

La précipitation des phosphates comme troisième stade d'épuration des eaux résiduaires*

Par CARL JEGGE

Laboratoire de la Soudière Suisse, Zurzach AG

Summary

The increasing pollution of our lakes and streams gives cause for real apprehension. The modern water purification units work in two steps, using a mechanical and a biological process. The effect of purification, especially the elimination of nitrogen and phosphorus compounds, is inadequate.

Our lakes are especially threatened by overfertilizing. Measures which fight the resulting weed and algae growth are inadequate as a permanent solution. Only the drastic reduction of the amount of incoming fertilizers has a chance of success.

Because of the high costs, the removal of all fertilizers from polluted water is only possible in special instances. Another possibility to consider is the systematic elimination of particular fertilizer compounds.

The denitrifying of sewage water for example, is in principle possible and appears to be attainable in practice. The precipitation of phosphates however, is at this time the most promising measure. From a chemical standpoint and from price considerations ferric chloride and lime must be considered as the best possible precipitants. With lime the phosphate is precipitated as hydroxyapatite. When ferric chloride is applied, the phosphate is incorporated into the oxyhydrate precipitate. In practice, the elimination of phosphorus compounds can be achieved either by simultaneous precipitation (direct addition of the precipitating agent to the biological purification step) or by subsequent precipitation (separation in flocks in a separate third step).

Tables II and III show the presently available results and cost comparisons for different procedures and precipitants. A direct comparison is of course difficult, since each case of polluted water presents a special situation which must be carefully studied.

Ferric chloride is doubly interesting from the water protection standpoint, since an advantageous removal of corrosive waste liquids from galvanizing works can be simultaneously achieved.

Questions pertaining to the precipitation of phosphates have in no way been completely answered. Especially the elimination of the phosphate slurry and its behavior under reducing conditions needs further investigation.

The precipitation of phosphate as a third purification step is chemically sound, technically logical and economically justifiable.

Thus there is a good chance in the long run to improve the condition of our lakes and streams by systematic application of all available technical possibilities.

I. Introduction

A l'heure actuelle, nos ruisseaux, nos rivières et nos lacs présentent un aspect affligeant. Leur état se dété-

riore lentement, mais d'une manière apparemment irrésistible. Le plus beau lac suisse, le lac Léman, n'échappe malheureusement pas à la règle commune¹.

Les causes profondes de cette évolution sont multiples. L'augmentation de la population et de ses besoins en eau sont rapides, alors que l'espace vital demeure constant; l'industrie, importante consommatrice d'eau, marche à plein régime... Pour venir à bout de la demande croissante dans des proportions démesurées, l'homme met toujours plus à contribution les réserves d'eaux naturelles.

Les cours d'eau sont régularisés et retenus dans des bassins d'accumulation. Les barrages, qui empêchent leur écoulement naturel, diminuent ainsi fortement la capacité d'auto-épuration de nos fleuves et rivières. Avec les eaux usées, non épurées, des matières polluantes sont déversées directement dans les effluents.

Tous ces facteurs agissent dans le même sens et entraînent la détérioration progressive des eaux de surface et souterraines. L'opinion est unanime: la situation est grave, il convient d'y porter remède.

II. L'épuration des eaux usées en deux stades – possibilités et limites

Les stations d'épuration des eaux usées fonctionnent actuellement en deux stades:

a) *Premier stade: épuration physique.* L'épuration physique (ou mécanique) consiste en une prédécantation des matières sédimentables.

b) *Deuxième stade: épuration biologique.* L'épuration biologique est une imitation de la nature, c'est-à-dire de l'auto-épuration des cours d'eau. Dans des conditions aérobies (aération), il se produit un développement intense de la faune aquatique. Les matières organiques et fertilisantes des eaux usées sont «solidifiées» par «incarnation» dans des corps de bactéries qui sont séparés de la phase aqueuse. Suivant la technique appliquée, on parle du système des «boues activées» ou du système des «cultures sur support», le principe de base étant toutefois le même dans les deux cas.

* Exposé devant la Société chimique de Genève, 6 novembre 1964.

¹ E. NOVEL, *Gaz. Techn. Ind. Sci.* (Lausanne) du 15 octobre 1964.

c) *Possibilités et limites.* Une station moderne d'épuration en deux stades, non surchargée et travaillant bien, donne les rendements d'épuration suivants:

matières organiques C	~ 80%
composés N et P	~ 25 à 40%

Ce phénomène n'a rien d'étonnant et son explication est due à K. WUHRMANN². Dans les corps de bactéries, le rapport stœchiométrique C:N est $5 \div 8$, tandis que, dans le cas des eaux usées domestiques après épuration physique, le rapport C:N est ~ 2 . Il y a un trop grand déficit de C organique pour «incarner» les quantités des composés N à disposition. Quant aux fertilisants des types composés P et K, la situation est semblable.

