



soyons **Nature** !

Provence - Alpes - Côte d'Azur

ZAC des Balarucs
12 Rue Toussaint Fléchaire
84510 Caumont sur Durance - France
Tél. +33 (0)4 90 01 21 21
paca@syntea.fr
www.syntea.fr



soyons **Nature** !

INRAE

Projet de recherche APPROVE

Rétention du phosphore sur apatites
naturelles : **Etude économique comparative**

Octobre 2021

Stéphane TROESCH, ECO BIRD
Fabien CLEMENT, ECO BIRD
Pierre-Yves RIOUAL, SYNTEA
Pascal MOLLE, INRAE
Laura DELGADO-GONZALEZ, INRAE





Résumé

Le projet APPROVE (APatite for Phosphorous Removal and Valorisation : an Evaluation) coordonné par INRAE en partenariat avec SYNTEA a permis de valider à l'échelle laboratoire l'intérêt technique d'une filière de déphosphatation par apatite naturelle.

Les critères de dimensionnements établis, ont permis d'extrapoler le design de cette nouvelle filière pour différentes contraintes de qualité d'eau et de rejet et ainsi que de comparer ses coûts d'investissements et d'exploitation théoriques avec ceux d'une filière « standard » de déphosphatation physico chimique.

L'étude économique présentée ici compare ainsi ces deux filières de traitement tertiaire du phosphore combinée chacune avec un pré-traitement de type filtres plantés de roseaux pour des stations de capacités inférieures à 2000 EH.

Abstract

The APPROVE project (APatite for Phosphorous Removal and Valorisation: an Evaluation) coordinated by INRAE in partnership with SYNTEA, has validated interest of a natural apatite for P removal from wastewater.

The sizing criteria established have made it possible to extrapolate the design of this new system for different water quality and discharge constraints, and thus to compare its theoretical investment and operating costs with iron dosing system and its sludge management.

The economic study presented here compares both options, each combined with reed bed filters for wastewater treatment plants with a capacity lower than 2,000 PE.



GLOSSAIRE :

- **APPROVE** : APatite for Phosphorous Removal and Valorisation : an Evaluation,
- **EH**: Equivalent-Habitant. Unité de mesure permettant d'évaluer la capacité d'une station d'épuration, basée sur la quantité de pollution émise par personne et par jour,
- **FPR** : Filtres Plantés de Roseaux,
- **INRAE** : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement,
- **LSPR** : Lit de séchage plantés de roseaux,
- **STEU** : Station de Traitement des Eaux Usées.

Table des matières

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Introduction..... | 6 |
| 2 | Contexte et Objectifs..... | 9 |
| 3 | Méthodologie..... | 9 |
| 3.1 | Quels scenarii à comparer ? | 9 |
| 3.2 | Quelles hypothèses pour le dimensionnement d'une déphosphatation par apatite naturelle ? | 13 |
| 3.3 | Identification des coûts pris en compte – Investissement / Exploitation..... | 17 |
| 3.3.1 | Physico chimique : | 17 |
| 3.3.2 | Filtre à apatite : | 18 |
| 4 | Résultats..... | 20 |
| 4.1 | Coûts d'investissement et d'exploitation en considérant 1t d'apatite à 385 € HT... .. | 20 |
| 4.1.1 | Objectif 2 mg P/L..... | 20 |
| 4.1.2 | Objectif 5 mg P/L..... | 22 |
| 4.1.3 | Objectif 10 mg P/L, réseau séparatif..... | 23 |
| 4.1.4 | Conclusions sur l'intérêt économique de la filière apatite vs physico chimique | 23 |
| 4.2 | Analyse de sensibilité du coût de l'apatite..... | 24 |
| 5 | Vers des pistes d'optimisation | 26 |
| 6 | Conclusion | 28 |

1 INTRODUCTION

En solution alternative au traitement physico-chimique, la filière de filtres garnis d'apatite pour le traitement du phosphore des petites collectivités s'est développée depuis quelques années à la suite des recherches menées par INRAE (ex IRSTEA) (Molle et al., 2012) puis en partenariat avec SYNTEA, qui a, par la suite, assuré le développement et la validation de la technologie pour sa commercialisation. Ce développement a notamment fait l'objet d'un brevet déposé par SYNTEA quant à la mise en œuvre de l'apatite dans une unité de déphosphatation (Brevet n° FR10 52555) selon un écoulement vertical. Ce procédé, de traitement tertiaire, permet de retenir le phosphore par des mécanismes d'adsorption et de précipitation. Le procédé nécessite un investissement de départ pour la mise en œuvre mais une gestion simple et peu coûteuse.

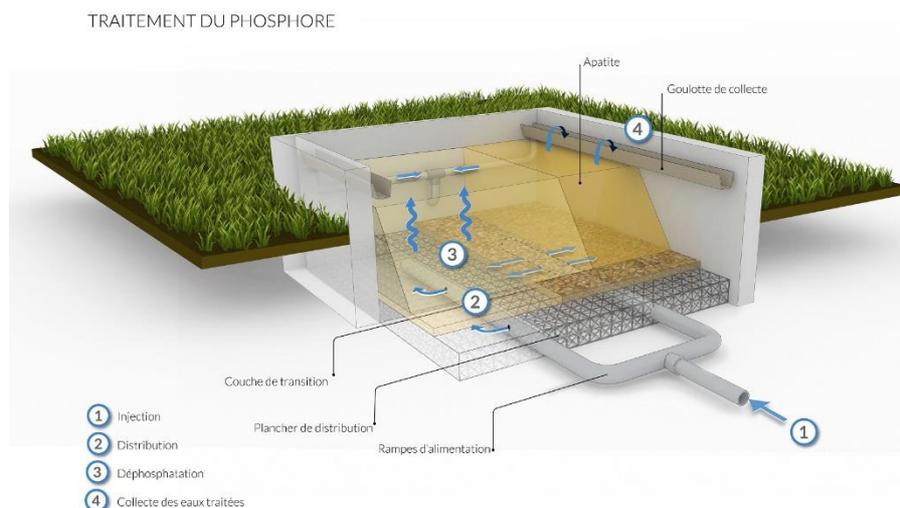


Figure 1 : Filtre de traitement du phosphore par apatite – flux vertical ascendant (brevet Epur Nature n° FR 12 60981)

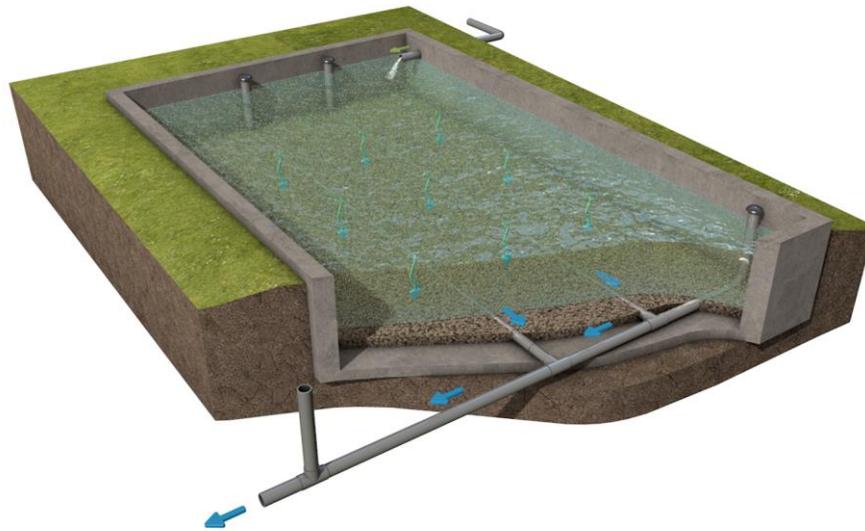


Figure 2. Filtre de traitement du phosphore par apatite – flux vertical descendant (brevet Epur Nature n° FR 12 60981)

Les études préalables (Molle 2005¹, Bellier 2006², Harouiya 2010³), menées sur des apatites naturelles, ont montré que celles qui présentent de bonnes performances de rétention du P, possèdent une granulométrie fine, ce qui pourrait représenter un problème pour le bon fonctionnement hydraulique du filtre. Par conséquent, des granules d'apatite avec une granulométrie appropriée ont été fabriquées à partir de l'apatite naturelle de haute teneur (roche phosphatée de haute teneur en apatite > 90%). Les granules commercialisées par la société Nuwen (ex Timab Produits Industriels, partenaire du projet) sous la marque Phosclean®, mises en œuvre dans des filtres à écoulement vertical ont ainsi fait l'objet des premières investigations dans le cadre du projet APPROVE (**APatite for Phosphorous Removal and Valorisation : an Evaluation**)

Cette évaluation a été menée à deux échelles différentes : (1) un retour d'expérience par la réalisation des campagnes intensives sur une sélection de filtres en taille réelle⁴, et (2) par l'expérimentation au laboratoire sur des colonnes en conditions contrôlées⁵.

