



Optimisation de la précipitation chimique du phosphore avec KemConnect™ P

Jordi Batlle^a, Aleix Barrufet^a, Roger Castellnou^b, Marc Freixa^b, Joan Montoro^b, Jordi Ruiz^a.

^a Kemira Ibérica, S.A.

^b Depuradores d'Osona

Abstract

High phosphorous and nitrogen levels at wastewater treatment plant's discharge, specially on high sensitive areas, may lead to eutrophication phenomena development with fatal consequences to marine life and water quality. That is why current Urban Wastewater Treatment Directive (Council Directive 91/271/EEC) establishes a limitation on phosphorous concentration at the effluent of a wastewater

La présence de niveaux élevés de phosphore et d'azote dans les eaux usées rejetées vers des zones particulièrement sensibles peut conduire au développement de processus d'eutrophisation avec des conséquences fatales sur la faune marine et la qualité des eaux de la zone. C'est pour cette raison que la législation actuelle impose des limites à la qualité des rejets des stations d'épuration (STEP).

Dans les STEP, l'élimination du phosphore jusqu'à des valeurs inférieures à 1 mg P_T/l doit être réalisée par précipitation chimique à l'aide de coagulants, compte tenu de leur rendement élevé. Cependant, ces processus dépendent fortement de la qualité de l'eau à traiter et du point de dosage des coagulants.

Kemira a développé KemConnect™ P, basé sur un nouvel algorithme de contrôle, pour déterminer les doses optimales de coagulant. L'application de cette technologie dans la STEP de Vic (Catalogne) a permis d'augmenter de 15% l'efficacité de l'élimination du phosphore et de réduire la consommation globale de coagulant de 8% par rapport à la même période il y a un an, en maintenant à tout moment une qualité constante et uniforme des effluents.

treatment plant according to its treatment capacity.

In wastewater treatment plants, phosphorous removal to meet values at discharge under 1 mg P_T/L needs to be addressed through chemical precipitation strategies with coagulant dosing given the high removal rate provided. However, chemical precipitation is extremely dependent on water quality, coagulant dosing point, mixing properties and coagulant side reactions with other chemical species.

Kemira has developed KemConnect™ P application. In this document, its implementation in Vic's WWTP (Cataluña) to control phosphorous precipitation process is presented. The application, through an outstanding control algorithm, has helped increasing 15% treatment efficiency and decreasing 8% coagulant consumption compared to same period one year before while maintaining a constant and consistent effluent quality at discharge.

INTRODUCTION GÉNÉRALE EUTROPHISATION

On sait que des teneurs élevées en nutriments (azote et phosphore notamment) dans les effluents en sortie de station d'épuration peuvent conduire au développement de processus en chaîne dans les masses d'eau recevant lesdits effluents : rivières, bassins ou lacs. Ces processus sont appelés *eutrophisation* et se caractérisent principalement par une détérioration de la qualité de l'eau du milieu récepteur avec des effets critiques sur la flore et la faune qui l'habitent [1-3].

L'augmentation de la disponibilité de nutriments limitants dans les masses d'eau réceptrices des rejets des stations d'épuration représente une augmentation des processus photosynthétiques qui conduisent à la formation de couches ou de tapis d'algues, lesquels causent des variations du pH de l'eau, réduisant sa transparence et, par conséquent, la possibilité pour la lumière du soleil d'y pénétrer. Lorsque la population d'algues entre dans la phase de mort cellulaire, cela provoque une forte consommation d'oxygène dans les processus de dégradation par d'autres micro-organismes, ce qui conduit à la formation de zones anoxiques et anaérobies avec des effets mortels sur les organismes qui y habitent [1-4]. Dans certains cas, certaines espèces d'algues génèrent des toxines nocives lors de leur dégradation, qui peuvent également affecter la santé humaine lorsque ces plans d'eau sont utilisés à des fins récréatives.

MÉCANISMES D'ÉLIMINATION DU PHOSPHORE

Dans une station d'épuration, les composés du phosphore peuvent être éliminés par des processus de nature biologique (dans les cas où le traitement biologique est adapté à cet effet) ou chimique par précipitation avec des composés de type coagulant. Il peut être intéressant de combiner les deux stratégies pour atteindre des pourcentages d'élimination élevés.

