

tions de phosphore initiales (de 5 à 70 mg/L). Ainsi, pour un rapport molaire donné, plus les eaux usées sont concentrées en phosphore, meilleur est le rendement de déphosphatation.

Les données de l'enquête Cemagref font apparaître d'excellents résultats pour les stations d'épuration recevant majoritairement des eaux domestiques. À partir de 18 valeurs, la concentration moyenne du rejet en phosphore total est de 1,3 mg P_{total}/l correspondant à un rendement moyen de déphosphatation physico-chimique de 89 %.

LA (SUR)PRODUCTION DE BOUES

QUANTITÉ DE PRÉCIPITÉ MÉTALLIQUE FORMÉ

La production de boues supplémentaires induite par l'injection d'ions métalliques dépend du type et de la quantité du réactif injecté (tableau 3 et tableau 4).

➤ Pour la précipitation des ions phosphates, l'élimination d'un gramme de phosphore conduit à :

- 3,94 grammes de précipité de phosphates d'aluminium (AlPO₄) ;
- ou bien à 4,87 grammes du précipité de phosphates de fer (FePO₄).

➤ Les ions métalliques non précipités avec les phosphates précipitent alors avec les ions hydroxydes (OH⁻) :

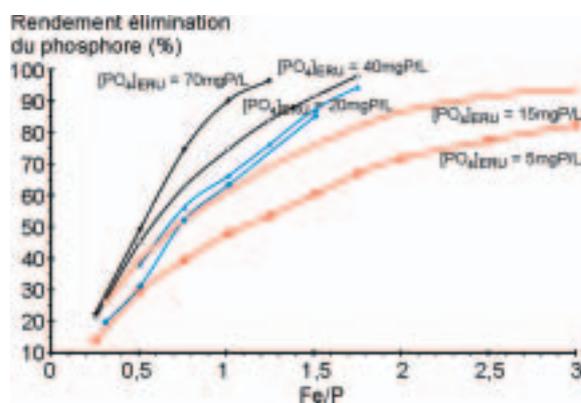


Figure 6 – Évolution du rendement d'élimination du phosphore en fonction du rapport molaire (d'après Wexler, 1997).

- un gramme de fer présent dans l'eau produit $107/56 = 1,9$ g de Fe(OH)₃ ;
- un gramme d'aluminium produit $78/27 = 2,89$ g de Al(OH)₃.

MÉTHODE DE CALCUL DE LA SURPRODUCTION DE BOUES

L'estimation correcte de la surproduction de boues n'est pas immédiate. Elle a été réalisée à partir des données annuelles obtenues lors de l'enquête nationale effectuée par le Cemagref.

➤ Nous avons, dans un premier temps, opté pour un calcul de la surproduction de boues physico-chimiques par différence entre la quantité totale de boues extraites (résultat enquête) et la quantité estimée produite par dégradation biologique du carbone (Duchène, 1999). Cette méthode n'a pas abouti car les valeurs obtenues étaient comprises entre des valeurs négatives et de fortes valeurs positives certainement en raison des difficultés à obtenir des données fiables de la production de boues totale des installations.

➤ Dans un second temps, nous avons approché la production de boues physico-chimiques due à la déphosphatation en calculant les quantités de précipités métalliques formés :

- la masse de précipité de phosphates a été déterminée à partir de la masse de phosphore éliminée (calculée avec les concentrations en entrée et sortie d'installations) de laquelle a été retirée la part de phosphore disparue par assimilation (1 % de la DBO₅ éliminée) ;
- la quantité de métal qui a participé à la formation d'hydroxyde de métal a été déduite par différence entre la masse de réactif de déphosphatation introduite annuellement et celle utilisée pour la précipitation du phosphore.

Là encore, la production supplémentaire de boues physico-chimiques a été comparée avec la production estimée de boues générée par la dégradation du carbone (Duchène, 1999). Cette deuxième approche met en œuvre des données plus facilement accessibles.

QUANTITÉ DE BOUES PHYSICO-CHIMIQUES PRODUITES

Parmi les valeurs obtenues à partir de bilans annuels, seules 12 ont été retenues. Elles correspondent aux installations pour lesquelles le surdosage de réactif n'était pas trop important (rapport molaire Fe/P à précipiter < 2,5). La surproduction moyenne induite de boues physico-chimiques est de l'ordre de 20 % dans le cas d'une déphosphatation physico-chimique. Les valeurs obtenues avec les réactifs d'aluminium sont un peu plus faibles qu'avec les réactifs à base de fer en raison d'un poids molaire plus faible.

DIMENSIONNEMENT ET MISE EN ŒUVRE : CAS DE LA PRÉCIPITATION SIMULTANÉE

Selon le lieu où s'effectue l'ajout du réactif, on qualifie de :

- pré-précipitation ou précipitation primaire, lorsque l'injection est effectuée dans le décanteur primaire ;
- précipitation simultanée, pour un ajout dans le bassin d'anaérobie ou d'aération ;
- post-précipitation ou précipitation tertiaire en traitement tertiaire.

Le traitement physico-chimique du phosphore le plus couramment mis en œuvre est la précipitation simultanée schématisée dans la figure 7 (les deux autres filières le sont dans l'annexe II) où l'injection à lieu dans le bassin d'anaérobie, d'anoxie ou dans le bassin d'aération. Son dimensionnement et sa mise en œuvre sont développés dans les paragraphes suivants.

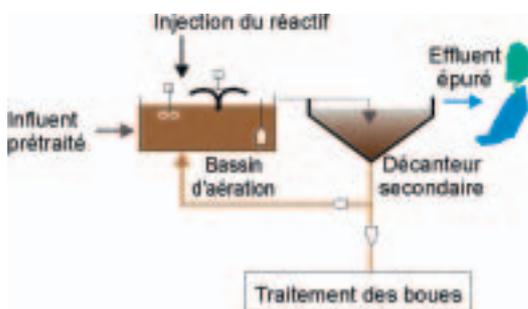


Figure 7 – La précipitation simultanée.

PRATIQUE DE DIMENSIONNEMENT DES FILIÈRES EAU ET BOUES

Bassin d'aération

Le dimensionnement du volume du bassin d'aération se base classiquement sur la valeur nominale de la charge massique à ne pas dépasser (*i.e.* $0,10 \text{ kg DBO}_5 \cdot (\text{kg MVS} \cdot \text{j})^{-1}$), ainsi que sur les valeurs prévues en conditions de fonctionnement de la concentration en boues et du taux de matières volatiles en suspension (FNDAE n° 25, 2002).

Pour une station sans déphosphatation physico-chimique, les matières volatiles en suspension représentent de l'ordre de 70 % des matières en suspension. Pour une station avec traitement physico-chimique du phosphore, le taux de MVS est de l'ordre de 60 % (valeur obtenue à partir de 11 STEP déphosphatantes par voie physico-chimique) en raison des précipités de phosphore et d'hydroxyde métalliques formés. Pour compenser les plus faibles taux de matières volatiles il est possible :

- d'augmenter le volume du bassin d'aération de 15 % environ, ce qui constitue une sécurité par rapport à la décantation ;
- de fonctionner à un taux de matières en suspension d'environ 15 % supérieur, d'autant que la décantabilité des boues est améliorée lors des ajouts de réactifs de précipitation.