Ce rendement d'épuration en deux stades est-il satisfaisant? Cela dépend de l'effluent. S'il s'agit d'un cours d'eau avec un débit et une auto-épuration suffisants, la réponse sera affirmative. En revanche, pour ce qui concerne les eaux stagnantes (lacs, eaux barrées, etc.), l'expérience montre que le degré d'épuration obtenu ne suffit pas à leur assainissement. Citons par exemple le cas du lac de Zürich: Grâce à un effort remarquable de la part des communes riveraines, les deux tiers des eaux usées sont actuellement évacuées après épuration en deux stades (1964). Cependant, une amélioration du lac n'a pas pu être constatée jusqu'à présent.

III. L'eutrophisation des lacs

Les matières fertilisantes favorisent le développement de la végétation aquatique (algues, etc.). La mort saisonnière de ces plantes provoque la libération de nouvelles quantités de fertilisants pour le printemps suivant. Ceci, ajouté à l'apport constant des eaux usées forme un cercle vicieux compliqué: «l'eutrophisation» qui se manifeste par la prolifération des plantes aquatiques.

Les dommages dus à l'eutrophisation des eaux stagnantes sont souvent beaucoup plus importants que les dommages causés par la pollution primaire. En Suisse, E. A. THOMAS a étudié les causes profondes et les effets de l'eutrophisation en se basant sur le cas du lac de Zürich³.

a) *Possibilités de lutte contre l'eutrophisation*

1. *Mesures primaires* (qui s'attaquent à la cause même de l'eutrophisation). Elles consistent en l'arrêt complet ou tout au moins en une réduction drastique de l'apport des matières fertilisantes.

L'assainissement du lac de Hallwil AG est en cours d'exécution: les eaux usées des communes riveraines seront dirigées par une canalisation circulaire vers la station d'épuration située à l'extrémité inférieure du lac⁴.

D'après le même principe, on essaie de sauver le Tegernsee en Bavière. Etant donné les frais élevés qu'entraîne une telle canalisation, cette solution n'est applicable qu'aux lacs de faible étendue. L'apport de fertilisants de l'arrière-pays demande un examen soigneux; en ce qui concerne le lac de Hallwil, H. AMBÜHL l'estime à environ la moitié de l'apport total⁵.

On pourrait aussi envisager de faire passer les eaux épurées dans des étangs ou des installations spéciales contenant des plantes aquatiques dont les besoins en fertilisants sont considérables. L'examen de cette idée («élimination par végétation artificielle») démontre que ce procédé n'est pas réalisable^{6,7}.

L'élimination sélective de certains types de fertilisants fera l'objet des chapitres IV et V.

2. *Mesures secondaires* (visant les effets de l'eutrophisation). On a déployé beaucoup d'imagination dans ce domaine. Diverses mesures ont été essayées: la destruction mécanique ou chimique des algues, l'aération des lacs en profondeur, la mise en marche d'une navette artificielle au sein des lacs et le soutirage des eaux profondes. Ces mesures, judicieuses dans certains cas particuliers, ne touchent cependant pas au cœur du problème.

b) *La nature chimique des matières fertilisantes*

1. *Les composés de l'azote.* Dans les eaux usées domestiques, on trouve une concentration totale de $20 \div 50$ mg N/L. La répartition des composés azotés est assez compliquée:

N organique (urée, amines, etc.)	env. un tiers
N nitrate + nitrite	env. un tiers
N ion ammonium	env. un tiers

Eu égard aux propriétés différentes de ces trois types de composés azotés, une élimination chimique ne peut pas être envisagée.

2. *Les composés du phosphore.* Les eaux usées domestiques ont une concentration totale de $1,5 \div 10$ mg P/L (ou exprimée en phosphate $5 \div 30$ mg PO_4/L). La répartition chimique est la suivante:

P sous forme d'ortho-phosphate PO_4^{3-}	env. la moitié
P sous forme de polyphosphates	} env. la moitié
P organique	

Du point de vue chimique, le cas des composés du phosphore est moins compliqué que celui des composés de l'azote. Le degré d'oxydation de tous les composés du phosphore est le même; les polyphosphates et le P organique donnent de l'ortho-phosphate PO_4^{3-} par hydrolyse.