• ÉLIMINATION BIOLOGIQUE DU PHOSPHORE

Les procédés biologiques de déphosphatation nécessitent l'adoption de certaines configurations dans les réacteurs des stations d'épuration et requièrent dans un premier temps une étape

anaérobie. À ce stade, les micro-organismes accumulateurs de polyphosphates (PAO) obtiennent de l'énergie en brisant les liaisons des molécules de polyphosphate (qu'ils accumulent au niveau intracellulaire) et en réduisant leur énergie par l'hydrolyse du glycogène en glucose. Ces deux ressources servent à consommer de la matière organique sous forme d'acides gras volatils ou d'autres substances facilement assimilables (C₂ à C₅) et à la stocker sous forme de polyhydroxyalcanoates (PHA). L'hydrolyse des molécules de polyphosphate entraîne la libération de phosphore dans le milieu [5-7].

En phase aérobie, les micro-organismes PAO métabolisent le PHA accumulé en phase anaérobie pour générer de l'énergie sous forme d'ATP qui permet la croissance de la population microbienne, la régénération du glycogène et l'accumulation intracellulaire de phosphore sous forme de polyphosphates.

L'objectif, en termes de phosphore, est que son assimilation en phase aérobie soit supérieure à la libération qui se produit en conditions anaérobies. Cela dépend fortement de la relation entre les niveaux d'acides gras volatils et la teneur en phosphore de l'eau. Dans des conditions de traitement stables, il est possible d'atteindre des valeurs de phosphore total comprises entre 0,5 et 2 mg P_T/l dans l'eau traitée en fonction des rapports entre les niveaux de phosphore et d'acides gras volatils dans l'influent [5-7]. Cependant, lorsque les boues de traitement entrent dans des conditions anaérobies, soit lors d'opérations de sédimentation, soit lors d'opérations de digestion, il peut se produire une augmentation de la teneur en phosphore soluble dans l'eau en raison de leur libération.

• ÉLIMINATION DU PHOSPHORE PAR PRÉCIPITATION CHIMIQUE

L'utilisation de composés de type coagulant dans le traitement des eaux usées a un impact très important sur l'élimination du phosphore par précipitation chimique avec un coût relativement faible.

Dans les stations où une stratégie de type CEPT (*Coagulant Enhanced Primary Treatment*) [6-9] a été mise en œuvre dans le traitement primaire, une partie des composés organiques du phosphore présents dans l'influent peut augmenter

sa sédimentabilité grâce à l'utilisation de coagulants lors de cette étape.

Le phosphore soluble sous forme d'orthophosphate provenant de l'influent lui-même ou provenant des processus de transformation et d'hydrolyse de polyphosphates ou de composés organiques lors d'un traitement biologique peut réagir avec des composés coagulants en formant un précipité. Lorsque le chlorure ferrique est utilisé comme coagulant, la réaction de précipitation chimique peut être décrite selon l'équation 1.



Sur le plan stœchiométrique, le rapport Fe:P pour une précipitation complète de FePO₄ est de 1 à 1,5:1 sur une base molaire. Ce rapport est connu sous le nom de facteur β [6-9]. Cependant, en pratique, il dépend de différents facteurs :

- *L'étendue de l'élimination du phosphore ou la valeur souhaitée dans l'effluent de l'usine*; les valeurs de phosphore des effluents inférieures à 0,2-0,3 mg PO₄/l nécessitent des rapports Fe:P plus élevés pour que la précipitation soit complète. En effet, le métal, en plus du phosphore, réagit avec d'autres espèces contenues dans l'eau. Par conséquent, l'application de règles de proportionnalité pour les précipitations de phosphore avec des plages considérables n'est pas valide.
- *Point de dosage de sel métallique*; La présence de solides en suspension, notamment de matières organiques particulières, exerce un effet de demande de coagulant. Pour cette raison, à dose égale de coagulant, l'élimination du phosphore aura une portée différente si des processus de pré-précipitation (en traitement primaire), de précipitation simultanée (en traitement biologique) ou de post-précipitation (traitement tertiaire) sont mis en œuvre.
- Lors de l'utilisation de composés coagulants, il faut tenir compte du fait qu'en plus de la réaction décrite dans l'équation 1, la formation d'hydroxyde métallique peut se produire simultanément. L'équation 2 décrit le processus lorsqu'un coagulant à base ferreuse est utilisé dans le système :

$$Fe^{3+} + 3H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 3H^+$$
 (par exemple. 2)