Filière de traitement des boues

La déphosphatation physico-chimique n'impose pas un système de traitement des boues spécifique contrairement au traitement du phosphore par voie biologique. Pour le dimensionnement de la filière, il est néanmoins nécessaire de prévoir que la quantité de boues à extraire est environ 20 % supérieure à la quantité qu'il est nécessaire d'extraire sans déphosphatation (*cf.* page 26).

La quantité de matières sèches générées par les sels métalliques dans les boues est fonction de la nature et de la quantité de réactif utilisé (tableau 3 et tableau 4). Leur valeur fertilisante n'est pas foncièrement différente des boues obtenues sans précipitation physico-chimique.

Le phosphore qu'elles contiennent peut être utilisé par les cultures (Étude inter-agences 1992 : hors série « *Étude de la valeur phosphatée des boues urbaines biologiques issues de stations d'épuration équipées d'un traitement de déphosphatation des eaux usées* »).

MISE EN ŒUVRE DES RÉACTIFS POUR L'EXPLOITATION

Précautions d'emploi des réactifs

L'action des réactifs de précipitation physico-chimique du phosphore ne doit pas s'effectuer au détriment des autres traitements : les précautions d'emploi suivantes sont à prendre vis-à-vis de la coloration et du pH.

Coloration

Les réactifs à base de fer ont l'inconvénient d'être plus corrosifs que ceux à base d'aluminium et de colorer l'effluent. Ainsi, dans le cas d'une désinfection tertiaire par ultra-violet (UV), l'utilisation de réactifs à base de fer est à proscrire car la coloration de l'effluent réduit l'efficacité du traitement UV.

pH

L'utilisation de réactifs à base de fer pour précipiter les phosphates entraîne la formation d'acide chlorhydrique ou sulfurique (cf. page 21). La production d'une telle acidité dans un système dont la réserve alcalimétrique est insuffisante peut provoquer une forte diminution du pH défavorable à la nitrification dès lors que le pH est inférieur à 6,0.

L'impact sur le pH des réactifs à base d'aluminium dépend du type de coagulant. Le sulfate d'aluminium diminue le pH, l'aluminate de sodium l'augmente (cf. page 22). Les polychlorures d'aluminium, selon leur formule, acidifient ou non la boue mais en moindre proportion que les réactifs à base de fer.

Dispositif de stockage et d'injection

Le traitement du phosphore par voie physico-chimique nécessite un système d'injection particulier et un système de stockage des réactifs. Leur dimensionnement s'appuie directement sur la quantité de réactif à ajouter.

Dispositif de stockage

Les réactifs de précipitation du phosphore sont très corrosifs. La cuve de stockage sur site doit donc être constituée d'un matériau résistant (polyester renforcé de fibre de verre ou bien métal caoutchouté), et les précautions d'emploi précisées sur la fiche de sécurité fournie par le distributeur doivent être respectées.

La cuve de stockage est généralement dimensionnée de manière à contenir la quantité de réactif nécessaire à une durée d'environ six mois de fonctionnement. Toutefois, le volume des camions de transport est également un facteur déterminant du rythme des remplissages de la cuve de stockage.

Dispositif d'injection

Le réactif de précipitation est introduit par des pompes doseuses doublées disposant d'une plage de réglage très large. Ce type d'équipement ne pose pas de problèmes particuliers si les propriétés corrosives des réactifs ont été prises en compte dans la nature des canalisations et des pompes installées. L'injection de réactif est d'autant plus efficace que la zone où a lieu le mélange est agitée (cf. photo 2). C'est généralement dans le bassin d'aération qu'elle est réalisée.

Dans le cas d'un réseau unitaire, un asservissement direct au débit est recommandé avec une limitation de la dose injectée par temps de pluie.



Photo 2 – STEP de Châteauroux (36) : chenal d'aération (A. Héduit, oct. 2002).

Quantité de réactifs à injecter

Mode de calcul

La quantité de réactif est déterminée par la quantité de phosphore à précipiter et s'écrit :

$$P_{\text{à précipiter}} = P_{\text{entrée_soluble}} - P_{\text{assimilé}} - P_{\text{sortie_soluble}}$$

Les variables sont obtenues comme indiqué ci-dessous.

- Le phosphore entrant soluble ($P_{\text{entrée_soluble}}$) représente la part de phosphore précipitable par les réactifs. Elle est comprise entre 60 et 85 % du phosphore total entrant (cf. page 24). On peut prendre comme point de départ la valeur de 85 % puis diminuer la quantité de réactif ajoutée.
- Le phosphore assimilé par la biomasse épuratrice pour ces besoins métaboliques ($P_{\text{assimilé}}$) est de l'ordre de 1 % de la DBO_5 éliminée. Il constitue un rendement de l'ordre de 20 à 30 %.
- Le phosphore soluble perdu par l'eau de sortie ($P_{\text{sortie_soluble}}$) peut être choisi entre 0,3 et 0,5 mgP/l permettant en première approche de respecter la valeur de 1 mg P_{total} /l toléré au rejet (0,5 mgP/l sortant sous forme particulaire).

La masse journalière de réactif à injecter est obtenue en fixant un rapport stœchiométrique $Fe/P_{\text{à précipiter}}$ ou $Al/P_{\text{à précipiter}}$. Sachant qu'il est nécessaire de prendre en compte la consommation de réactif par la précipitation des ions hydroxydes (réactions parasites page 21 et page 23) et que le rendement d'élimination est fonction de la concentration initiale en phosphore à éliminer, on pourra choisir, en première approche, un rapport molaire stœchiométrique $Fe/P_{\text{à précipiter}}$ ou $Al/P_{\text{à précipiter}}$ de 1,5. Cette valeur implique le choix d'un rapport massique stœchiométrique $Fe/P_{\text{à précipiter}}$ de 2,7 ou $Al/P_{\text{à précipiter}}$ de 1,3 (cf. tableau 3 et tableau 4)

Le volume journalier de solution de réactif à injecter est obtenu à partir du rapport massique Fe/P ou Al/P de la solution (ou teneur en poids en Fe ou Al) et de sa densité.

Valeurs pratiquées en fonction du réactif utilisé

La précipitation d'un gramme de phosphore avec le fer et l'aluminium nécessite 1,81 g de fer contre 0,87 g d'aluminium pour un rapport molaire Fe/P et Al/P de 1.

⇒ L'élimination d'une quantité donnée de phosphore nécessite (à rapport molaire égal) des quantités d'aluminium environ deux fois inférieures aux masses de fer nécessaires.

Les réactifs commerciaux ont généralement un pourcentage massique de fer plus important que le pourcentage massique d'aluminium. Prenant un pourcentage de 13 % pour le fer et de 5 ou 7 % pour l'aluminium (cf. tableau 3 et tableau 4), un simple calcul montre que l'élimination d'une tonne de phosphore nécessite 14 tonnes de réactif à base de fer à 13 %, 17 tonnes de réactif à base d'aluminium à 5 %, 12 tonnes de réactif à base d'aluminium à 7 %.

⇒ En dépit d'un rapport massique favorable à l'aluminium, la précipitation d'une quantité donnée de phosphore ne nécessite pas systématiquement des quantités de réactif commercial plus faibles qu'en utilisant un réactif à base de fer.