Les performances observées sur les apatites granulées Phosclean® pour la rétention de phosphore sur le long terme se sont montrées limitées. Le produit semble en effet se

¹ Molle, P., Liénard, A., Iwema, A. & Kabbabi, A. 2005 Apatite as an interesting seed to remove phosphorous from wastewater in constructed wetlands. *Water Science and Technology* 51 (9), 193–203

² Bellier, N., Chazarenc, F. & Comeau, Y. 2006 Phosphorus removal from wastewater by mineral apatite. *Water Research* 40 (15), 2965–2971.

³ Harouiya, N., Prost-Boucle, S., Morlay, C., Esser, D., Martin Ruel, S. & Molle, P. 2010 Performances evaluation of phosphorus removal by apatite in constructed wetlands treating wastewaters: Column and pilot experiments. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*.

⁴ Delgado-Gonzalez L., Prost-Boucle S., Troesch S., Molle P. (2021) Granulated apatite filters for phosphorous retention in treatment wetlands: Experience from full-scale applications. *Journal of Water Process Engineering* 40 (2021) 101927

⁵ Delgado-Gonzalez L., Lartigues B., Gautier M., Troesch S., Molle P. (2021) Phosphorous retention by granulated apatite: assessing maximum retention capacity, kinetics and retention processes. *WST* - doi: 10.2166/wst.2021.010

comporter comme un matériau adsorbant et ne permet pas de déclencher de processus pérenne de rétention par précipitation.

Devant ce constat, il a été décidé au regard des performances déjà observées sur des apatites naturelles (Molle et al, 2005) d'investiguer et d'évaluer en colonnes de laboratoire les performances de deux apatites naturelles non granulées mais présentant une granulométrie fine proche du produit commercial, **ceci afin de maintenir une perspective de développement de la filière.**

Les apatites naturelles testées ont montré des résultats cette fois-ci prometteurs. Elles ont été capables d'initier une rétention de phosphore sur le long terme, en montrant des cinétiques élevées avec de performances de rétention au-dessus de 80% et des taux de saturation supérieurs à 18 g PO₄-P/kg matériau, jusqu'alors non atteint avec ce type de matériau⁶.

La caractérisation du matériau et de ses performances lors des expérimentations en conditions colonnes ont permis de définir de premiers critères de dimensionnement de cette filière et retenus pour cette étude économique.

⁶ Molle.P (2003) atteint en condition laboratoire sur colonne, un taux de saturation de 14 g PO₄-P/kg avec de l'apatite naturelle. Référence : Molle (2003). Filtres plantés de Roseaux: Limites hydrauliques et rétention du phosphore. PhD Génie de procédés, Université de Montpellier

2 CONTEXTE ET OBJECTIFS

L'étude économique développée dans ce rapport repose ainsi sur la mise en œuvre d'un filtre déphosphatant composé d'apatite naturelle transformée mais non granulée, dont les performances permettent de respecter les seuils réglementaires de 2 mg P/L. Le dimensionnement de cette nouvelle filière repose sur les résultats acquis sur le produit évalué en colonnes sur une durée d'une année ayant permis d'atteindre un taux de saturation de l'ordre de 18 g PO₄-P/ kg de matériau que l'on se propose d'extrapoler à 20 g PO₄-P. En effet, sans connaître la limite en termes de saturation, nous supposons dans cette étude cette dernière valeur comme le taux maximal de rétention avant renouvellement puisque les rendements encore conséquents à 18 g PO₄-P/kg montrent qu'il y a très peu de risque à considérer cette hypothèse⁷.

Aussi, l'objectif est ici de comparer les coûts d'investissement et d'exploitation de cette nouvelle filière de déphosphatation à base d'apatite naturelle avec ceux de la filière conventionnelle physico chimique pour le cas des stations d'épurations de petites et moyennes collectivités jusqu'à 2 000 EH.

Afin de limiter le nombre de configurations envisageables, seules seront comparées ici les stations de traitements composées de filtres plantés de roseaux.

3 METHODOLOGIE

3.1 Quels scénarii à comparer ?

D'un côté, sous réserve d'une efficacité minimale de la filière de traitement amont, la filière de déphosphatation par apatite est un traitement tertiaire de finition. De l'autre côté, le traitement par voie physico chimique peut reposer sur plusieurs configurations selon la filière d'assainissement : mise en œuvre en pré-précipitation, dans le bassin de traitement (boues activées) ou en post précipitation.

Pour rappel :

Le traitement du phosphore par voie physicochimique consiste à « piéger » le phosphore dissout sous forme particulaire. Ce changement de phase a lieu au contact de cations (ions calcium, magnésium ou ferriques) apportés soit par les eaux usées (précipitation naturelle), soit par ajout de réactifs à base de fer, d'aluminium ou de chaux (précipitation forcée).

Les principaux mécanismes intervenants sont au nombre de trois (Maurer et Boller, 1998):

⁷ Si la valeur de 20g/kg avec des rétentions opérantes semble largement raisonnable, la vraie limite en termes de saturation n'est pas connue à l'heure actuelle. Il sera nécessaire d'enrichir cette étude économique avec l'avancée des connaissances dans la mesure où une rétention supérieure impacterait significativement l'intérêt économique de la filière.

- **précipitation chimique de complexes hydroxydes métalliques;**
- **adsorption sélective d'espèces phosphorées dissoutes sur la surface de complexes déjà précipités**
- **floculation et co-précipitation de matière colloïdale finement dispersée.**

Ces trois mécanismes ont normalement lieu simultanément, et leur action combinée est responsable des hautes performances de déphosphatation généralement atteintes dans les stations de traitement chimique.

La séparation du phosphore particulaire de l'eau a ensuite lieu lors de la décantation (solution la plus courante), soit avec des équipements spécifiques comme la flottation, décantation ou la filtration.

Toutefois, à l'échelle des petites collectivités, le traitement physico-chimique présente certains désavantages en termes :

- de coût d'investissement : compris entre 300 et 15€ /EH pour une capacité de traitement comprise dans la gamme de $100 < EH < 10\ 000$ en boues activées.
- de coût de fonctionnement lié à la consommation de réactif chimique : environ 200 à 300 € /tonne de sels métalliques, de 1 à 2% des coûts d'exploitation de la station soit de 2 à 3 €.EH⁻¹.an⁻¹ ;
- de la nécessité de disposer d'électricité sur des stations de type rustique (FPR ou lagunage par exemple) qui peuvent potentiellement s'en affranchir ;
- de contraintes en termes de présence et de surveillance du bon fonctionnement
- de contraintes en termes de manipulation de réactifs corrosifs ;
- d'augmentation jusqu'à 20% de la quantité de boues produites, dont le coût de traitement et d'évacuation représente environ 2/3 du coût de réactif ;
- de risque de relargage de métaux (Fe ou Al) dans les milieux récepteurs ;
- de valorisation des boues contenant des sels métalliques notamment pour l'aluminium

Dans la filière filtres plantés de roseaux, le choix de l'emplacement du dispositif d'ajout de réactif va être déterminant en termes de maintenance et d'efficacité de rétention. La filtration des boues produites ne peut raisonnablement se faire sur un deuxième étage de traitement végétalisé garni de sable en surface en raison des risques de colmatage occasionnés par celles-ci. Par conséquent, les solutions envisagées sont de placer l'étape de précipitation soit :

- **en tête de station**, avec l'avantage de ne pas complexifier la filière avec l'ajout d'un décanteur tertiaire mais avec les contraintes suivantes :
 - Ajout plus important de chlorure ferrique. Environ deux fois plus de réactifs qu'une post-précipitation;
 - Relargages du P en présence de conditions anoxiques ou anaérobies lors d'épisodes de fortes charges hydrauliques et/ou organiques avec un corollaire

majeur : difficulté à garantir moins de 2 mg/L de P en sortie.

- Risques d'un déficit du P pour la filière biologique en aval
-
- **sur des eaux sorties du premier ou du deuxième étage et boues recirculées en tête de station avec un dimensionnement adapté ou traitées sur une filière dédiée (Lits de séchage plantés de roseaux par exemple).** On notera que la recirculation des boues en têtes de station peut présenter, en cas d'un sous dimensionnement du filtre plantés ou d'une mauvaise connaissance du réseau, un risque de relargage de phosphates lié à des surcharges hydrauliques et conditions anoxiques associées. Pour cette raison, cette dernière configuration n'a pas été retenue pour la suite de cette étude économique.