⁵ H. AMBÜHL, *Schweiz. Z. Hydrol.* 22 (1960) 563.

⁶ W. J. OSWALD et coll., *Sewage Ind. Wastes* 25 (1953) 26.

⁷ K. WUHRMANN, *Exposé à l'occasion d'un cours de perfectionnement de l'Institut fédéral pour l'aménagement, l'épuration et la protection des eaux, Zürich, avril 1964*, p. 4.

² K. WUHRMANN, *Schweiz. Z. Hydrol.* 19 (1957) 412.

³ E. A. THOMAS, *M. bull. Schweiz. Ver. Gas- u. Wasserfachmännern* 1963, 138.

⁴ F. BALDINGER, *Schweiz. Z. Hydrol.* 19 (1957) 18.

3. *Les composés du potassium.* A cause des difficultés analytiques, la teneur en potassium des eaux usées domestiques est moins bien connue. L'ordre de grandeur est de 50 mg K/L.

IV. L'élimination sélective de groupes de fertilisants

a) L'idée du facteur minimum

Pour se développer, toutes les plantes doivent avoir en suffisance des fertilisants et des oligo-éléments. LIEBIG, déjà, a reconnu que la carence systématique d'un seul de ces composants empêche la croissance de la végétation, même si les autres éléments nutritifs sont apportés en abondance. Pour empêcher la prolifération de la végétation aquatique dans les eaux stagnantes (lacs, eaux barrées, etc.), il ne serait donc pas nécessaire d'éliminer tous les fertilisants; il suffirait de tenir systématiquement à l'écart l'un de ces éléments.

Comme l'élimination systématique du potassium est impossible à priori, nous nous attacherons à préciser les possibilités de la dénitrification et de la précipitation des phosphates.

b) La dénitrification

L'élimination sélective des composés N (dénitrification) est actuellement étudiée par K. WUHRMANN⁸ à Zürich et par G. BRINGMANN⁹ à Berlin. Le principe en est très simple. A la sortie de l'épuration biologique, les composés N se trouvent surtout sous forme de nitrite et de nitrate. La boue activée contient un grand nombre de bactéries potentiellement aérobies, ce qui signifie qu'elles sont capables de réduire NO_2^- et NO_3^- en N_2 et N_2O en l'absence de l'oxygène de l'air.

Dans une installation semi-industrielle à Tüffenwies (canton de Zürich), le procédé de la dénitrification suivant le schéma de la figure 1 a été étudié en 1962/1963 par K. WUHRMANN et ses collaborateurs. Dans de bonnes conditions (aération suffisante du deuxième stade, installation non surchargée), le rendement de l'élimination représente 85 ÷ 90% de la teneur en N total des eaux usées à la sortie de l'épuration physique.

c) La précipitation des phosphates

Il s'agit de la précipitation chimique de l'ortho-phosphate par des cations di- ou trivalents, capables de fournir des précipités suffisamment insolubles. En pratique, la chaux, ainsi que des sels de fer et d'aluminium sont utilisés comme «précipitants» (voir chapitre V).

Le rendement de la précipitation dans des stations d'épuration déjà en service, de même que dans une installation pilote, est de 75 ÷ 90% de la teneur en P total des eaux usées.

⁸ Voir réf. 7, p. 3-13.

⁹ G. BRINGMANN, *Gesundheits-Ing.* 82 (1961) 233.

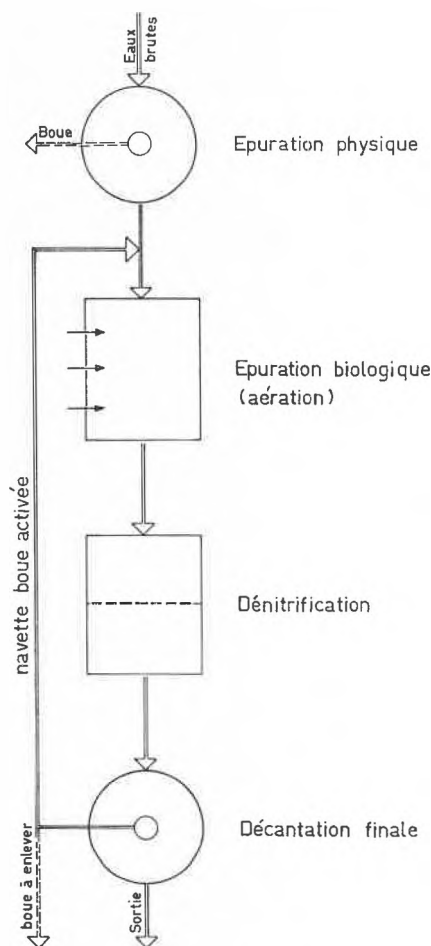


Fig. 1. Dénitrification, schéma

d) Discussion

Le problème de la compétition entre la précipitation des phosphates et la dénitrification n'est pas facile à trancher. Il convient d'abord, dans chaque cas, de déterminer quel est le facteur minimum au sens de LIEBIG. La figure 2 montre un exemple pratique d'une telle détermination, réalisée par E. A. THOMAS par le Laboratoire cantonal de Zürich en 1963.