Ajustement du dosage de réactif

Les résultats de l'enquête Cemagref mettent en évidence un surdosage fréquent des réactifs de déphosphatation pour les stations d'épuration au rendement de déphosphatation compris entre 84 et 96 % : le rapport molaire $Fe/P_{\text{à précipiter}}$ est en moyenne de 2,5, contre une valeur de 1,5 recommandée en première approche (cf. ci-dessus). Ajuster au mieux la dose de réactif engendre assurément une économie directe sur l'achat des réactifs et indirecte sur le coût du traitement des boues. Le choix du dosage optimal doit être effectué en lien avec le rendement d'élimination du phosphore et par palier d'au moins quinze jours en raison du temps de séjour des boues dans l'installation.

Le traitement par voie combinée du phosphore

Le présent chapitre compare les deux filières de traitement du phosphore par voies biologique et physico-chimique. Il présente ensuite la voie combinée, filière exploitant simultanément les deux techniques.

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES TRAITEMENTS BIOLOGIQUE ET PHYSICO-CHIMIQUE

Le tableau 8 résume les principales caractéristiques du traitement biologique et physico-chimique du phosphore.

Les principaux avantages de la déphosphatation biologique sont une demande nulle en réactif, une production de boues proche de celle d'un traitement conventionnel et un coût de fonctionnement faible. En revanche, elle exige un bassin d'anaérobiose, une gestion rigoureuse des boues afin d'éviter tout relargage intempestif de phosphore et ne permet pas une élimination poussée du phosphore. Le rendement d'élimination du phosphore est très largement lié à la composition des eaux usées : une forte concentration en DCO facilement assimilable étant favorable à la déphosphatation biologique.

Les atouts majeurs de la déphosphatation physico-chimique sont un rendement d'élimination du phosphore élevé et une mise en œuvre aisée.

Cependant, elle se caractérise par un coût de fonctionnement non négligeable et une production de boues supplémentaires importante.

COMBINAISON DES VOIES BIOLOGIQUE ET PHYSICO-CHIMIQUE

Le traitement combiné du phosphore consiste à mettre en œuvre les voies biologique et physico-chimique au sein d'une même installation.

RENDEMENT DE DÉPHOSPHATATION

Un traitement du phosphore aussi efficace qu'avec la voie physico-chimique seule peut être obtenu par voie combinée. À partir des valeurs obtenues sur une dizaine de stations d'épuration, la concentration en phosphore total dans le rejet est en moyenne de 1,3 mg/l correspondant à un abattement moyen de 90 %. Rappelons que le rendement biologique représente un abattement minimum de 60 % par temps sec et de 30 % en temps de pluie (page 18).

(SUR)PRODUCTION DE BOUES

Les résultats de l'enquête effectuée par le Cemagref conduisent à une production supplémentaire de boues de l'ordre de 10 %.

DIMENSIONNEMENT

Les équipements spécifiques à prévoir sont un bassin d'anaérobiose, un traitement des boues adapté et des systèmes d'injection et de stockage du réactif de précipitation.

	Voie biologique	Voie physico-chimique
Élimination du phosphore	Rendement instable : 50-70 %	Potentiellement très poussée
Équipements nécessaires	Bassin d'anaérobiose équipé	Système d'injection et de stockage des réactifs
Coût de fonctionnement	Faible	Plus élevé
Production supplémentaire de boues	Négligeable	20 % environ
Qualité de la boue	Inchangée	Meilleure décantabilité
Impact sur le traitement des boues	Épaississement par voie mécanique obligatoire	aucun
Impact de la composition de l'eau sur le rendement	Fort	Faible

Tableau 8 – Caractéristiques des traitements physico-chimique et biologique.

Traitement des boues

Il est conseillé d'épaissir les boues par égouttage (pour la taille de stations concernées par cet ouvrage). Le lecteur doit se reporter à la page 19 pour le dimensionnement.

Injection et stockage des réactifs

La détermination de la quantité de réactif à injecter doit comptabiliser la quantité de phosphore sur-accumulée dans les boues ($P_{\text{suraccumulé}}$) en plus des flux évoqués à la page 28. Le bilan s'écrit :

$$P_{\text{à précipiter}} = P_{\text{entrée_soluble}} - P_{\text{assimilé}} - P_{\text{suraccumulé}} - P_{\text{sortie_soluble}}$$

La somme des quantités assimilée et suraccumulée de phosphore représente un abattement minimum sur le phosphore total de 60 % par temps sec et 30 % par temps de pluie.

Le réactif doit être stocké dans une cuve constituée d'un matériau résistant (cf. page 27) et injecté en un endroit bien mélangé.

MISE EN ŒUVRE

Les recommandations de gestion et de fonctionnement sont de même nature que celles préconisées dans le cadre d'un traitement par voie biologique ou physico-chimique mis en œuvre séparément. La difficulté d'exploitation réside dans la maîtrise de deux facteurs.

- L'ajustement des durées des plages d'aération : des durées de dénitrification trop courtes apportent des nitrates dans la zone anaérobie limitant le relargage du phosphore (cf. page 14). L'efficacité de l'asservissement des plages d'aération au potentiel rédox ou à l'oxygène dans le bassin d'aération est donc primordiale.
- Le dosage des réactifs de déphosphatation : il ne faut pas privilégier le traitement physico-chimique, sécuritaire, au détriment du traitement biologique, plus fragile mais plus économique. Dans le cas d'une station d'épuration alimentée par un réseau mixte, la qualité des eaux entrantes, et donc le rendement d'élimination du phosphore par voie biologique, sont hautement variables.

Filières complémentaires pour accroître l'abattement en phosphore

Les résultats de l'enquête réalisée par le Cemagref (cf. introduction) sur des stations d'épuration traitant le phosphore par voie physico-chimique ou combinée montrent qu'une concentration moyenne de 1,3 mg/l en phosphore total dans l'eau traitée est généralement atteinte, ce qui correspond à un rendement d'abattement moyen de 89 % pour une concentration initiale dans l'eau usée de 13 mg P_{total} /l (cf. page 38).

Le phosphore total mesuré dans l'eau traitée est constitué de phosphates (0,2 à 0,3 mg $P-PO_4$ /l), mais surtout de phosphore sous forme particulaire à hauteur de 4 à 5 % des MES de sortie, ce qui représente 0,8 à 1 mgP/l pour une concentration de 15 à 20 mg MES/l en sortie.

Ce résultat montre l'importance de l'étape de clarification sur la concentration en phosphore en sortie.

Avec un décanteur conventionnel, il est très difficile de garantir une concentration annuelle moyenne inférieure à 1 mg/l. Cependant, une concentration de sortie en phosphore légèrement supérieure à 1 mg P_{total} /l peut être maintenue en moyenne annuelle à condition que la concentration en MES du rejet reste inférieure à 20 mg MES/l. Pour respecter ce niveau de rejet, une concentration en boues inférieure à 5 g MES/l dans les bassins ne devra pas être dépassée et des dispositions évitant les chocs hydrauliques sur le décanteur au démarrage de l'aération (phénomène de vague) ou des pompes d'alimentation et de recirculation (équipement des pompes par un variateur de fréquence) devront être prises. Un indice de boues supérieur à 150 ml/g est également à proscrire.