La précipitation chimique du phosphore peut être en partie stœchiométrique comme décrit dans l'équation 1, tandis qu'un autre pourcentage peut avoir lieu grâce au piégeage de composés particuliers du phosphore dans des réseaux d'hydroxydes métalliques mais avec moins d'efficacité. La répartition entre les deux pourcentages, fortement dépendante du degré de mélange du processus, peut avoir un effet important sur le rapport Fe:P nécessaire.

PROJET DE NOUVELLE DIRECTIVE SUR LE TRAITEMENT DES EAUX USÉES URBAINES (UWWTD)

CONTEXTUALISATION ET OBJECTIFS

La directive actuelle sur le traitement des eaux urbaines résiduaires (91/271/CEE) [10] a été adoptée en mai 1991 avec pour objectif principal de protéger l'environnement des effets néfastes des rejets d'eaux usées et d'établir des normes minimales de traitement au niveau européen. Cependant, la nécessité de mettre à jour cette directive a conduit à une révision approfondie de celle-ci en 2019 [11].

Dans cette révision, différents points d'action ont été identifiés, parmi lesquels la mise à jour des limites de certains contaminants dans les eaux traitées en raison de l'avancement des techniques de traitement depuis la publication de la directive actuelle ainsi que l'inquiétude croissante face aux nouveaux contaminants émergents (d'origine pharmaceutique et microplastiques) et leur impact sur la santé des individus. Les points identifiés ont fait l'objet d'une évaluation d'impact pour déterminer la viabilité de leur mise en œuvre et leur portée. Ainsi, en ce qui concerne l'élimination des nutriments (azote et phosphore),

l'établissement de limites plus strictes (tableau 1) dans les effluents en sortie des stations d'épuration a été proposée. Leur mise en œuvre sera systématique dans les stations de capacités nominales supérieures à 100 000 équivalents habitants mais également dans les stations de capacités inférieures à 10 000 équivalents habitants lorsque le rejet intervient dans des zones particulièrement sensibles à l'eutrophisation.

NUMÉRISATION DU CONTRÔLE DES TRAITEMENTS

La proposition de révision de l'actuelle directive sur le traitement des eaux urbaines résiduaires établit la nécessité de mettre à jour les stations d'épuration en termes de technologies de l'information. L'objectif principal est d'accroître la transparence des opérations et de disposer de données évolutives sur certains paramètres d'intérêt grâce à une surveillance continue. La numérisation des traitements obtenue grâce à la mise en œuvre de ces mesures permet également d'utiliser tous les outils de gestion de données disponibles et de soutenir la prise de décision stratégique ainsi que le développement d'une logique de contrôle avec un haut degré de personnalisation de la station en question.

CONTRÔLE DE LA PRÉCIPITATION CHIMIQUE DU PHOSPHORE

La directive actuelle sur le traitement des eaux urbaines résiduaires ainsi que la proposition de modification établissent les limites maximales autorisées dans la concentration de nutriments (en l'occurrence le phosphore) dans les effluents de la station (tableau 1). Certaines stations disposent de permis de rejets cumulatifs sur une base annuelle, tandis que dans d'autres, la limite est journalière.

Tableau 1.- Proposition pour l'établissement de nouvelles limites du rejet de nutriments. (*) Application dans les stations d'une capacité supérieure à 100 000 éq. h. et les stations d'une capacité supérieure à 10 000 éq. h. avec rejet dans des zones particulièrement sensibles à l'eutrophisation [10,11].