Les principaux avantages de la post-précipitation :

- Deux fois moins de réactifs qu'une pré-précipitation
- Performances jusqu'à 1 mg/L de P en sortie sous réserve d'un dosage fin⁸
- Rétention de la pollution organique particulaire en sortie de station.

L'inconvénient majeur de la post-précipitation repose sur le coût d'investissement et contraintes d'exploitation importantes du décanteur lamellaire (départ de boues, surcharge hydraulique, fréquence de lavage), qui peuvent toutefois être relativisées s'il permet d'économiser d'autres ouvrages, d'augmenter les performances (dans la limite du débit de référence) ou de sécuriser le rejet (abattement complémentaire de la pollution particulaire notamment).

Les filières déphosphatantes qui seront comparées dans cette étude sont synthétisées dans les deux schémas ci-après :

- traitement physico-chimique en post-précipitation de FPR avec décanteur lamellaire et LSPR pour traitement/déshydratation des boues in situ,
- traitement par filtre garni d'apatite naturelle en aval d'une filière Filtres plantés de Roseaux.

⁸ L'auteur entend par « dosage fin » la nécessité d'appréhender au mieux la qualité des effluents à traiter par mesure régulière des concentrations en P et d'intégrer une régulation pour la gestion de temps de pluie sur la base du débit transitant sur la STEU. Une mauvaise intégration de ces paramètres conduit incontestablement à des sous ou sur-dosages de chlorure ferrique ayant un impact négatif sur le milieu.

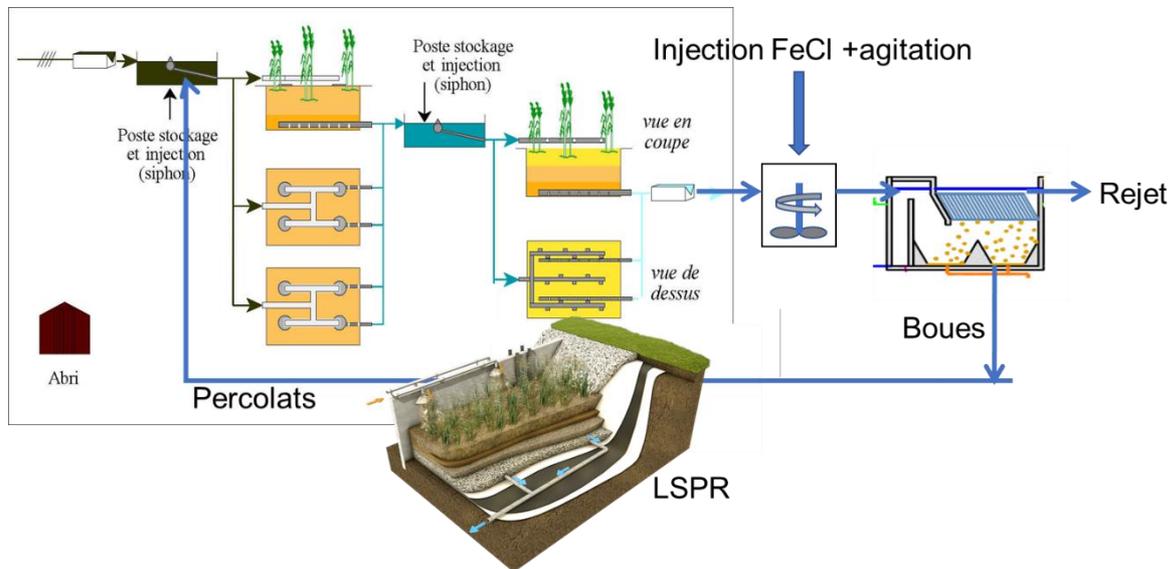


Figure 3. Filière de déphosphatation en physico-chimie post-précipitation de FPR avec décanteur lamellaire et LSPR pour séparation des boues physico chimiques

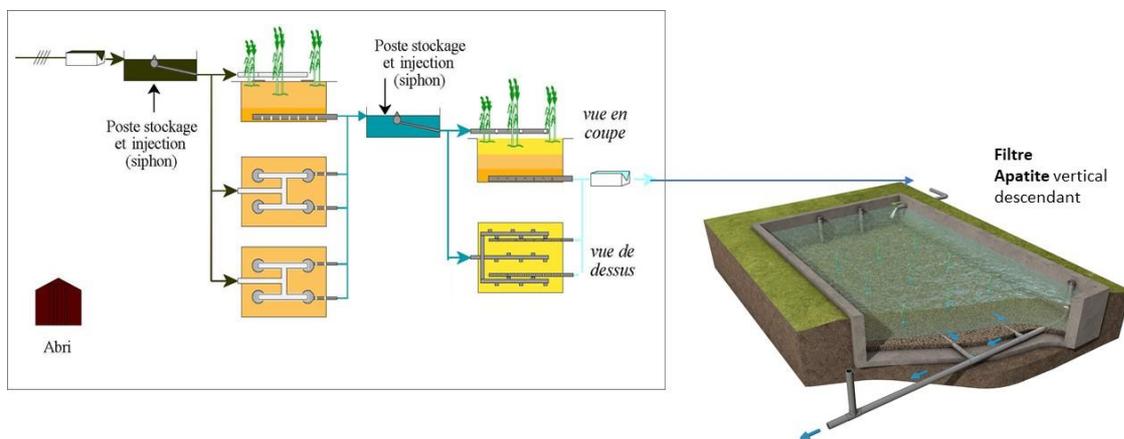


Figure 4. Filière de déphosphatation par Filtre à Apatite en aval FPR

Par chacune des filières il sera considéré différentes charges hydrauliques (réseau séparatif ou unitaire recevant des eaux claires parasites permanentes [ECP]), trois objectifs qualitatifs (2, 5 et 10 mg P/L en sortie⁹) pour une gamme de capacité allant de 100 EH à 2 000 EH.

⁹ Il est retenu au minimum une concentration de 2 mg/L de rejet en P (moy annuelle) correspondant selon le guide « ELEMENTS DE METHODE POUR LA DEFINITION DES NIVEAUX DE REJETS DU PETIT COLLECTIF » (EPNAC 2015) à la valeur seuil tenable pour les petites collectivités (200 à 2000EH) selon le retour d'expériences et sous conditions d'exploitation dans les règles de l'art et si l'enjeu est démontré.

Les scénarii évalués dans cette étude sont synthétisés dans le Tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1. Hypothèses de données d'entrée pour étude comparative Physico-chimique VS Apatite

| Type de traitement | Type de réseau | Concentration Pt en entrée | Concentration Pt en sortie |
|--------------------|----------------|----------------------------|----------------------------|
| Fe Cl3 | Séparatif | 17mg/L | 2 mg/l |
| | ECP 100% | 8mg/L | |
| | Séparatif | 17mg/L | 5 mg/l |
| | ECP 100% | 8mg/L | |
| | Séparatif | 17mg/L | 10 mg/l |
| | ECP 100% | 8mg/L | |
| Apatite | Séparatif | 17mg/L | 2 mg/l |
| | ECP 100% | 8mg/L | |
| | Séparatif | 17mg/L | 5 mg/l |
| | ECP 100% | 8mg/L | |
| | Séparatif | 17mg/L | 10 mg/l |
| | ECP 100% | 8mg/L | |

3.2 Quelles hypothèses pour le dimensionnement d'une déphosphatation par apatite naturelle ?

Pour rappel, le filtre d'apatite promeut une rétention irréversible des phosphates contenus dans les eaux usées par des phénomènes de sorption ayant lieu à la surface du solide. Deux mécanismes de rétention différents ont été identifiés : l'adsorption et la précipitation de surface.

Comme décrit dans le guide « Apatite »¹⁰ publié par l'INRAE, le volume d'apatite à mettre en œuvre est estimé selon les objectifs à atteindre et temps de séjours nécessaires à partir d'une cinétique réactionnelle de rétention du P du 1^{er} ordre (Equation 1) – modèle k-C*.

$$C = (C_0 - C^*)e^{-k_v \cdot t_s} + C^* \quad [1]$$

Avec C la concentration de sortie (mgP/L)

C0 la concentration d'entrée (en mgP/L),

¹⁰ Déphosphatation des eaux usées par filtres plantés garnis de phosphorites : Recommandations pour le développement de la filière, Molle P., Harouiya N., Prost-Boucle S., Morlay C., Esser D., Martin S., Besnault S., 2012

C^* la concentration résiduelle (mgP/L),
 k_v la constante réactionnelle (h^{-1}) et
 t_s le temps de séjour dans le filtre(h).