Pour atteindre des concentrations moyennes annuelles en phosphore total inférieures à 1 mg P_{total} /l, la concentration en MES en sortie doit être réduite. Différentes solutions sont envisageables selon la concentration en phosphore total que l'on souhaite atteindre.

➤ Traitement tertiaire de l'effluent épuré (sortie du clarificateur conventionnel) par :

- filtration sur filtre à sable par exemple permettant de réduire la concentration en phosphore total en sortie à 0,8 mgP/l ;
- décantation grande vitesse avec ajout de floculant (vitesse ascensionnelle supérieure à

0,6 m/h) conduisant à une concentration en phosphore total de 0,5 à 1 mgP/l.

➤ Séparation du mélange eau/boue par des membranes à la place du clarificateur : l'effluent recueilli, exempt de toutes matières en suspension, contient du phosphore sous forme soluble (phosphates essentiellement) à une concentration de 0,2 à 0,3 mgP/l.



Le présent chapitre s'intéresse au coût de traitement du phosphore des eaux usées par les filières physico-chimique et combinée dont les caractéristiques techniques ont été exposées précédemment.

L'idée généralement admise que le traitement par voie physico-chimique est actuellement privilégié pour les stations d'épuration de petite capacité est confirmée par l'enquête réalisée par le Cemagref (cf. page 11). Du point de vue de l'équipement deux raisons expliquent simplement cette situation. Sur une station d'épuration existante, il est plus aisé d'ajouter un système d'injection et de stockage de réactif qu'un bassin d'anaérobiose. Sur les stations d'épuration à construire, le surcoût engendré par la conception du bassin d'anaérobiose est jugé *a priori* trop important.

Sur le plan de l'exploitation, le rendement de déphosphatation par voie biologique est fortement dépendant de la concentration en carbone facilement biodégradable de l'eau usée. Il peut diminuer de 60-70 %, en temps sec, à 30-50 %, en temps de pluie, lorsque la concentration diminue (cf. page 18). Le complément physico-chimique à apporter pour respecter les normes de rejet imposées en sortie reste encore mal connu.



L'option choisie dans ce chapitre consiste à comparer les coûts économiques des filières de déphosphatation, sur la base des coûts globaux d'investissement et de fonctionnement, pour un rendement d'élimination poussé. L'étude économique présentée vise à déterminer la capacité minimale de la station d'épuration pour laquelle la durée de retour sur investissement est raisonnable.

Coûts de chaque filière de déphosphatation

DÉMARCHE

La détermination des coûts globaux sur laquelle s'appuie la comparaison économique des deux modes de traitement du phosphore a été effectuée suivant les trois étapes suivantes illustrées par la figure 8 :

- ❶ recensement des ouvrages et équipements nécessaires à l'élimination du phosphore par chacune des filières ;
- ❷ dimensionnement de ces ouvrages et équipements arrêtés de manière classique à partir de l'état de l'art de la profession ;

③ calcul des coûts d'investissement et de fonctionnement à l'aide d'une analyse statistique des résultats de différentes enquêtes ou à l'aide de prix unitaires.

Le choix a été fait de ne pas prendre en compte les fluctuations possibles des paramètres qui interviennent dans le coût de traitement du phosphore afin de proposer un outil de comparaison simple. Ainsi, tout au long des étapes 2 et 3, des hypothèses ont été faites, tendant le plus souvent à privilégier le cas général. L'influence de certains de ces paramètres sur les coûts fait l'objet d'une étude de sensibilité spécifique présentée à la suite.

RECENSEMENT DES OUVRAGES ET DES ÉQUIPEMENTS

Le tableau 9 présente les ouvrages et équipements nécessaires à l'élimination physico-chimique du phosphore.

Pour l'élimination combinée du phosphore s'ajoute le coût d'investissement du bassin d'anaérobiose équipé (pompes, agitateur...).

CHOIX DE DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES ET DES ÉQUIPEMENTS

Le dimensionnement des ouvrages et des équipements concerne le système d'injection

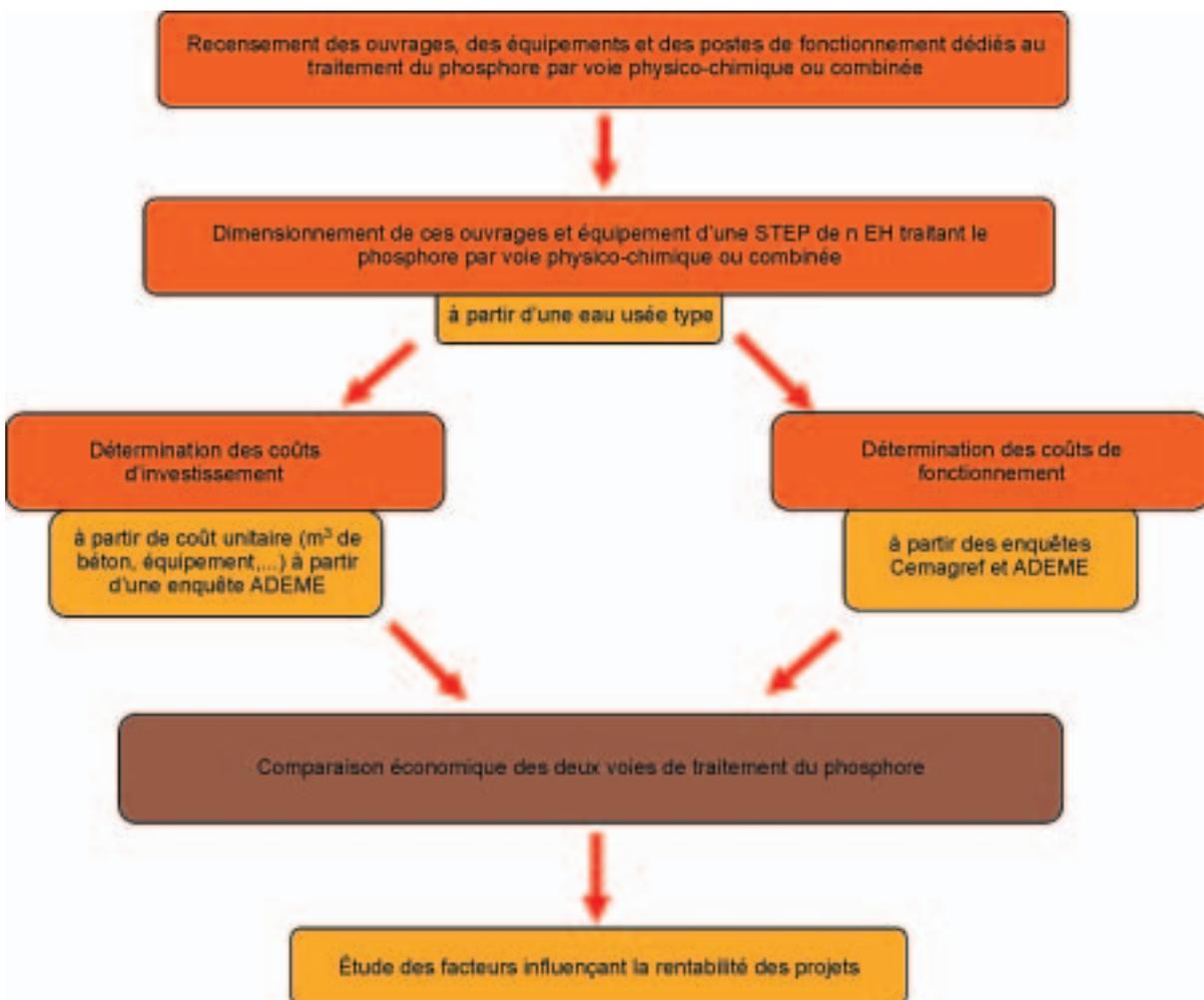


Figure 8 – Méthodologie de l'étude économique.