Nutriment	Proposition de modification		91/271/CEE	
	Valeur au rejet	Pourcentage d'élimination	Valeur au rejet	Pourcentage d'élimination
Phosphore	0,5 mg P _r /l *	90 %	(1-2) mg P _r /l	80 %
Azote	6 mg N _r /l *	85 %	(10-15) mg N _r /l	(70-80) %

Si l'on considère le processus de précipitation chimique du phosphore grâce à l'utilisation de composés de type coagulant, dans de nombreux cas, le respect des limites de rejet autorisées est obtenu en sacrifiant les coûts de traitement, c'est-à-dire grâce à un surdosage prolongé dans le temps. Habituellement, la seule modulation appliquée résulte de la correction des doses mise en œuvre sur la base d'analyses quotidiennes pour vérifier la concentration des rejets en phosphore.

Cette opération, diamétralement opposée à l'optimisation des coûts de traitement, peut être (et a été) aggravée en période de rareté des matières premières pour la fabrication des sels métalliques coagulants et d'augmentation des coûts énergétiques associés à leur fabrication.

C'est pourquoi la mise en œuvre de stratégies de contrôle avancées est essentielle pour optimiser les coûts de traitement et l'utilisation efficace des produits chimiques qui y sont associés. Il existe différentes logiques de contrôle sur le marché associées au processus de précipitation chimique du phosphore grâce à l'utilisation de coagulants. L'une des plus courantes consiste peut-être à appliquer des boucles de contrôle fermées via un régulateur proportionnel, intégral et dérivé (PID) classique. La détermination de la concentration de phosphore dans l'eau au moyen d'analyseurs automatiques n'est cependant pas obtenue en continu comme c'est le cas avec des valeurs telles que le pH, le potentiel redox ou la conductivité spécifique. Ceci, combiné aux temps de rétention du processus, conduit à ce que les boucles de contrôle basées sur un schéma PID soient discrètes, ce qui représente certainement un défi au niveau du réglage des contrôleurs. À une époque où les coûts des coagulants restaient faibles, un mauvais ajustement des paramètres de contrôle conduisant à des surdoses n'était pas préoccupant. Cependant, le scénario actuel de disponibilité, de coûts de fabrication élevés et de prévision de limites de rejet de phosphore plus strictes nécessite de développer de nouvelles stratégies de contrôle, en mettant l'accent sur le respect des limites établies dans la réglementation en vigueur et sur l'utilisation de la quantité strictement nécessaire de

produits chimiques pour obtenir l'effet recherché.

ALGORITHME DÉVELOPPÉ PAR KEMIRA OYJ

Le cas de figure spécifique à chaque station d'épuration nécessite de développer des algorithmes de contrôle basés sur l'accumulation de données expérimentales relatives au processus d'élimination du phosphore dans la station. L'intégration des lois de contrôle de type Si → Alors dans des algorithmes construits par logique floue est à la base de KemConnect P™, l'application développée par Kemira Oyj pour optimiser l'utilisation de coagulants dans le processus de précipitation chimique du phosphore.

Les plus grands potentiels d'économie de produits chimiques dans le processus s'observent dans la mise en œuvre de KemConnect P en boucle de contrôle fermée (schéma de type feedback) avec détermination du phosphore dans les rejets et dosage à la sortie du traitement biologique. Cependant, les caractéristiques de la station, sa configuration ainsi que la disponibilité et l'emplacement des analyseurs automatiques de phosphore peuvent nécessiter d'autres types de stratégies de contrôle pour lesquelles l'application est également conçue.

KemConnect P™ n'est pas uniquement un outil de contrôle local de l'élimination du phosphore par précipitation chimique puisqu'elle est complétée par une plateforme d'analyse des données opérationnelles extraites du processus lui-même. L'évaluation et l'incorporation de nouvelles expériences dans la

station permettent d'ajuster et de redéfinir les paramètres de contrôle ainsi que de pouvoir répondre à de nouvelles situations pour lesquelles un contrôle traditionnel serait en dérive.

ÉTUDE DE CAS

ANTÉCÉDENTS

Ce document présente la mise en œuvre de l'outil KemConnect P™ dans la station d'épuration des eaux usées urbaines de Vic située dans la Communauté Autonome de Catalogne avec une capacité de traitement nominale de 340 000 équivalents habitants (environ 25 000 m³/jour). Le schéma de traitement mis en œuvre à la station est détaillé dans le tableau 2.

