il est toutefois proposé de conserver une certaine flexibilité sur le dimensionnement des infrastructures afin de pouvoir évoluer vers la variante 1, centrée sur la seule défluorisation (si l'objectif est de réduire uniquement le fluor sans traiter la dureté et ainsi limiter la consommation de

réactifs). Cette option reste toutefois conditionnée à l'efficacité du phosphate tricalcique ou à de meilleurs résultats avec le sulfate d'aluminium, ce qui n'ont pas encore pu être démontrés.

Il est à noter que des essais de traitabilité complémentaires sont prévus, notamment sur le forage GO-PW2, ainsi qu'une possible reconduction des tests sur GO-PW1 afin de confirmer les résultats et d'évaluer d'autres sources d'approvisionnement en phosphate tricalcique