INVESTISSEMENT	FONCTIONNEMENT
<ul style="list-style-type: none"> • petits équipements : injection, bac de mélange et asservissement éventuellement de l'injection • cuve de stockage • dimensionnement supplémentaire du système de traitement des boues • système de stockage supplémentaire des boues 	<ul style="list-style-type: none"> • réactifs de déphosphatation (transport inclus) • traitement des boues supplémentaires • élimination des boues supplémentaires • consommation électrique

Tableau 9 – Ouvrages et équipements nécessaires au traitement physico-chimique du phosphore.

et de stockage du réactif de déphosphatation, le système de traitement et de stockage des boues, ainsi que le bassin d'anaérobiose et ses équipements.

SYSTÈME D'INJECTION ET DE STOCKAGE DES RÉACTIFS

Le dimensionnement du système d'injection et de stockage des réactifs est calculé sur la base de la quantité de phosphore à précipiter égale au phosphore soluble entrant auquel est soustrait le phosphore contenu dans les boues et le phosphore soluble du rejet (cf. page 28). Ces valeurs ont été choisies de la façon suivante.

- Le phosphore soluble de l'influent est généralement compris entre 60 et 85 % du phosphore total entrant (cf. page 28). L'option retenue pour l'étude économique est de considérer une valeur de 90 % ce qui tend à handicaper la déphosphatation physico-chimique sur l'aspect financier.
- Le phosphore contenu dans les boues, dans le cas d'une déphosphatation physico-chimique, est le phosphore assimilé, au sens strict (cf. page 13). C'est celui qui est utilisé pour les besoins métaboliques. Il a été estimé à 2,5 % des MES de la boue à partir de données de la littérature (Comeau Y., 1997). Dans le cas de la déphosphatation combinée, le phosphore contenu dans les boues est le phosphore assimilé additionné du phosphore sur-accumulé. Il a été estimé à 3 % des MES de la boue en considérant que le rendement d'élimination du phosphore, sans ajout de réactif, devait être de l'ordre de 60 %.
- Le phosphore soluble en sortie dépend du niveau de rejet exigé. Il a été choisi un rejet de 0,5 mg/l en phosphore dissous.

- Le rapport molaire théorique entre le réactif injecté et le phosphore à précipiter est de 1. Pour tenir compte des réactions parasites, un rapport de 1,5 a été considéré (cf. page 28).

La connaissance des caractéristiques de la solution commerciale (densité, poids de fer ou d'aluminium) associée à la quantité de phosphore à précipiter chaque jour permet de dimensionner le système d'injection et de stockage de celle-ci pour une durée de six mois.

SYSTÈME DE TRAITEMENT ET DE STOCKAGE DES BOUES SUPPLÉMENTAIRES

Le dimensionnement du système de traitement des boues supplémentaires dû à l'élimination du phosphore est logiquement lié à la production supplémentaire de boues. Celle-ci a été estimée à travers les résultats de l'enquête réalisée par le Cemagref. Ils ont permis de conclure à une production supplémentaire de boues de 20 % dans le cas du traitement physico-chimique du phosphore, de 10 % pour un traitement combiné (cf. page 26).

Bassin d'anaérobiose

Le dimensionnement du bassin d'anaérobiose est fondé sur l'hypothèse d'une eau usée normalement concentrée ce qui conduit à un volume de bassin égal à quatre fois le volume moyen horaire de temps sec (cf. page 19).

CALCUL DES COÛTS D'INVESTISSEMENT ET DE FONCTIONNEMENT

Une recherche bibliographique a mis en évidence deux approches possibles de définition des coûts d'une station d'épuration (Alexandre O., 2000). La première dite statistique,

s'appuie sur une analyse d'un ensemble de coûts réels de STEP construites. L'écart-type obtenu sur le paramètre coût par EH reste important même au sein de sous-ensembles homogènes quant au type de filières, aux contraintes de voisinage, aux contraintes de sol (Étude inter-agences, 1995). La deuxième démarche, celle des entreprises, consiste à définir le coût global par addition des coûts unitaires.

La méthode choisie s'inspire des deux approches précédentes. Les coûts d'investissement et de fonctionnement ont été définis soit par la voie statistique, soit par sommation des coûts unitaires en fonction de la pertinence des données disponibles. C'est donc un souci de considérer uniquement des données fiables qui a conditionné le choix de la méthode.

Les coûts d'investissement ont été définis par sommation de coûts unitaires exception faite des coûts de stockage des boues tirés du document ADEME « Les coûts de traitement et de recyclage agricole ». Les données de cet ouvrage ont également été prises en compte pour déterminer les coûts de fonctionnement du traitement des boues. Ceux relatifs au traitement physico-chimique du phosphore sont tirés des résultats de l'enquête réalisée par le Cemagref en 2002.

Les tableaux 10 et 11 présentent les coûts d'investissement et de fonctionnement retenus. Si nécessaire, ils ont été actualisés en 2002, en prenant en compte, pour l'investissement, les indices TPO1, et pour le fonctionnement, les indices INSEE de la consommation.

POSTES	VALEURS	SOURCE
Bassin d'anaérobiose équipé	1 seule	Constructeur (2002)
Cuve de stockage + système d'injection du réactif ...	1 seule	Constructeur (2002)
Système de traitement des boues (par égouttage)	1 seule	Constructeur (2002)
Stockage supplémentaire des boues (silo). Pour une production supplémentaire de 20 %, X = 0,2, de 10 %, X = 0,10	Coût en Euro (HT) par Équivalents-habitant (EH) : $1\,470,50 * (X * EH)^{0,47}$	ADEME (1998)

Tableau 10 – Coûts d'investissement.

POSTES	VALEURS	SOURCE
Réactifs de déphosphatation	Moyenne : 105 euro/t Valeur minimale : 85 euro/t Valeur maximale : 125 euro/t	Enquête Cemagref (2002)
Coût traitement boues Pour une production supplémentaire de 20 %, X = 0,2, de 10 %, X = 0,10	Moyenne : 1,52 * X Euro HT/EH an Valeur minimale : 0,38 * X Euro HT/EH an Valeur maximale : 2,52 * X Euro HT/EH an	ADEME (1998)
Élimination des boues Pour une production supplémentaire de 20 %, X = 0,2, de 10 %, X = 0,10	Moyenne : 1,09 * X Euro HT/EH an Valeur minimale : 0,59 * X Euro HT/EH an Valeur maximale : 1,59 * X Euro HT/EH an	ADEME (1998)

Tableau 11 – Coûts de fonctionnement.

L'identification des dépenses électriques propres au fonctionnement des pompes d'injection du réactif et de l'agitateur dans le bassin d'anaérobiose est délicate. La consommation électrique de l'agitateur concerne strictement la déphosphatation biologique. La consommation pour l'injection du réactif est attribuable aux deux voies de déphosphatation, mais est plus élevée pour la déphosphatation physico-chimique. On peut donc considérer que la différence de consommation électrique entre les deux filières de traitement n'est pas significative, notamment par rapport aux autres postes de dépenses.