Le contrôle de la précipitation chimique du phosphore, préalablement à la mise en œuvre de la solution KemConnect P™, est réalisé via un algorithme développé dans la station elle-même et prenant comme arguments d'entrée la valeur de la concentration en orthophosphate à la sortie de l'unité de décantation secondaire, ainsi que le débit d'eau traitée. Le système de contrôle établit 3 niveaux de dosage de chlorure ferrique (FeCl₃₋₂, FeCl₃₋₃ et FeCl₃₋₄) en fonction de la concentration en orthophosphate à la sortie (P₂, P₃ et P₄) et un schéma de dosage basé sur des cycles on/off d'intensité FeCl₃₋₁ et d'une certaine durée lorsque la concentration en orthophosphate dans les rejets est inférieure à la valeur de consigne (P₁) (figure 1). Aux valeurs de production d'orthophosphate supérieures au niveau défini comme P₄, la dose de chlorure ferrique n'augmente pas et reste à l'intensité de FeCl₃₋₄.

Tableau 2.- Schéma de traitement dans la station d'épuration.

Type de traitement	Oui / Non	Détails
Traitement primaire	Oui	Sans dosage de coagulant
Traitement secondaire	Oui	--
Élimination de N	Oui	Nitrification/Dénitrification
Élimination du P	Oui	Précipitation chimique (FeCl ₃)
Digestion anaérobie	Oui	--
Désinfection	Non	--

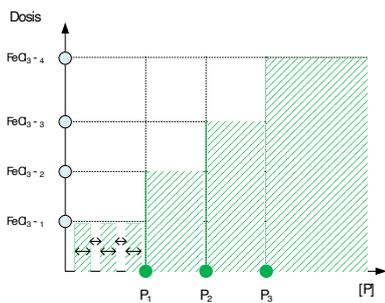


Figure 1.- Représentation schématique de la logique de contrôle développée à la station.

LOGIQUE DE CONTRÔLE PRÉCÉDENTE MISE EN ŒUVRE

Il existe un historique d'exploitation de la station qui comprend les valeurs moyennes mensuelles du débit d'eau traitée, la concentration de phosphore total (mg PO₄-P/l) dans l'influent, après décantation primaire et à la sortie, ainsi que la consommation de coagulant dans le processus de précipitation chimique. La figure 2 montre l'évolution de la concentration en phosphore aux points détaillés ci-dessus entre janvier 2019 et octobre 2022, lorsque la station régule le dosage de chlorure ferrique pour l'élimination du phosphore grâce à l'algorithme développé dans l'usine. La figure 3 montre l'évolution des valeurs mensuelles moyennes de consommation de chlorure ferrique au cours de la même période. Le tableau 3 présente le calcul des valeurs moyennes, des écarts-types et des valeurs maximales et minimales sur cette période pour la concentration de phosphore à la sortie et la consommation de chlorure ferrique. On observe que, pour la concentration en phosphore, certains épisodes conduisent à des valeurs

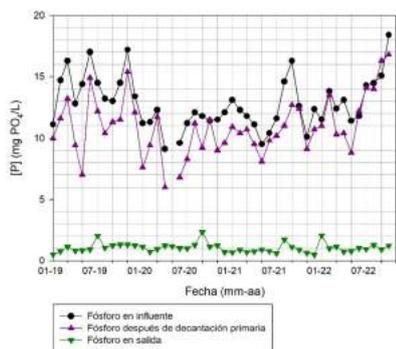


Figure 2.- Évolution des niveaux de phosphore dans la station (de janvier 2019 à octobre 2022).

moyennes mensuelles supérieures à 1 mg/l, atteignant des pics supérieurs à 2 mg PO₄/l. Cependant, lors de ces épisodes, le pourcentage d'élimination du phosphore continue d'être supérieur à 80 % par rapport à la valeur de l'influent établie par la directive 91/271/CEE (tableau 1).