Ce modèle a été utilisé pour comparer différents matériaux et caractériser leur cinétique de rétention du phosphore. Plus la valeur de la constante cinétique k_v est élevée, plus les vitesses de rétention sont importantes. Lorsque des apatites naturelles sont utilisées il a été observé que la valeur de k_v évolue avec le niveau de saturation, indiquant que les processus mis en jeu changent au cours du temps (Figure 1).

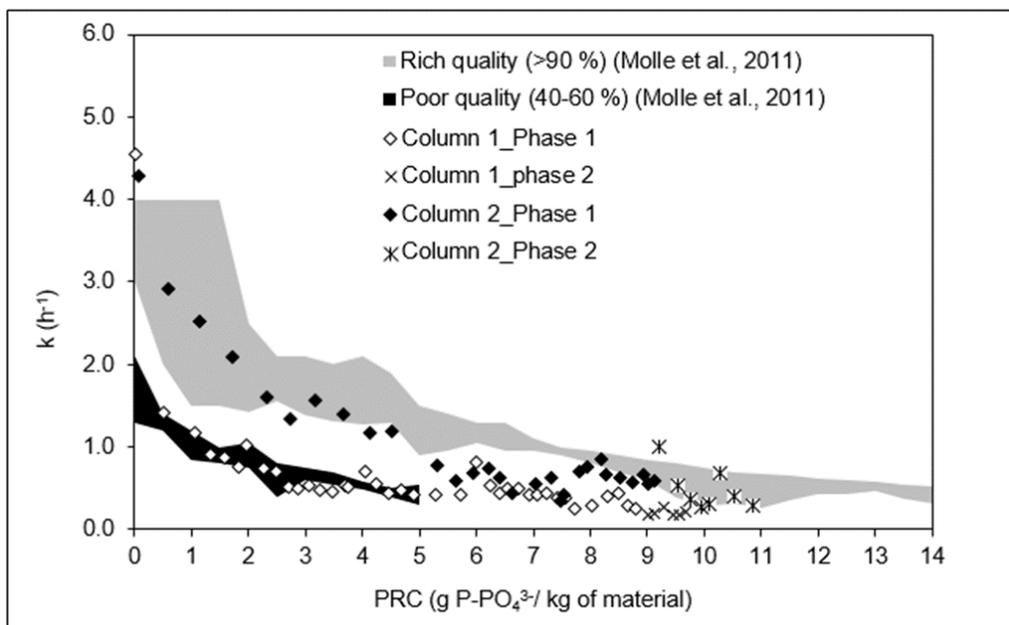


Figure 5. Evolution des cinétiques de rétention selon le taux de saturation selon différents matériaux

Les évolutions des paramètres k_v et C^* mesurées et modélisées lors du suivi en colonnes de laboratoires ont permis dans cette étude d'estimer les volumes d'apatite nécessaires pour les différents scénarii retenus, et synthétisés dans le Tableau 2 ci-après.

La géométrie du filtre à apatite (surface, profondeur,...) sera quant à elle également fonction :

- de la charge organique maximale applicable sur un filtre à percolation verticale sur support fin saturé en eau,
- de la charge hydraulique maximale autorisée par la conductivité hydraulique à un taux de saturation maximal en phosphore (obturation chimique du volume poral) et/ou du développement de biomasse
- de l'épaisseur minimum de matériau réactif pour s'affranchir des passages préférentiels.

Les **hypothèses** de dimensionnement / exploitation retenus pour les **deux filières** étudiées sont :

- Les simulations sont réalisées en considérant une production de P de 2,5 g P/EH.j et d'eaux usées de 150 L/EH.j.
- La filière amont de type FPR n'assure aucune rétention du P. La totalité du P reçue en entrée de STEU sera reçue par l'ouvrage de déphosphatation.
- La filière amont fournit une qualité d'effluent en entrée de filière au maximum de 20 mg/L en DBO5 et 25 mg/L en MES.
- Durée de fonctionnement de 20 ans

Les **hypothèses** complémentaires de dimensionnement / exploitation retenues pour le **filtre à apatite** sont les suivantes :

- Volume d'apatite nécessaire estimé par modèle cinétique k-C* (Tableau 2)
- Filtre à écoulement vertical saturé en traitement tertiaire avec concentration en DBO5 < 20 mgO2/L en entrée
- Critère de charges hydrauliques (CH de 0,8 m/j temps sec et 1,6 m/j temps de pluie) et charges organiques max de 25 g DBO5/m².j variables selon la CH
- Epaisseur de la couche de filtration d'apatite comprise préférentiellement entre 0,3 m et 0,6 m
- Taux de saturation maximal du matériau avant renouvellement de 20 g P/kg apatite
- Evacuation du matériau saturé pour valorisation en engrais (producteur engrais)
- Apatite naturelle répondant au cahier des charges SYNTEA (teneur en P, distribution granulométrique,...)

On retiendra une emprise de filtre à apatite comprise entre 0,5 et 0,8 m²/EH selon les scénarii envisagés. Ceci soulève, comme pour l'ensemble des filières d'assainissement extensif, la disponibilité de l'emprise foncière comme critère de choix.

Les **hypothèses** complémentaires de dimensionnement / exploitation retenues pour le **physico-chimique** :

- Chambre de mélange (temps de séjour de 15 min) + décanteur lamellaire
- Volume journalier de FeCl3 selon ratio molaire compris entre 0,8 et 1,5 selon rendement souhaité
- Lits de séchage plantés de roseaux pour le stockage et la déshydratation des boues (stockage sur 10 ans)

A noter enfin qu'il est considéré pour les deux filières la possibilité de bypasser une partie de flux (cf **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) pour les objectifs de 5 mg P/L avec 100% d'ECP et 10 mg P/L. En effet cela permet d'alléger la charge hydraulique reçue par le filtre ou la chambre de

mélange/décanteur et par conséquent réduire les dimensions des ouvrages pour lesquels l'hydraulique demeure ici le paramètre discriminant.

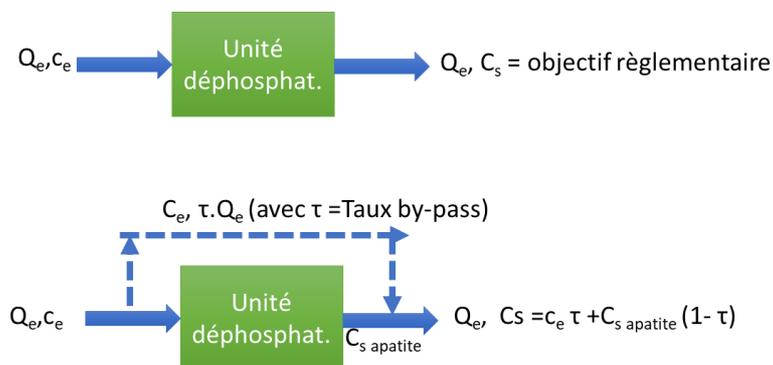


Figure 6. Configuration alimentation filtre à apatite sans et avec By-pass.

Tableau 2. Synthèse des scénarii étudiés et volume de réactifs correspondants

| Type de traitement | Type de réseau | Concentration Pt en entrée | Concentration Pt en sortie | Volume de réactif (kg FeCl3/EH) Ou Vol apatite (L/EH) | Config avec une partie du flux By-passé |
|--------------------|----------------|----------------------------|----------------------------|---|---|
| Fe Cl3 | Séparatif | 17mg/L | 2 mg/l | 14,1 kg/EH.an | NON |
| | ECP 100% | 8mg/L | | | NON |
| | Séparatif | 17mg/L | 5 mg/l | 11 kg/EH.an | NON |
| | ECP 100% | 8mg/L | | | OUI |
| | Séparatif | 17mg/L | 10 mg/l | 6 kg/EH.an | OUI |
| | ECP 100% | 8mg/L | | | - |
| Apatite | Séparatif | 17mg/L | 2 mg/l | 360 L/EH | NON |
| | ECP 100% | 8mg/L | | | 330 L/EH |
| | Séparatif | 17mg/L | 5 mg/l | 300 L/EH | NON |
| | ECP 100% | 8mg/L | | | 170 L/EH |
| | Séparatif | 17mg/L | 10 mg/l | 150 L/EH | OUI |
| | ECP 100% | 8mg/L | | | - |

3.3 Identification des coûts pris en compte – Investissement / Exploitation

L'étude économique présentée ici compare deux solutions de déphosphatation tertiaire dont les critères de dimensionnement et d'exploitation et coûts associés reposent sur des hypothèses non représentatives de tous les cas de figures (contraintes de sites, foncier disponible, contraintes géotechniques, ...). L'étude vise avant tout à dégager des tendances entre les deux filières considérées afin d'appréhender l'intérêt économique d'une solution vis-à-vis de l'autre selon la capacité de la station de traitement. Les hypothèses de chiffrage des coûts d'investissement et exploitation (CAPEX/OPEX) des deux filières comparées sont décrites dans les points suivants.