Il s'agit d'eau du lac de Zürich, additionnée de nitrate et de phosphate. On constate que la végétation aquatique se développe surtout en présence de phosphate (avec ou sans nitrate). En l'absence de phosphate, même une forte dose de nitrate ne peut faire pousser les algues. Dans ce cas, le facteur minimum est le phosphate.

Quant aux lacs du Plateau suisse, il est maintenant admis que le facteur minimum «normal» est le phosphore, ce qui ne veut toutefois pas dire que l'élimination de N ne soit pas digne d'attention. Au contraire, pour obtenir un assainissement durable de nos lacs, la combinaison de la précipitation des phosphates et de la dénitrification – deux procédés qui se complètent – sera probablement nécessaire.

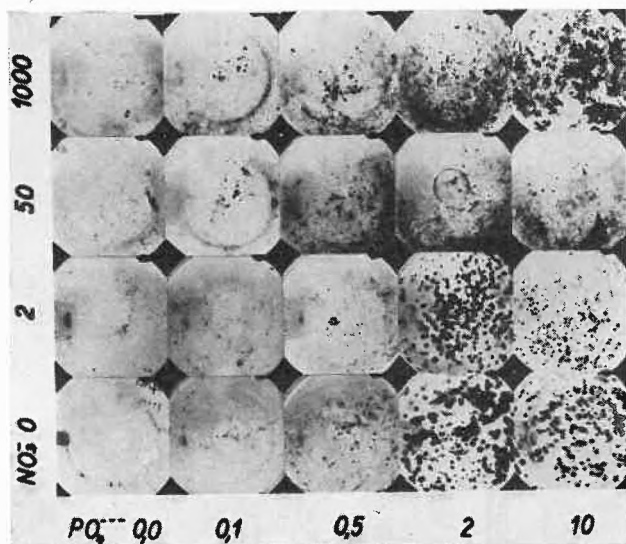


Fig. 2. Détermination du facteur minimum. Végétation aquatique en fonction de la teneur en nitrate (en ordonnée mg NO_3/L) et de la teneur en phosphate (en abscisse mg PO_4/L)

V. La précipitation des phosphates

a) Bases chimiques

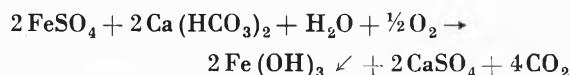
Un «précipitant» doit former des phosphates aussi peu solubles que possible. Le tableau 1 contient les produits de solubilité des cations les plus intéressants à cet égard.

La précipitation des phosphates sous forme d'apatite d'hydroxyle, de phosphate ferrique ou d'aluminium, assure leur élimination aussi quantitative que possible.

1. *La chaux.* Le phosphate de calcium $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, relativement soluble, est formé entre les pH 7 et 10. A partir du pH 10, c'est l'apatite d'hydroxyle $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}]$, beaucoup moins soluble, qui précipite. On opère en pratique avec des doses de $100 \div 300$ mg $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{L}$, de sorte que, la valeur du pH étant supérieure à 10, il y a précipitation d'apatite d'hydroxyle. La décantation du précipité et sa teneur en eau de $85 \div 90\%$ sont relativement favorables. Toutefois, l'adjonction de chaux [sous forme solide à env. 90% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou sous forme de lait de chaux] n'est pas aisée et nécessite un entretien

non négligeable. Le pH élevé (11) de l'eau après épuration peut devenir critique (précipitations ultérieures dans l'effluent).

2. *Les sels de fer.* Les sels ferreux ne sont guère utilisables pour la précipitation des phosphates. En milieu neutre ou alcalin, le Fe^{+2} est un réducteur avec une «demande d'oxygène» considérable:



De plus, le produit de solubilité du $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$ n'est pas connu.