Comparaison économique des deux filières

L'étude économique du traitement du phosphore se base sur le calcul des coûts globaux d'investissement et de fonctionnement des filières physico-chimique et combinée. L'objectif est de définir la durée à partir de laquelle le surcoût d'investissement de la déphosphatation combinée est annulé par un coût de fonctionnement annuel moindre par rapport à celui de la déphosphatation physico-chimique.

CALCUL DU COÛT GLOBAL ACTUALISÉ

Pour chacune des deux filières de traitement, a été définie la somme S comprenant le coût de l'investissement initial (à l'année 0) et l'ensemble des coûts de fonctionnement annuel de l'année 0 à l'année T . Puisque les sommes sont dépensées à des dates différentes, il a été choisi de les actualiser à l'année 0. La comparaison financière n'est pas un exercice comptable. De fait, elle exclut de prendre en compte, en plus de l'investissement, l'amortissement. Ceci reviendrait à considérer l'investissement initial deux fois.

La somme S , également définie comme étant le cumul des coûts engendrés pour traiter le phosphore par voie physico-chimique ou combinée après T années, s'écrit classiquement :

$$S = I + (F_1 + F_2 + F_3) \frac{1 - (1 + i)^{-T}}{i}$$

avec :

- I : l'investissement initial ;
- F_1 : les coûts de fonctionnement relatifs à l'achat et au transport des réactifs de déphosphatation ;
- F_2 : les coûts de fonctionnement relatifs à l'élimination des boues supplémentaires ;
- F_3 : les coûts de fonctionnement relatifs au traitement des boues supplémentaires ;
- i : le taux d'actualisation dont la valeur préconisée par le Commissariat au Plan est de 8 %.

DÉTERMINATION DE LA DURÉE NÉCESSAIRE À LA RENTABILITÉ

Dans un premier temps, le calcul de la somme S a été effectué en considérant, d'une part, les coûts moyens de fonctionnement et d'investissement, et d'autre part un taux de subvention de 50 % pour l'investissement valeur moyenne qui peut raisonnablement être obtenue. Plusieurs capacités de stations d'épuration ont été explorées et les courbes obtenues sont présentées sur la figure 9. La légende précise le type de traitement (physico pour physico-chimique) et la capacité de la station considérée en équivalents-habitants.

L'année n pour laquelle la rentabilité de la filière par voie combinée est acquise est obtenue lorsque la somme des dépenses de ce projet devient inférieure à la somme des dépenses de la filière d'élimination par voie physico-chimique.

Sous réserve d'une exploitation optimale, et d'un point de vue économique, on observe

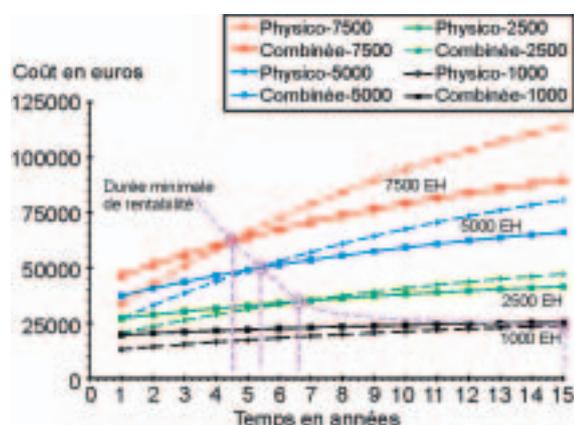


Figure 9 – Coûts cumulés avec un taux de subvention de 50 % pour l'investissement.

que l'investissement du bassin d'anaérobiose est rentabilisé d'autant plus rapidement que la capacité de la STEP est importante (cf. figure 9). Avec un taux de subvention de 50 % (valeur qui peut raisonnablement être attendue lors de la construction), le retour sur investissement est de 5 ans pour une installation de capacité de 5 000 EH ; de 7 ans pour une installation de capacité de 2 500 EH.

Lorsque le taux de subvention est très nettement inférieur (20 %), la durée de retour sur investissement est portée à douze ans pour une installation de 5 000 EH (annexe 3).

SENSIBILITÉ AUX CHANGEMENTS DE CERTAINES VARIABLES

Dans un second temps, l'influence des différents facteurs intervenant dans le traitement du phosphore a été étudiée de façon à identifier leur impact sur la durée nécessaire pour atteindre la rentabilité :

- coût de l'élimination et du traitement des boues ;
- coût des réactifs de traitement du phosphore ;
- coût d'investissement des ouvrages + équipements de déphosphatation (annexe 3) ;
- taux de subvention sur l'investissement et du taux d'actualisation (annexe 3).

L'option retenue a été de faire varier un paramètre à la fois, les autres facteurs prenant leur valeur moyenne avec par exemple un taux de subvention de 50 %. Les résultats sont exposés sous forme d'histogrammes (cf. figure 10, figure 12 et figure 11). Ils expriment la période en années à l'issue de laquelle le coût cumulé du traitement du phosphore par voie combinée est inférieur à celui du traitement physico-chimique.

Les figures 10, 11 et 12, montrent que lorsqu'un paramètre est économiquement défavorable à la déphosphatation biologique, la durée de retour sur investissement reste inférieure à six ans pour les stations d'épuration de capacité supérieure à 5 000 EH. En revanche, pour les stations de 1 000 EH, le retour sur investissement reste toujours supérieur à 20 ans.

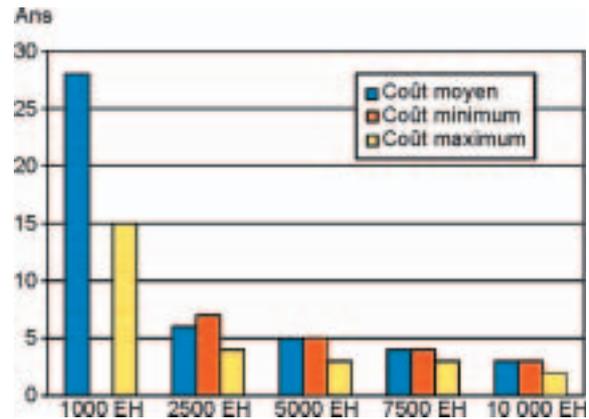


Figure 10 – Rentabilité de la déphosphatation combinée en fonction du coût d'élimination des boues.

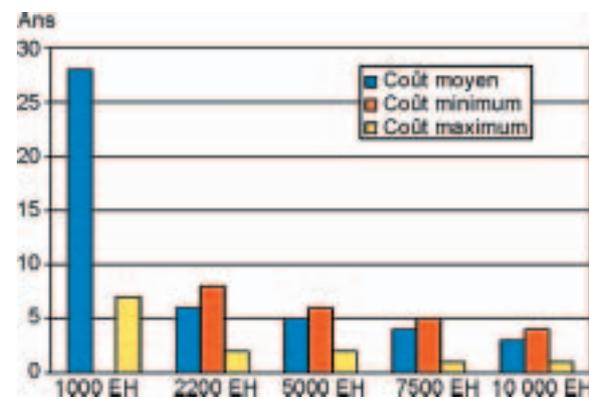


Figure 11 – Rentabilité de la déphosphatation combinée en fonction du coût de traitement de la boue.