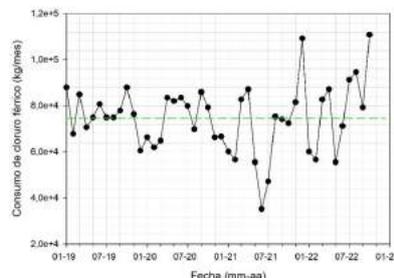


Figure 3.- Consommation mensuelle moyenne de chlorure ferrique à la station (de janvier 2019 à octobre 2022). La valeur moyenne de la consommation est représentée dans la ligne verte en pointillés.

MISE EN ŒUVRE DE KEMCONNECT P™

La mise en œuvre de KemConnect P™ pour contrôler le dosage de chlorure ferrique dans le processus de précipitation chimique débute en novembre 2022, prenant environ 20 jours pour configurer et ajuster les paramètres de l'algorithme en fonction de la dynamique du système. Les résultats obtenus entre novembre 2022 et mai 2023 sont présentés dans ce document.

La figure 4 montre les valeurs moyennes mensuelles de concentration en phosphore dans l'influent, après décantation primaire et à la sortie de la station. La figure 5 montre les valeurs de consommation mensuelle moyenne de chlorure ferrique à la station. Le tableau 4 présente le calcul des valeurs moyennes,

des écarts-types et des valeurs maximales et minimales sur cette période pour la concentration de phosphore à la sortie et la consommation de chlorure ferrique.

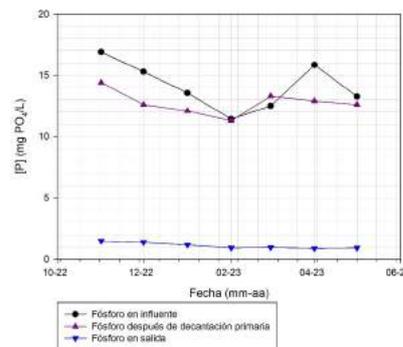


Figure 4.- Évolution des niveaux de phosphore dans la station (de novembre 2022 à mai 2023).

On peut observer que la valeur moyenne de la concentration en phosphore à la sortie au cours de la période est particulièrement influencée par les valeurs atteintes lors du démarrage du système et du réglage des paramètres de contrôle. Une fois l'ajustement effectué, les valeurs moyennes restent inférieures à 1 mg PO₄/l. La même chose se produit

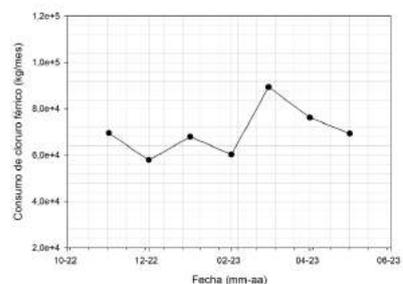


Figure 5.- Consommation mensuelle moyenne de chlorure ferrique à la station (de novembre 2022 à mai 2023).

Tableau 3.- Calcul des moyennes de concentration de phosphore dans la production et de consommation de chlorure ferrique. De janvier 2019 à octobre 2022.

Paramètre	[PT] à la sortie (mg PO ₄ /l)	Consommation de FeCl ₃ (kg/mois)
Valeur moyenne sur la période	1,06	74646
Écart-type	0,38	14515
Valeur maximale sur la période	2,35	110779
Valeur minimale sur la période	0,5	35136

avec la valeur maximale détectée sur cette période, laquelle est atteinte lors du démarrage du système.

La comparaison la plus intéressante, indiquant une utilisation plus efficace du chlorure ferrique dans le processus, est celle qui peut être établie entre le kg de chlorure ferrique utilisé et le kg de phosphore introduit dans la station. Une comparaison sur toute la période surveillée sans contrôle par KemConnect P™ (de janvier 2019 à octobre 2022) avec la période comprise entre novembre 2022 et mai 2023 indique que le processus de précipitation chimique du phosphore consomme 2,2% de chlorure ferrique en moins par kg de phosphore introduit (tableau 5) avec une économie globale de consommation de chlorure ferrique de 6%. De même, des valeurs moyennes mensuelles de concentration de phosphore à la sortie inférieures à 1 mg/l et une plage de fonctionnement plus étroite (min/max) sont obtenues, démontrant la stabilité de l'algorithme de contrôle.