3.3.1 Physico chimique :

L'investissement repose sur la fourniture / pose et toutes sujétions des éléments suivants :

- Poste de relevage pour alimentation filière FeCl₃
- Chambre de mélange avec agitateur
- Cuve de stockage FeCl₃ (autonomie de 6 mois), pompes doseuses, douche avec rince œil
- Décanteur lamellaire avec pompes de soutirage des boues en cale sèche avec débitmètre électromagnétique
- Lits de séchages plantés de roseaux en déblais/remblais étanché par géomembrane avec murs de séparation béton pour stockage / déshydratation sur 10 ans (dimensionnement à 30 kg MS/m².an)
- Module de pilotage (électricité, automatismes et télégestion) intégré dans l'armoire électrique existante de la station (forfait de 7000 €).

Les coûts d'exploitation pris en compte dans l'étude :

- Main d'œuvre (environ 100h/an à 35€/h)
- Consommation de réactif pour un traitement tertiaire selon ratios molaire Fe/P compris entre 0,8 et 1,5 selon rendement visé (cf Tableau 2)
- Achat réactif FeCl₃ (210 €/t) et transport/dépotage (1000 € par prestation)
- Renouvellement du matériel électromécanique (pompes relevage, doseuses, soutirage boues, agitateur,...) sur période de 10 ans (forfait de 700 €/an),
- Consommation électrique
- Curage des boues du LSPR et évacuation avec boues STEP tous les 10 ans par épandage (200 €/t)

3.3.2 Filtre à apatite :

L'investissement du filtre à apatite se décompose selon les postes suivants :

- Poste de relevage/alimentation du filtre
- Bassin d'apatite en déblais remblais du site, étanché par géomembrane avec rampe de distribution
- Fourniture d'apatite (coût au m³ de 540 € HT soit 385€/t) + transport et mise en œuvre (55€/t).
- Fourniture d'une couche de transition et drainage sous-jacente
- Fourniture d'une couche de matériau de neutralisation de pH en surface (10 cm de calcite)
- Fourniture de végétaux pour couverture de surface
- Regard de collecte et de mise en charge
- Module de pilotage (pompes et télégestion) intégré dans l'armoire électrique existante de la station (forfait 2 000€) .

Les chiffrages réalisés sont estimés pour une installation hors contraintes géotechniques particulières avec hypothèse de réemplois des déblais en remblai sans traitement, hors clôture, hors aménagement des espaces verts périphériques.

Nota : Estimation du coût de fourniture du matériau apatitique

A l'heure de la rédaction de ce document le produit apatitique selon le cahier des charges SYNTEA, et tel que testé dans l'étude laboratoire, n'est pas commercialisé. Les frais d'importation, conditionnement, stockage sont encore à l'étude et sont variables selon les volumes considérés, étapes de transformation / adaptation du produit au contexte spécifique du projet APPROVE.

Aussi, selon les différentes approches économiques menées, il est considéré dans un premier temps dans cette étude un coût de fourniture de produit correspondant à l'enveloppe estimative haute, départ plateforme stockage française, de 385 € HT /t soit environ 540 € HT/ m³.

Les coûts d'exploitation de la filière apatite pris en compte dans l'étude :

- Main d'œuvre (environ 20 h/an à 35€/h) pour entretien filtre (désherbage), Poste de relevage/pompage et abords
- Renouvellement du matériel électromécanique (pompes relevage tous les 10 ans),
- Consommation électrique pompage,
- Renouvellement de l'apatite tous les 10 ans et évacuation de l'apatite saturée pour valorisation du phosphore (production d'engrais). Le produit saturé n'est pas considéré comme un déchet (mise en décharge). En effet, si l'innocuité du produit final en fin de vie et sa possible réutilisation (réintroduction dans une filière de valorisation de type engrais

phosphaté ou acide phosphorique) reste à démontrer, la mise en décharge d'un produit dont le gisement est considéré comme ressource non renouvelable est à nos yeux une piste à proscrire pour l'étude économique. Toutefois, le coût de mise en décharge ISDND du produit en fin de vie est estimé à moins de 0,1€/EH.an, ce qui reste négligeable devant les coûts d'exploitation globaux.



On rappelle également ici que la durée de vie considérée de l'apatite naturelle est celle équivalente à un taux de saturation du produit de l'ordre de 20 g P/ kg apatite. Ce taux de saturation ne constitue pas le taux maximal dans la mesure où des cinétiques importantes ont encore été observées en colonnes mais dont l'évolution à des taux de saturation supérieurs restent à ce jour non investigués.

4 RESULTATS

Les résultats sont synthétisés dans les parties suivantes, pour chaque scénarii envisagé, sous formes de graphique intégrant les « coûts d'investissement » et « coûts d'investissement/exploitation annuel » pour une durée de 20 années, des deux solutions de déphosphatation étudiées pour des capacités de traitement comprises entre 100 et 2000EH.

Ces premiers résultats sont ceux obtenus en considérant un coût de fourniture de l'apatite 385 € HT/t départ « usine » en France.

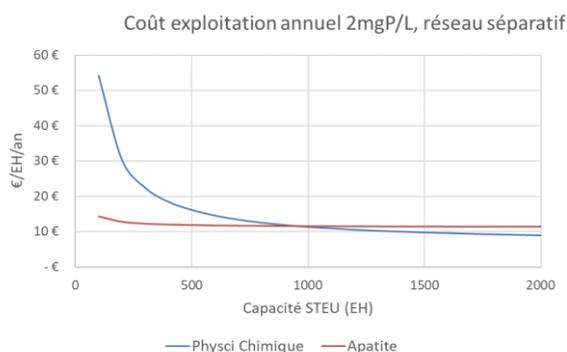
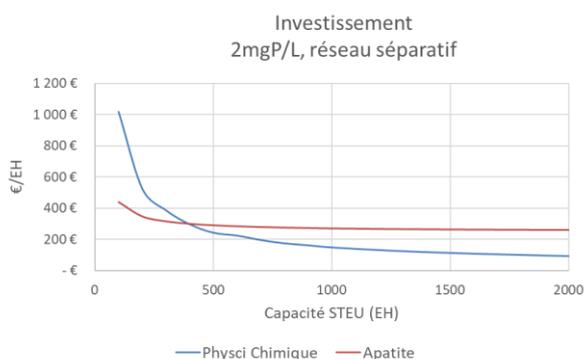
Ce coût estimé lors de cette étude autorise une première approche économique et, on le rappelle, reste conditionné à un certain nombre de facteurs liés au tonnage importé, des coûts de logistique de conditionnement et de stockage.

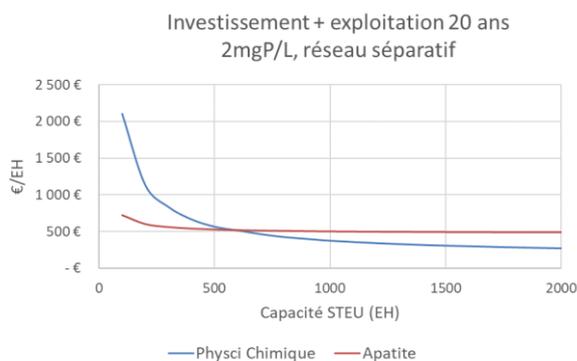
Aussi, devant le risque de variabilité de ce coût de vente, il est proposé dans un second temps d'effectuer une analyse de la sensibilité des coûts globaux (investissement seul et « investissement + exploitation cumulée sur 20 ans ») sur une plage de coût d'apatite comprise entre 300 et 400 € HT/t. Cette plage de coûts correspond aux seuils estimés à ce jour, et permettra d'évaluer l'impact du prix de vente de l'apatite sur l'intérêt de la filière globale vis-à-vis d'un traitement physico-chimique.