Les sels ferriques, et spécialement le chlorure ferrique FeCl_3 sont des précipitants de choix. La zone favorable de pH s'étend de 6,5 à 9; la dose du précipitant, $10 \div 30$ mg Fe^{+3}/L , est faible et le FePO_4 formé est très peu soluble. En outre, la présence de fer (III) serait plutôt propice aux réactions biologiques. L'adjonction de FeCl_3 ne pose ainsi pas de problèmes techniques.

3. *Les sels d'aluminium.* Le sulfate d'aluminium, en tant que précipitant des phosphates, est voisin des sels de fer (III): la zone de précipitation se situe également entre les pH 6,5 et 9, et la dose d'adjonction est stœchiométriquement comparable.

Il est intéressant de noter que, en milieu très dilué, les précipités stœchiométriques FePO_4 ou AlPO_4 ne se forment pas. Les rapports

$$\frac{\text{m Mol } [\text{PO}_4^{-3}]}{\text{m Mol } [\text{Fe}^{+3}]} \quad \text{et} \quad \frac{\text{m Mol } [\text{PO}_4^{-3}]}{\text{m Mol } [\text{Al}^{+3}]}$$

dans les précipités devraient être 1 et correspondre aux formules FePO_4 et AlPO_4 . Mais on constate dans les précipités à partir des eaux très riches en phosphates que $[\text{PO}_4^{-3}] > [\text{Fe}^{+3}]$: le précipité FePO_4 adsorbe des ions PO_4^{-3} . Il existe un «point stœchiométrique» (~ 120 mg $\text{PO}_4^{-3}/\text{L}$) et pour les concentrations usuelles en PO_4^{-3} des eaux résiduaires ($5 \div 30$ mg $\text{PO}_4^{-3}/\text{L}$), on remarque dans les précipités que $[\text{PO}_4^{-3}] < [\text{Fe}^{+3}]$: cela signifie que le phosphate est incorporé dans des précipités du type de l'hydroxyde de fer. Pour le fer (III) et l'aluminium comme précipitants, le rapport stœchiométrique (voir figures 3 et 4) est le suivant:

Tableau 1. La solubilité de différents phosphates

Phosphate de	Formule chimique	Produit de solubilité	Solubilité calculée en mg PO_4/L
Calcium	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	10^{-25} ¹⁰	0,8
Apatite d'hydroxyle	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$	10^{-58} ¹¹	$1 \cdot 10^{-5}$ *
de fer (II)	$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$	inconnu	—
de fer (III)	FePO_4	10^{-23} ¹²	$3 \cdot 10^{-7}$
d'aluminium	AlPO_4	$6 \cdot 10^{-19}$ ¹⁰	$7 \cdot 10^{-5}$
de zinc	$\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$	$\sim 10^{-32}$ ¹⁰	0,3

* Calculé pour pH = 11 [excès de $\text{Ca}(\text{OH})_2$]

¹⁰ F.G. ZHAROVSKIY, *Trudy Komissii Anal. Khim. Akad. Nauk URSS* 3 (1951) 101, *Chem. Abstr.* 47 (1953) 2574.

¹¹ G. CHARLOT, *L'analyse qualitative*, Paris 1953, p. 210.

¹² H. GALAL et coll., *J. Inorg. Nuclear Chem.* 25 (1963) 567.

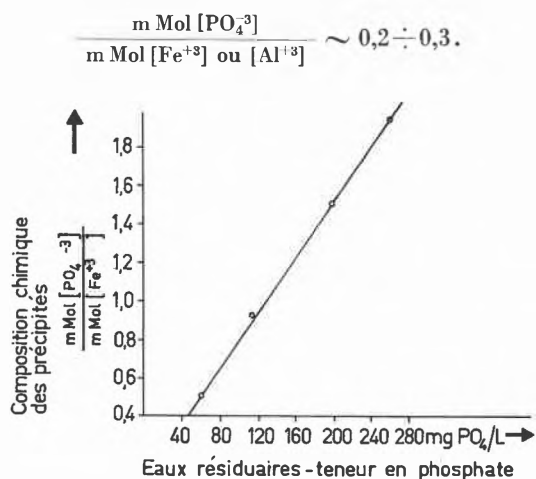


Fig. 3. Composition stœchiométrique de précipités ferriques, calculée d'après les essais de WUHRMANN¹³