Cependant, certains facteurs ont une influence très importante sur le calcul des valeurs moyennes à la station :

- Festivités
- Incidents à la station.
- Situations anormales; pandémie, avec des changements d'habitudes tant au niveau domestique qu'industriel, affectant le fonctionnement de la station.

Pour ces raisons, et principalement pour la dernière mentionnée, la comparaison la plus représentative se situe peut-être entre novembre 2022 et mai 2023 (avec contrôle via KemConnect P™) et la même période un an plus tôt (sans KemConnect) au cours de laquelle les restrictions de mobilité et l'activité industrielle ont présenté un plus grand degré de normalisation. En comparant les deux périodes (tableau 6), on observe des utilisations plus efficaces du chlorure ferrique dans le processus de précipitation chimique du phosphore (15%) et des économies globales de coagulant proches de 8% grâce à l'utilisation de KemConnect P.

CONCLUSIONS

- La mise en œuvre de KemConnect P dans le processus de précipitation chimique du phosphore a permis de fonctionner à des valeurs de phosphore à la sortie comprises dans les plages établies par la directive 91/271/CEE avec une consommation de chlorure ferrique inférieure à celle de la stratégie précédente de la station. De cette manière, on augmente l'efficacité dans l'utilisation des ressources, en l'occurrence le coagulant utilisé dans la station, en réduisant les coûts de traitement (kg de chlorure ferrique/kg de phosphore introduit).
- L'algorithme de contrôle utilisé dans l'unité KemConnect P™, en réduisant les temps de réponse aux perturbations du système, a permis de limiter la plage de concentration de phosphore à la sortie avec des valeurs maximales mesurées 37% inférieures à la stratégie précédente. Cela permet une plus grande stabilité dans le contrôle du processus et moins de fluctuations dans le dosage du chlorure ferrique.
- La surveillance, l'enregistrement et l'analyse des données de processus effectués via KemConnect P permettent de numériser le traitement par précipitation chimique du phosphore, augmentant ainsi sa visualisation pour une meilleure compréhension et une aide à la prise de décisions stratégiques.
- L'utilisation de coagulant dans la précipitation chimique du phosphore n'est pas un processus linéaire. Lorsque des valeurs de phosphore à la sortie inférieures à 0,5 mg PO₄/l sont requises, les rapports molaires Fe:P augmentent par rapport à ceux nécessaires lorsque l'élimination du phosphore requise est inférieure. Une bonne stratégie de contrôle est essentielle car la consommation de coagulants à des taux d'élimination élevés peut augmenter considérablement. La mise en œuvre de KemConnect P dans des scénarios plus restrictifs tels que ceux proposés par la proposition de modification de la directive actuelle sur le traitement des eaux urbaines résiduaires peut contribuer à une réduction des coûts de traitement chimique. ●

Tableau 4.- Calcul des moyennes de concentration de phosphore à la sortie et consommation de chlorure ferrique. De novembre 2022 à mai 2023.

Paramètre	[P _i] à la sortie (mg PO ₄ /l)	Consommation de FeCl ₃ (kg/mois)
Valeur moyenne sur la période	1,09	70064
Écart-type	0,25	10491
Valeur maximale sur la période	1,48	89366
Valeur minimale sur la période	0,87	57859

Tableau 5.- Calcul des indicateurs (I). Périodes comparatives de janvier 2019 à octobre 2022 / de novembre 2022 à mai 2023.

Paramètre	Valeur sans contrôle KemConnect	Valeur avec contrôle KemConnect	Différence (%)
kg de FeCl ₃ /kg de P introduit	9,2	9	2,2%
Consommation de FeCl ₃ (kg/mois)	74646	70064	6,1%

Tableau 6.- Calcul des indicateurs (II). Périodes comparatives de novembre 2021 à mai 2022 / de novembre 2022 à mai 2023.

Paramètre	Valeur sans contrôle KemConnect	Valeur avec contrôle KemConnect	Différence (%)
kg de FeCl ₃ /kg de P introduit	10,6	9	15,1%
Consommation de FeCl ₃ (kg/mois)	76082	70064	7,9%



Références bibliographiques

[1] SMITH, A., ET AL. (2016). Electric field effects on CO₂ dissociation kinetics: Mechanistic insights from theory and experiment. *Journal of Physical Chemistry C*, 120(41), 23475-23483.