4.1 Coûts d'investissement et d'exploitation en considérant 1t d'apatite à 385 € HT

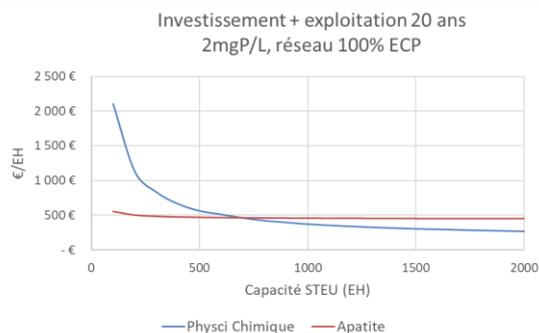
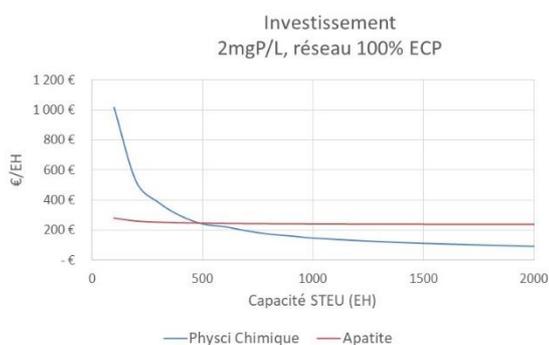
4.1.1 Objectif 2 mg P/L

a) Réseau séparatif





b) Réseau unitaire avec ECPP à 100%



c) Analyse

L'objectif qualitatif de 2mg P/L reste pour les deux scenarii étudiés (séparatif ou unitaire avec 100% d'ECPP) plus intéressant en investissement pour le traitement physico chimique à partir d'une capacité supérieure de 400-500 EH.

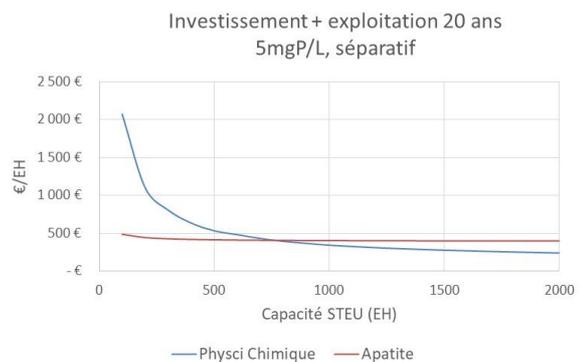
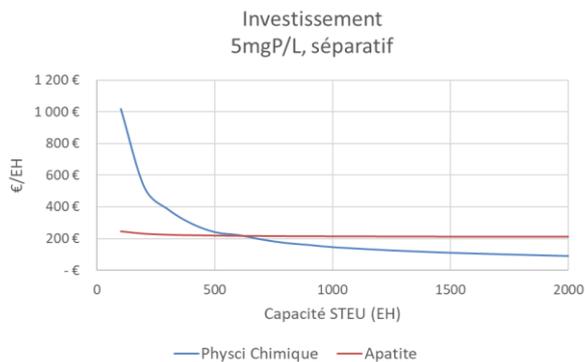
En prenant en compte le coût d'investissement majoré des coûts exploitation sur 20 années l'intérêt du filtre à apatite augmente jusqu'à une capacité de 600-700 EH.

On notera que l'écart des coûts d'exploitation annuels reste très faible pour des capacités supérieures à 800-1000 EH de l'ordre de 1 à 2 €/EH.an.

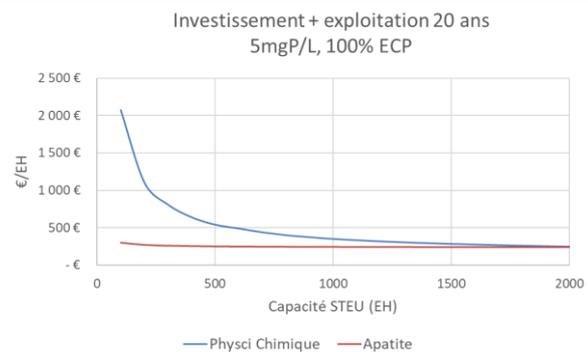
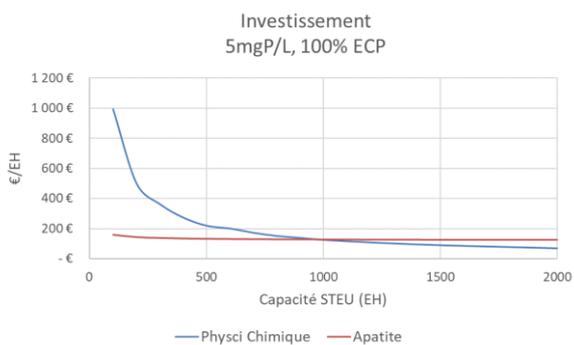
Ici pour un objectif de qualité de 2 mg P/L, le facteur limitant demeure principalement le volume conséquent d'apatite à mettre en œuvre et à renouveler régulièrement. Il sera donc nécessaire à l'avenir de bien définir la fréquence de renouvellement nécessaire si l'on peut atteindre des niveaux de saturation supérieurs à 20g/kg.

4.1.2 Objectif 5 mg P/L

a) Réseau séparatif



b) Réseau unitaire avec ECPP à 100%



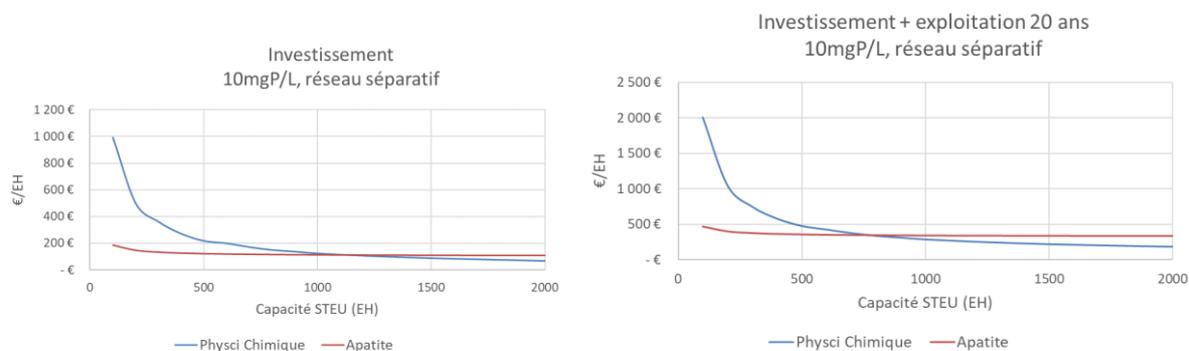
c) Analyse

La filière apatite est ici avantageuse en investissement et en « investissement + exploitation » jusqu'à des capacités respectives de 500 et 700 EH pour un réseau séparatif. Ces capacités sont augmentées à 1 000 EH et plus de 1 500 EH respectivement dans le cas d'un réseau unitaire recevant 100% d'ECPP.

Ceci s'explique par une économie plus conséquente sur la réduction du volume d'apatite autorisée par une fraction du débit by-passé que le gain réalisé par un dimensionnement réduit de la chambre de mélange et du décanteur lamellaire sur la filière physico-chimique.

Des objectifs de traitement moindre et une dilution des eaux à traiter jouent en faveur de la filière apatite.

4.1.3 Objectif 10 mg P/L, réseau séparatif



Pour un objectif de qualité de 10 mg/L la solution par apatite est plus intéressante en investissement jusqu'à 1000 EH, mais se voit ramenée à 700 EH en considérant les coûts d'exploitation. En effet le coût de renouvellement du matériau apatitique reste pénalisant devant les faibles consommations en réactif.

Pour ces niveaux de rejet peu contraignants, d'autres solutions de déphosphatation alternatives seraient à envisager comme le lagunage (si objectif estival uniquement) ou filtre à calcite dont le potentiel a pu être estimé dans le travail de thèse de Molle P. (Molle, 2003).

4.1.4 Conclusions sur l'intérêt économique de la filière apatite vs physico chimique

La filière apatite voit son intérêt économique pour des capacités principalement inférieures à 700 EH et un objectif de 2 mg P/L, qui reste le plus courant en zones sensibles à l'eutrophisation ou sur des milieux sensibles

Ceci est en grande partie pénalisé par une fréquence de renouvellement surestimée puisqu'il est fait l'hypothèse que le produit n'est plus réactif au-delà d'un taux de saturation de 20 g PO₄-P/kg ; limite au-delà de laquelle les investigations ont été arrêtées sans pour autant observer une chute significative sur les rendements.

Pour des objectifs qualitatifs moins contraignants l'apatite paraît avantageuse jusqu'à des capacités de STEU comprises entre 1000 et 2000 EH.