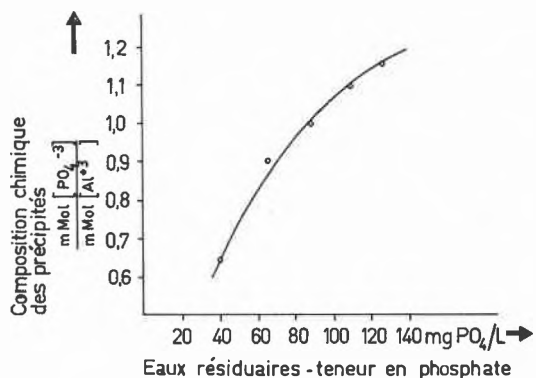


Fig. 4. Composition stœchiométrique de précipités d'aluminium, calculée d'après les essais de LEA¹⁴

b) Essais et résultats

En pratique, deux modes opératoires sont utilisés: l'addition directe de chlorure ferrique aux bassins de l'épuration biologique («précipitation simultanée») et la précipitation dans un troisième stade séparé, après épuration biologique («postprécipitation»).

1. *La précipitation simultanée* (schéma, voir figure 5). Ce procédé a été mis au point par E. A. THOMAS dès 1959 à la station d'épuration d'Uster (canton de Zürich). Des essais de durée plus ou moins longue ont été effectués à Pfäffikon, Männedorf, Stäfa, Küsnacht ZH et Kemptthal, ainsi qu'à l'installation expérimentale de l'Institut fédéral pour l'aménagement, l'épuration et la protection des eaux à Tüffenwies.

Le phosphate est «coprecipité» avec les boues activées; de ce fait, le choix du précipitant est limité au chlorure ferrique. Le prix du sulfate d'aluminium est prohibitif et la chaux (pH élevé) ne peut pas être envisagée. Les doses appliquées sont de 10 à 30 mg Fe^{+3}/L .

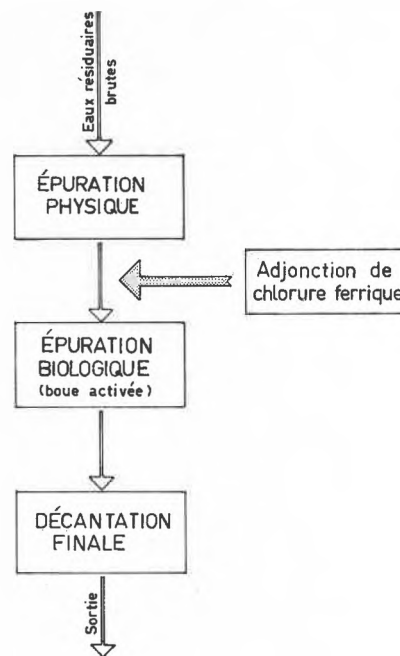


Fig. 5. Schéma de la précipitation simultanée

2. *La postprécipitation* (schéma, voir figure 6). Il s'agit d'un troisième stade séparé, monté après la décantation du stade biologique. L'addition du précipitant, la floculation et la décantation ont lieu dans le même bassin, judicieusement construit. En Suisse, ce procédé a été l'objet d'une étude approfondie de la part de l'Institut fédéral pour l'aménagement, l'épuration et la protection des eaux, à Zürich, dans sa station expérimentale de Tüffenwies⁷. La chaux ou le chlorure ferrique (ou des sels ferriques en général) peuvent servir de précipitants.

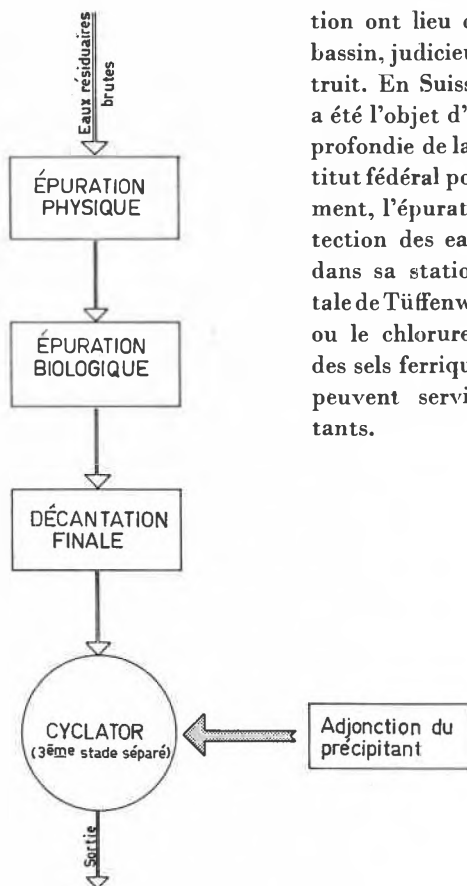


Fig. 6. Schéma de la postprécipitation

¹³ K. WUHRMANN, réf. 2, p. 419.