1.- CARPENTER, S. R. ET AL. Biological control of eutrophication in lakes. *Environmental Science & Technology* 29, 784-786 (1995).

2.- DODDS, W. K. ET AL. Eutrophication of U.S. freshwaters: analysis of potential economic damages. *Environmental Science and Technology* 43, 12-19 (2009).

3.- SCHINDLER, D. W. Recent advances in the understanding and management of eutrophication. *Limnology and Oceanography* 51, 356-363 (2006).

4.- CONLEY, DANIEL J., ET AL. "Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus." *Science* 323.5917 (2009): 1014-1015.

5.- GRADY, L., DAIGGER, G.T., LIM, H.C. *Biological Wastewater Treatment* 2nd Edition. Marcel Dekker Inc. 1999.

6.- TCHOBANOGLIOUS, G., BURTON, F.L., STENSEL, H.D. *Wastewater Engineering; Treatment and Reuse* 4th Edition. Metcalf & Eddy, Inc. McGraw Hill (2004).

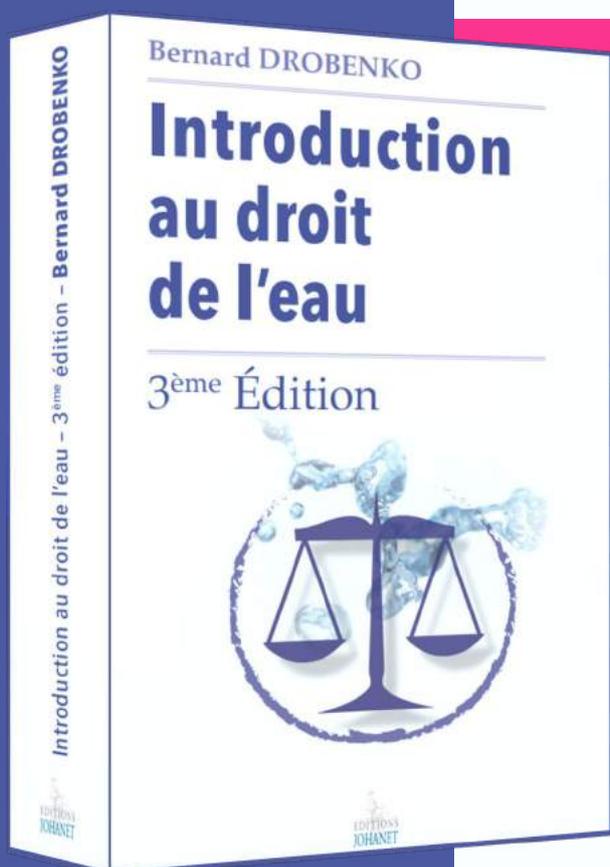
7.- HENZE, M., HARREMOES, P., JANSEN, J.L.C., ARVIN, E. *Wastewater Treatment; Biological and Chemical Processes*, 2nd Edition. Springer (1996).

8.- BRATBY, J. *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*, 2nd Edition. IWA Publishing (2006).

9.- SHEWA, W.A., DAGNEW, M. *Revisiting Chemically Enhanced Primary Treatment of Wastewater: A Review*. *Sustainability* 2020, 12, 5928.

10.- Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas.

11.- Proposal for a Directive Of The European Parliament And Of The Council Concerning Urban Wastewater Treatment (recast). European Commission. 2022/0345 (COD).



VIENT DE PARAÎTRE

INTRODUCTION AU DROIT DE L'EAU

3ème édition

Le droit de l'eau présente la caractéristique d'imprégner la plupart des domaines du droit. Intégré de manière substantielle au code de l'environnement, il est aussi développé par diverses législations sectorielles comme la santé, l'urbanisme, l'agriculture, la sécurité civile ou l'énergie. Ce droit intéresse tous les secteurs et les acteurs de la société.

Cet ouvrage synthétique permet à tous ceux qui sont concernés par les questions de l'eau, de disposer de l'essentiel du droit européen et français de l'eau, présenté dans son contexte international.

Par Bernard DROBENKO



editions-johanet.net