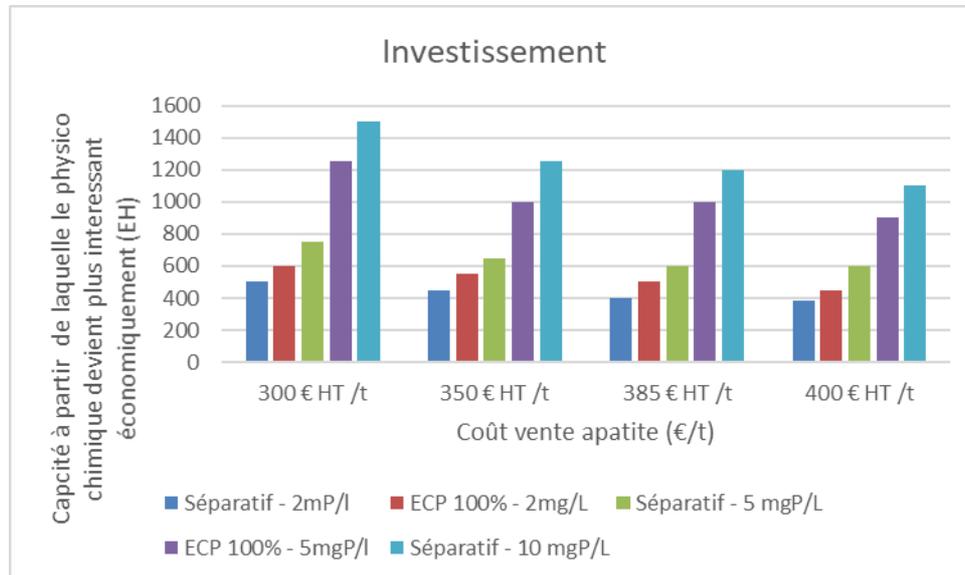
Devant ces considérations, il est également à remettre en perspective la robustesse de la filière apatite qui, à défaut de maintenance, ou de surcharge hydraulique assurera un traitement fiable et pérenne ce qui reste moins évident pour le traitement physico chimique assujéti à une maintenance régulière des pompes doseuses, au renouvellement de réactifs, au risque de départ de boues en surcharge hydraulique,....

4.2 Analyse de sensibilité du coût de l'apatite

Comme précisé ci-avant, ce chapitre se veut d'apporter une analyse de l'impact du coût de vente de l'apatite et dont les prix sont encore soumis à ce jour à un certain nombre de variables comme, le coût de la matière première fluctuant selon le contexte géopolitique et/ou d'amenuisement de la ressource, les volumes importés, le coût de transformation, le conditionnement et le stockage.

Nous estimons au moment de la rédaction de ce rapport (octobre 2021) que les coûts de vente du produit sont susceptibles de s'échelonner sur la base de différents scénarii entre 300 € HT et 400 € HT/t ; départ site de conditionnement/stockage en France.

Les graphiques ci-dessous représentent ainsi pour différents coûts de vente d'apatite compris dans cette fourchette, les capacités des STEU au-delà desquelles la solution « physico-chimique » devient économiquement avantageuse « investissement seul » et en « investissement et exploitation sur 20 années ».



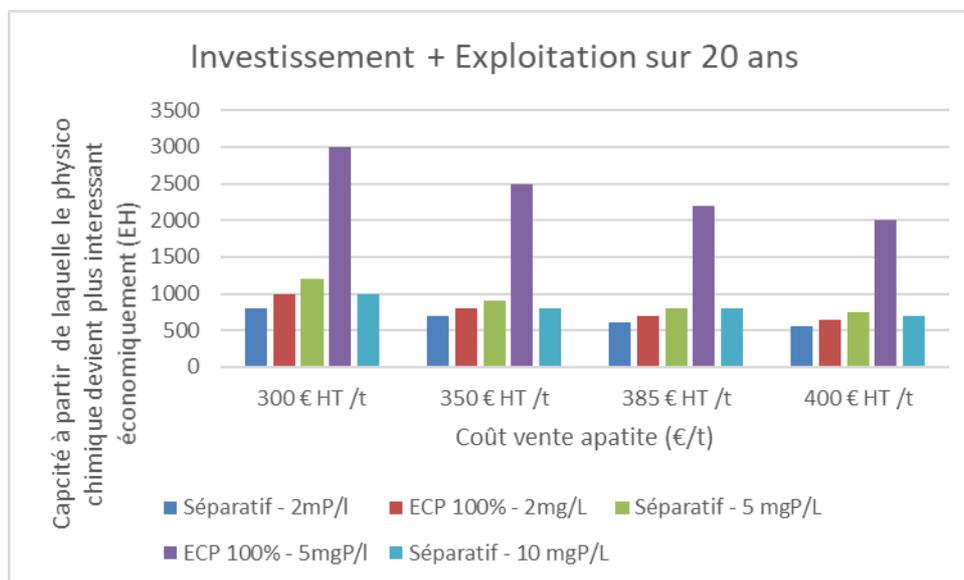


Figure 7. Seuils de capacité de STEU au de-là desquels la solution physico-chimique est économiquement plus avantageuse que la filière apatite en « investissement » et « investissement et exploitation » en fonction du prix de vente de la tonne d'apatite.

Il apparaît en considérant l'investissement seul, que le prix de vente de l'apatite (sur la fourchette considérée) influence peu les seuils de compétitivité avec la solution physico-chimique pour des objectifs contraignants (< 5mgP/L).

A contrario, le prix de vente de l'apatite est plus influent sur les « coûts d'investissement et d'exploitation » dans la mesure où la consommation de réactifs (apatite ou chlorure ferrique) prend la part prépondérante de cette approche. Aussi, pour un objectif de 2 mg P/L, la filière apatite est compétitive devant le physico chimique jusqu'à 800 EH – 1000 EH pour un prix de vente de 300 € HT/t et chute à 550-650 EH pour un prix de 400€/t.

Enfin, si pour un objectif de 5 mg P/L sur un réseau unitaire recevant des ECPP la filière apatite ne fait pas de doute quel que soit le prix de vente estimé du produit (gamme de 300 à 400€/t), le prix définira le seuil de compétitivité pour des objectifs qualitatifs plus contraignants et nécessitera une analyse au cas par cas pour juger de la pertinence économique et ce pour des capacités jusqu'à 1000EH.

5 VERS DES PISTES D'OPTIMISATION

Si de toute évidence l'économie repose davantage sur la fréquence de renouvellement de l'apatite que sur le coût de l'apatite elle-même (dans la gamme de 300 à 400 € HT/t), une optimisation pourrait reposer sur la mise en série de deux filtres (cf figure ci-dessous) ce qui autoriserait à diminuer la fréquence de renouvellement et donc les OPEX.

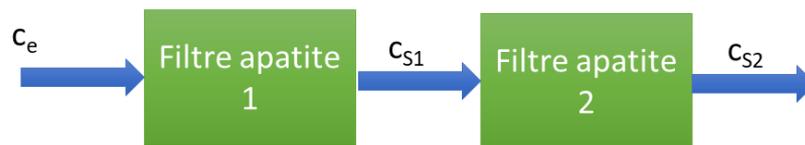


Figure 8. Configuration à deux filtres à apatite en série

En effet, comme le montre le graphique ci-dessous, représentant l'évolution des concentrations en P en sortie de chacun des filtres en série, l'intérêt repose sur i) la possibilité d'avoir un effluent pré-traité en entrée du second filtre et de limiter drastiquement sa fréquence de renouvellement et ii) de renouveler le premier filtre uniquement lorsque celui-ci aura atteint son taux de saturation maximal de 20 g P/kg ce qui n'est pas systématiquement le cas pour une filière monoétagée. En effet, celle-ci peut faire l'objet d'un renouvellement de l'apatite alors que le taux de saturation maximal n'est pas encore atteint mais le niveau de rejet dépassé, tel qu'illustré Figure 10 où l'apatite doit être renouvelée à un taux de saturation de 17 g P/kg avant de franchir le seuil des 2 mg P/L visé.

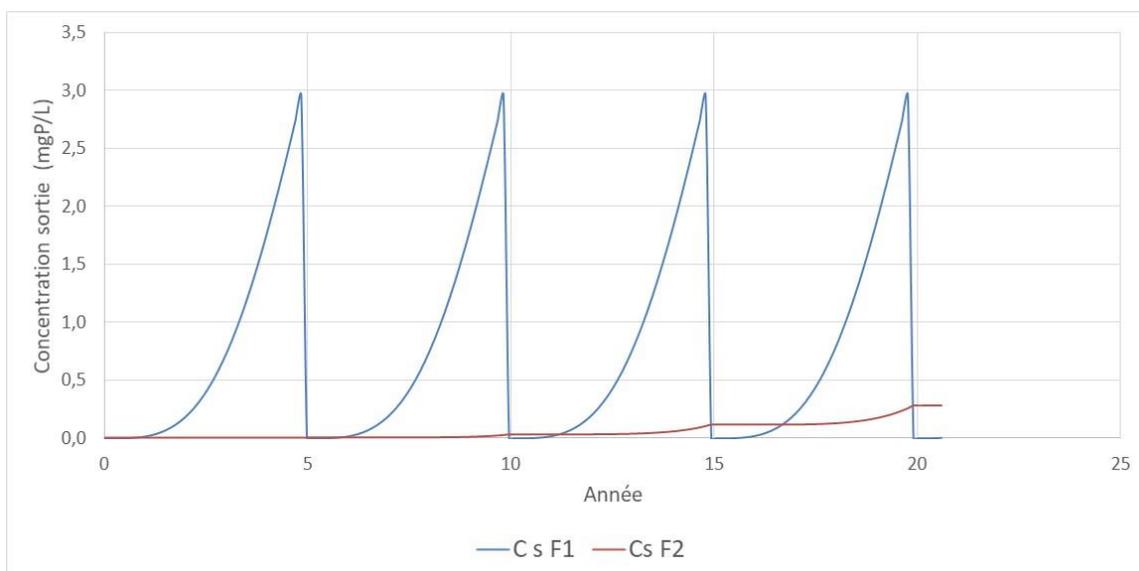


Figure 9. Evolution des concentrations en P en sortie de filtre primaire (150 L apatite/EH) et secondaire (100L apatite/EH) pour un réseau séparatif et un objectif de 2 mgP/L