¹⁴ W. LEA et coll., *Sewage Ind. Wastes* 26 (1954) 261.

Tableau 2. Précipitation des phosphates. Résultats

No	Dose du précipitant	Eaux résiduaires brutes		Eaux résiduaires épurées		Remarques
		P total	<i>ortho</i> -phosphate	P total	<i>ortho</i> -phosphate	
	g/m ³	mg PO ₄ /L	mg PO ₄ /L	mg PO ₄ /L	mg PO ₄ /L	
1	5 ÷ 15 Fe ⁺³	5 ÷ 30	3 ÷ 15	0,5 ÷ 1,5	0,1 ÷ 1,0	Précipitation simultanée Uster 1959/63 E. A. THOMAS
2	$\left\{ \begin{array}{l} 250 \text{ Ca(OH)}_2 \\ 2 \text{ Fe}^{+3} \end{array} \right\}$	15 ÷ 23	4 ÷ 6	0,9 ÷ 1,7	0,2 ÷ 0,7	Postprécipitation Tüffenwies 1962/63
3	20 Fe ⁺³	10 ÷ 13	5 ÷ 6	0,4 ÷ 2,3	0,1 ÷ 0,4	Installation pilote K. WÜHRMANN

3. Résultats obtenus

Eu égard aux variations de la concentration initiale en *ortho*-phosphate et en P total, il est difficile d'exprimer le rendement en %; on peut estimer à 75 ÷ 90% l'élimination de P total par précipitation.

La comparaison des deux modes opératoires demande quelques réserves. Le temps de floculation des essais effectués à Tüffenwies étant fort limité, on doit s'attendre à ce que les résultats de la postprécipitation soient encore meilleurs dans une station à dimension normale.

c) Coût de la précipitation des phosphates

1. *Immobilisations.* Dans le cas de la précipitation simultanée, le montant des immobilisations indispensables est faible par rapport au coût total d'une station d'épuration en deux stades. Des réservoirs pour le précipitant ainsi qu'une installation de dosage sont seuls nécessaires. Le tout s'élève à environ 50 000 francs pour une station traitant 10 000 m³ d'eaux usées par jour.

La postprécipitation nécessite une installation séparée (troisième stade), dont le coût se monte à 10 ÷ 15% des frais de la station d'épuration en deux stades.

2. Frais d'exploitation

Tableau 3. Précipitation des phosphates. Frais d'exploitation

	Précipitation simultanée	Postprécipitation	
	10 g Fe ⁺³ /m ³	250 g Ca(OH) ₂ /m ³ 2 g Fe ⁺³ /m ³	20 g F ⁺³ /m ³
Centimes par m ³ d'eaux usées	1,2	3,2	2,4
Francs par habitant et par an (400 L d'eaux usées par habitant et par jour)	1,75	4,65	3,50

VI. Discussion

a) Le chlorure ferrique comme précipitant

L'acide chlorhydrique technique concentré est utilisé en quantités importantes pour le décapage des métaux ferreux surtout dans les zingueries.

Chimiquement, les bains de décapage usés sont une solution concentrée de FeCl₂ contenant encore de l'acide chlorhydrique libre, et leur évacuation représente un problème de première importance. Jusqu'à présent, par milliers de tonnes, ils ont été simplement déversés dans les cours d'eau ou se sont infiltrés dans le sol en menaçant les eaux souterraines.

Pour la fabrication du chlorure ferrique comme précipitant, nous reprenons de nos clients ces solutions de décapage qui, après épuration et ajustage de leur titre, nous servent de matières premières. Nous effectuons ensuite leur chloration avec du chlore résiduaire. Il en résulte une solution aqueuse à ~ 30% FeCl₃. Ce procédé très simple¹⁵ a fait tomber le prix du précipitant et, par la même occasion, a permis de résoudre simultanément deux problèmes d'eaux résiduaires: l'évacuation des solutions de décapage par leur revalorisation chimique et l'obtention d'un précipitant des phosphates, à bon marché et en quantité suffisante.

b) Divers problèmes posés par la précipitation des phosphates

La précipitation des phosphates fonctionne bien depuis des années et a été vérifiée dans différentes stations d'épuration des eaux. Toutefois, certains problèmes, d'importance plutôt secondaire, ne sont pas encore résolus.