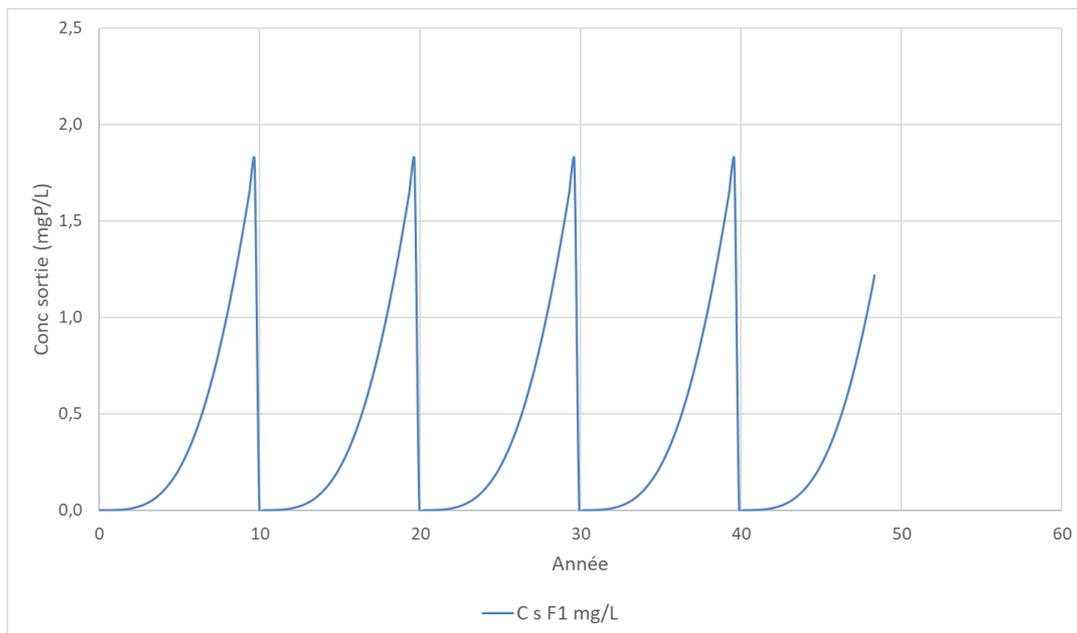


Figure 10. Evolution de la concentration en P en sortie de filtre primaire (360 L apatite/EH) pour un réseau séparatif et un objectif de 2 mgP/L avec renouvellement tous les 10 ans à un taux de saturation de 17 gP/kg.

A titre d'exemple, le tableau ci-dessous compare les volumes d'apatite nécessaires sur une durée de vie de 20 ans pour un objectif de 2mg P/L sur réseau séparatif ou recevant des ECPP, entre une configuration avec un seul filtre et 2 filtres en série.

| Type de réseau | Concentration Pt en entrée | Concentration Pt en sortie | 1 filtre | | | 2 filtres en série | | | | |
|----------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--|
| | | | Volume de réactif/EH | Fréquence renouvellement | Volume nécessaire total durée 20 ans | Volume de réactif FILTRE 1 / EH | Volume de réactif FILTRE 1 / EH | Fréquence renouvellement F1 | Fréquence renouvellement F2 | Volume cumulé à renouveler ts les 20 ans |
| Séparatif | 17mg/L | 2 mg/l | 360 L/EH | Tous les 10 ans | 720 L/EH | 150 L/EH | 100 L/EH | Tous les 5 ans | Aucun | 600 L/EH |
| ECP 100% | 8mg/L | | 330 L/EH | Tous les 10 ans | 660 L/EH | 150 L/EH | 100 L/EH | Tous les 5 ans | Aucun | 600 L/EH |

Si le gain d'une configuration à 2 filtres en série sur la fréquence de renouvellement et donc le volume global d'apatite nécessaire ne semble pas à toute évidence justifier le surcoût à l'investissement (deux bassins et deux postes d'alimentation) il est à noter que cette stratégie autoriserait sur le long terme une fiabilisation des performances et l'obtention de niveau de rejets inférieurs à 1mgP/L (Figure).

Ceci augmenterait par conséquent l'intérêt de cette filière vis-à-vis d'un traitement physico-chimique d'un point de vue fiabilité tant sur un niveau de rejet délicat à atteindre que d'un point de vue économique. De même, si l'on peut monter, sur le premier filtre, à des niveaux

de saturation supérieurs à 20 g/kg, cela rendrait plus intéressante la filière à deux étages successifs.

Cette filière prometteuse nécessiterait cependant une phase de validation à échelle industrielle avant sa commercialisation.

6 CONCLUSION

Cette étude propose une première approche économique quant à l'intérêt de la filière de déphosphatation par « apatite naturelle » équipant des stations de traitement des eaux usées en milieu rural par FPR en comparaison avec une filière physico-chimique.

L'étude se base sur un certain nombre d'hypothèses qui en pose les limites tant sur la durée de vie de l'apatite avant son renouvellement (sous-estimation du taux de saturation maximal) que de son prix de vente dont le produit demeure toujours non commercialisé à ce jour.

Dans le cadre de ces hypothèses, la filière de déphosphatation par apatite présente un intérêt plus ou moins fort selon la typologie de réseau (Unitaire vs Séparatif), les performances à atteindre et la capacité de l'installation.

Pour un objectif qualitatif de 2 mg P/L, principalement visé en zone sensible pour des STEU de capacité de plus de 500 EH, la filière apatite est pertinente jusqu'à une capacité avoisinante les 1000 EH uniquement si l'on considère les coûts d'investissements majorés des coûts d'exploitation.

Aussi, afin d'asseoir l'intérêt de cette filière pour une gamme plus étendue, des configurations alternatives, comme la mise en œuvre de filtres en série, permettraient une économie du volume de matériaux à renouveler pour des performances équivalentes voire supérieures. Ce serait sur ce dernier point que la filière pourrait notamment trouver un intérêt économique certain devant la filière physico chimique, puisqu'elle laisse entrevoir des seuils de concentrations atteignables inférieurs à 1 mg P/L tout en offrant une simplicité d'exploitation et une robustesse accrue.

Il apparaît en ce sens primordial de valider cette configuration par des essais sur pilotes de taille semi industrielle ou industrielle, ce qui autoriserait également à évaluer le taux de saturation maximal, aujourd'hui non évalué, et d'entrevoir la possibilité de réutiliser le matériau en fin de vie comme matière première pour la production d'engrais phosphaté.

Enfin, au-delà des limites économiques définies dans cette étude pour une déphosphatation par apatite, il apparaît important de rappeler que l'intérêt premier de cette filière repose sur sa simplicité, sa robustesse et son efficacité.

En effet, les variations de charges en P ou les variations hydrauliques que rencontrent souvent les STEU rendent les systèmes physico-chimiques souvent défailants.

A cela viennent également s'ajouter :

- **l'absence de consommation de réactifs chimiques à renouveler régulièrement,**
- **les risques de dysfonctionnement des pompes doseuses**
- **la nécessité d'une main d'œuvre qualifiée**

et potentiellement, sous réserve d'investigations complémentaires, une filière vertueuse s'inscrivant dans l'économie circulaire par la réutilisation possible de nutriments de nos eaux usées (production d'engrais phosphatés, acide phosphorique,..). A ce titre, une étude complémentaire de type Analyse de Cycle de Vie permettrait d'évaluer la pertinence environnementale de cette filière

Enfin, les auteurs rappellent ici que l'intérêt de la filière de déphosphatation par apatite naturelle est à ce stade uniquement validée à l'échelle laboratoire et que sa réplique à échelle industrielle en conditions réelles demande encore aujourd'hui une phase de validation complémentaire nécessaire pour lever les verrous toujours existants (taux de saturation maximal, comportement hydraulique en conditions réelles,..).