1. *L'élimination des boues.* En ce qui concerne la *postprécipitation*, en plus des boues activées du deuxième stade d'épuration, il y a formation de boues phosphatées. Dans une installation traitant 3000 m³ d'eaux résiduaires par jour, la précipitation à la chaux produit environ 10 m³ de boues de chaux par jour, d'une teneur en eau de 85 ÷ 90%¹⁶. La quantité de boues formée par la précipitation au chlorure ferrique est difficile à estimer d'avance. Les propriétés de ces boues sont vraisemblablement moins favorables que celles des boues de chaux (décantation, teneur en eau 90 ÷ 95%)¹⁶. Cependant, la dose de FeCl₃ à ajouter est beaucoup plus faible que la dose de chaux

¹⁵ La Soudière Suisse, demande de brevet 14954/62 du 18 décembre 1962.

¹⁶ H. SONTHEIMER et B. HANISCH, *Contributions aux discussions du cours de perfectionnement de l'Institut fédéral pour l'aménagement, l'épuration et la protection des eaux*, avril 1964.

nécessaire, ce qui compense les désavantages du procédé au FeCl_3 .

Quant à la *précipitation simultanée*, aucune question particulière ne se pose au sujet des boues. Le phosphate ferrique insoluble est incorporé aux boues activées, ce qui ne soulève pas de difficulté, ni n'entraîne un accroissement du volume des boues dans une installation normalement chargée. Dans le cas de boues activées «maigres», une addition de fer ne peut exercer qu'un effet favorable, comme nous l'ont montré nos essais effectués à Kempthal. La décanation finale est améliorée, ainsi que l'aspect des eaux épurées dont la teneur normale en fer ne dépasse pas 1 mg Fe/L.

2. *Problèmes de la précipitation simultanée*. Une objection a été exprimée¹⁷, qui touche le principe même de la précipitation simultanée et qui mérite ainsi d'être examinée de plus près. Lors du traitement anaérobie des boues excédentaires à enlever, des conditions réductrices règnent dans la fosse de putréfaction. Le phosphate ferrique insoluble FePO_4 y est-il réduit en phosphate ferreux $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$ qui passerait en grande partie en solution et qui serait ainsi ramené dans le bassin de prédécantation par l'eau putride? Nous nous efforcerons d'éclaircir cette question, mais nous sommes déjà convaincus qu'il n'est guère possible que d'importantes quantités de phosphate soient entraînées en navette, eu égard à la faible proportion de l'eau putride par rapport à l'eau brute.

VII. Perspectives d'avenir

La pollution croissante de nos lacs est un problème si complexe que personne n'est aujourd'hui capable d'indiquer des mesures qui *garantissent* à coup sûr un assainissement. Ce n'est que le succès qui compte, et il n'y a

pas d'exemple qu'un lac fortement eutrophique ait pu être définitivement guéri à l'aide de n'importe quelle méthode ou idée.

La prétention de résoudre le problème par l'introduction générale d'un troisième stade d'épuration des eaux d'égout serait trop optimiste. On peut se le demander: pourquoi s'attaquer aux composés de phosphore, étant donné leur utilisation croissante dans les poudres à laver et en agriculture comme engrais?

L'aggravation de l'état de nos eaux, apparemment irrésistible et irréversible, comporte une certaine ressemblance avec le cancer. Le médecin dispose, pour chaque cas particulier, de divers moyens plus ou moins efficaces de lutte contre la maladie: interventions chirurgicales, irradiations, administration de médicaments, etc., qui peuvent être combinés l'un avec l'autre. Mais la cause profonde de la maladie n'est pas encore connue et des recettes générales de prévention et de guérison n'existent pas encore. Ne serait-il toutefois pas illogique et dangereux à la fois de ne rien entreprendre et d'attendre simplement que quelque chose de définitif soit découvert plus tard?

L'élimination des phosphates sous forme de précipitation simultanée ou de postprécipitation est chimiquement facilement applicable, immédiatement prête à être mise en œuvre, techniquement étudiée à fond et financièrement supportable. Outre l'effet principal, c'est-à-dire l'élimination des phosphates, il convient aussi de mentionner les effets secondaires qui ne sont pas négligeables: adsorption de matières organiques, élimination de matières colorantes, radioactives, de détergents, etc., ainsi qu'une amélioration considérable de l'aspect optique des eaux résiduaires épurées. Même si les conditions de minimum au sens de LIEBIG ne seront pas réalisées, la croissance de la végétation aquatique sera certainement enrayée. Comme moyen de lutte contre l'eutrophisation de nos lacs, il n'existe actuellement pas d'alternative valable.

¹⁷ K. WUHRMANN, réf. 2, p. 24.