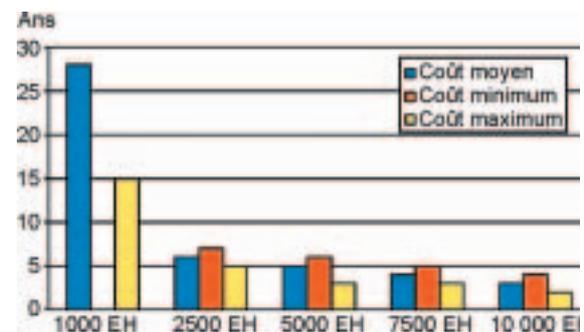


Figure 12 – Rentabilité de la déphosphatation combinée en fonction du coût des réactifs.

Dans l'hypothèse de l'obtention d'un taux de subvention voisin de 50 %, l'analyse économique conduit à recommander la déphosphatation combinée pour les stations d'épuration de capacité supérieure à 5 000 EH. Elle est formellement déconseillée pour des stations d'épuration de capacité inférieure à 1 000 EH.



CONCLUSION



Le traitement du phosphore contenu dans les eaux usées relève d'une double exigence réglementaire et environnementale dont l'objectif est la limitation de l'eutrophisation des eaux continentales. Le présent ouvrage fait le point sur les aspects techniques et financiers du traitement du phosphore mis en œuvre sur les petites stations d'épuration.

L'élimination du phosphore par voie biologique nécessite la présence d'un bassin d'anaérobiose en tête. La biomasse déphosphatante soumise à une alternance de conditions anaérobies et aérobies absorbe le phosphore au-delà de ses besoins métaboliques. Le choix du système d'épaississement des boues, par égouttage, est dicté par la nécessité d'éviter tout relargage ultérieur de phosphore. L'inconvénient majeur de cette filière est la corrélation forte entre son efficacité et la concentration en DCO facilement assimilable des eaux usées. Le rendement moyen d'élimination du phosphore est compris entre 60 et 70 %.

Le traitement physico-chimique consiste en une précipitation du phosphore soluble après ajout d'un réactif à base de fer ou d'aluminium. La précipitation a généralement lieu dans le bassin d'aération, impérativement en un lieu bien mélangé. Si cette technique permet un traitement poussé du phosphore, elle présente le désavantage de son coût lié à la production de boues supplémentaires (20 %) et à l'achat de réactifs.

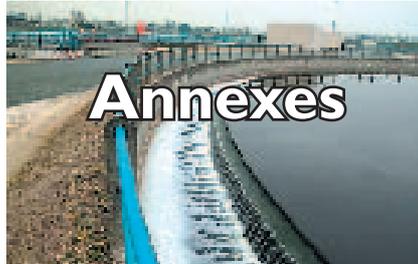
Le traitement combiné du phosphore, qui associe les voies biologique et physico-chimique, présente les avantages de ces deux filières. Cette technique est efficace et permet de garantir des niveaux de rejets contraignants. Son coût de fonctionnement est moindre par rapport au traitement physico-chimique. Cette technique mixte requiert un réglage des réactifs de déphosphatation délicat afin de ne pas privilégier la déphosphatation physico-chimique au détriment de la déphosphatation biologique.

L'étude économique de la déphosphatation physico-chimique et combinée apporte une réponse précise au débat relatif à la possibilité de mise en œuvre du traitement biologique du phosphore sur les petites stations d'épuration. Dans le cas où un taux de subvention voisin de 50 % est accordé, l'investissement du bassin d'anaérobiose est compensé très rapidement pour des stations d'épuration de plus de 5 000 EH par un coût de fonctionnement moindre par rapport au traitement physico-chimique. Le retour sur investissement est beaucoup plus long pour les installations de 1 000 EH. Le choix du mode de déphosphatation doit prendre en compte, outre le coût, l'exigence d'une exploitation plus suivie pour un traitement combiné par rapport à un traitement physico-chimique.



LISTE BIBLIOGRAPHIQUE

- Agence de l'Eau, ministère de l'Environnement, 1995, *Approche technico-économique des coûts d'investissement des stations d'épuration*, Étude inter-agences, avril 1995, n° 40, 48 pp.
- Alexandre O., 2000, Méthodologie d'évaluation des coûts d'investissement et d'exploitation des petites stations d'épuration urbaines, *Ingénieries*, p. 5 à 12, numéro spécial.
- Arvin, E., 1985, *Phosphatfällung durch biologische phosphorentfernung*. *gwf Wasser-Abwasser*, 126 pp.
- ASCE, *Manual and report on Engineering practice n° 76*, 1992, Design of municipal wastewater treatment plants. Water Environment Federation. 601 Wythe Street, Alexandria, VA 22314-1994.
- Berner E. K., Berner R. A., 1996, *Global environment. Water, Air, and geochemical cycles*, Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey 07458.
- Comeau Y., 1990, La déphosphatation biologique, métabolisme microbien, *Sciences et Techniques de l'eau* 23(1): 47-60.
- Comeau Y., 1990, La déphosphatation biologique, procédés et conception, *Sciences et Techniques de l'eau* 23(2): 199-216.
- Comeau Y., 1997, *Procédés et conception de filières de déphosphatation biologique*. Journées internationales d'étude des eaux : la déphosphatation des eaux usées, Liège, Palais des congrès, 22-23 mai 1997, CEBEDOC éditeur.
- Dernat, M., Elmerich, P., Pouillot, M., 1994, Vers une optimisation de la déphosphatation physico-chimique, *L'Eau, l'Industrie, les Nuisances* 182.
- Duchène Ph., 1999, *Estimation de la production des boues*, Brochure orange n° 22. Édition Cemagref.
- Ekama, G. A., Siebritz, I. P., Marais, G. v. R., 1983, Considerations in the process design of nutrient removal activated sludge processes, *Wat. Sci. Tech.*, 15 283-318.
- FNDAE, Cemagref, MAP-DERF., 2002, *Traitement de l'azote dans les stations d'épuration biologique des petites collectivités*, 96 pp., Document Technique FNDAE, n° 25.
- Liu, W. T., Mino, T., Matsuo, T., Nakamura, K., 1996, Biological phosphorus removal processes-effect of pH on anaerobic substrate metabolism, *Wat. Sci. Tech.* 34 (1-2) 25-32.
- Maurer, M., Boller, M., 1998, *Modelling of phosphorus precipitation in wastewater treatment plants with enhanced biological phosphorus removal*, 4th Kollokollo Seminar on Activated Sludge Modelling, Denmark, 16-18 march.
- Villebrun, J. F., 1989, *La déphosphatation biologique appliquée à la station d'épuration de Craon*, Rapport de la DDAF de la Mayenne.
- Wagner M., A. R., Lemmer H., Manz W., Schleifer K. H., 1994, Probing activated sludge with fluorescently labeled rRNA targeted oligonucleotides, *Wat. Sci. Tech.* 29(7): 15-23.
- Wentzel, M. C., Lötter, L. H., Loewenthal, R. E., Marais, G. v. R., 1986, Metabolic behaviour of *Acinetobacter* spp. in enhanced biological phosphorus removal - a biochemical model, *Water SA* 12 (4) 209-224.
- Wexler, F., 1997, *La déphosphatation physico-chimique : application en batch avec sels de fer, hydroxydes et polychlorures d'aluminium*. *Typologie du phosphore dans les boues biologiques aérées*.



LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 – Différents types de filières de traitement biologique du phosphore

Annexe 2 – Différents types de filières de traitement physico-chimique du phosphore

Annexe 3 – Étude économique du traitement du phosphore

Annexe 1 – Différents types de filières de traitement biologique du phosphore

L'apparition des différents procédés de déphosphatation biologique, des années 50 à nos jours, suit logiquement l'évolution de la compréhension du mécanisme du traitement biologique. Trois séries de procédés peuvent être mises en évidence. Seuls sont décrits les principaux.

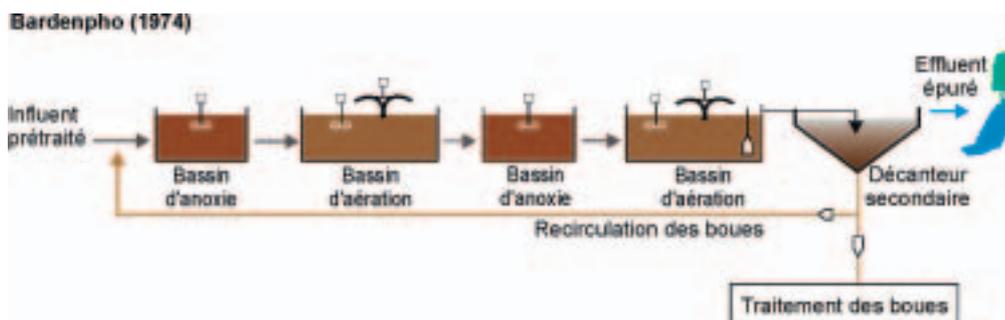
● DE L'OBSERVATION À LA COMPRÉHENSION

Au cours des années 50 à 70, il a été mis en évidence que les procédés à type piston et possédant une zone carencée en oxygène permettaient une élimination biologique du phosphore.

Bardenpho (1974)

L'élimination du phosphore est essentiellement liée à un mauvais contrôle de la deuxième zone d'anoxie qui au cours de la journée joue le rôle d'un bassin d'anaérobiose.

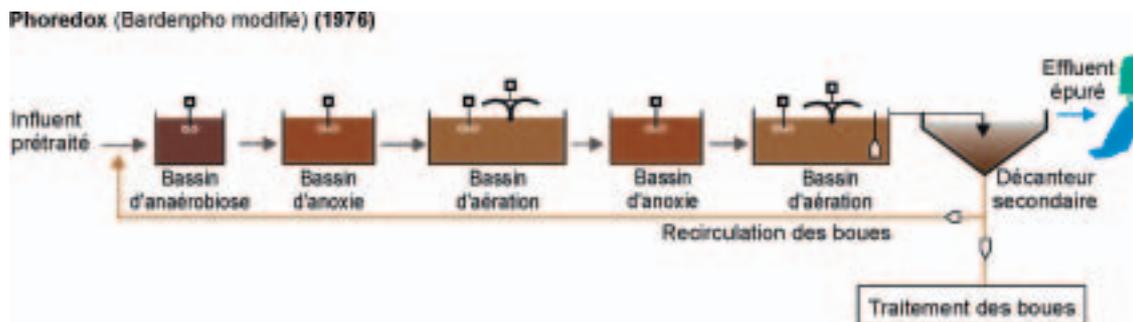
Ce procédé n'assure pas une élimination poussée du phosphore.



● LES PROCÉDÉS AVEC BASSIN D'ANAÉROBIOSE EN TÊTE

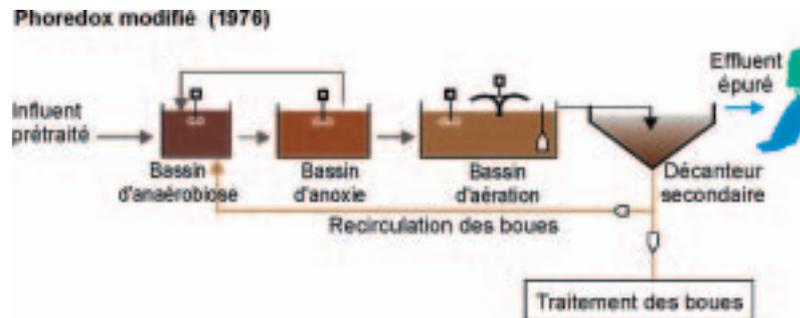
Bardenpho modifié ou Phoredox (1976)

Ce procédé est directement issu du procédé BARDENPHO, destiné au traitement de l'azote, qui ne comprend que les quatre derniers bassins. Une zone anaérobie a simplement été placée en tête.



Phoredox modifié (1976)

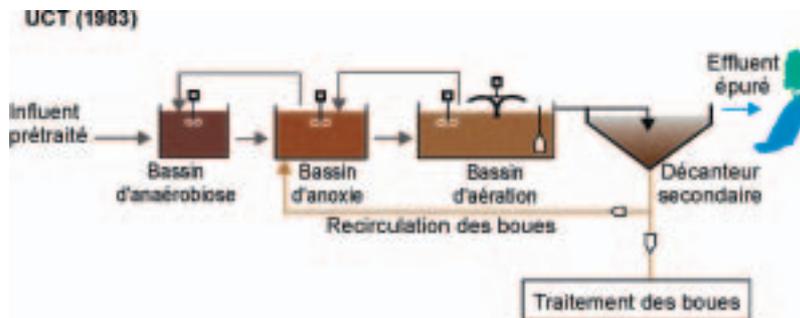
Il s'agit du concept communément adopté en France. Par rapport au procédé précédent, les deux derniers bassins ont été supprimés. Et à la filière qui permet d'éliminer l'azote par la présence des bassins d'anoxie et d'aération a été ajoutée, en tête, un bassin d'anaérobiose.



● L'OPTIMISATION DE LA DÉNITRIFICATION

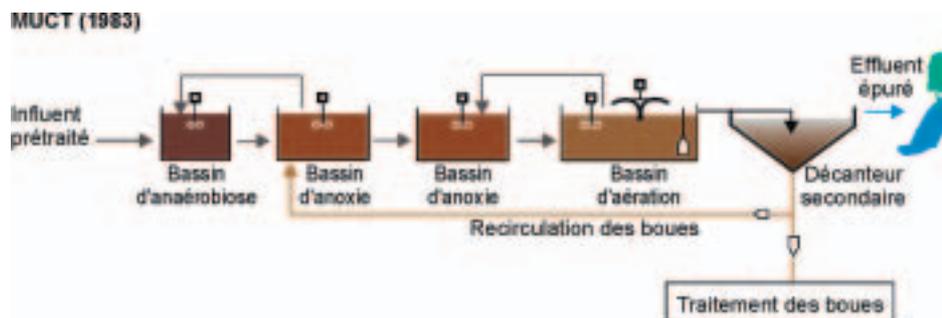
UTC (1983)

Ce procédé se différencie du précédent par un passage des boues de recirculation dans la zone d'anoxie préalablement à leur envoi en zone anaérobiose. Le bassin d'anaérobiose reçoit uniquement les eaux usées et la circulation des nitrates.



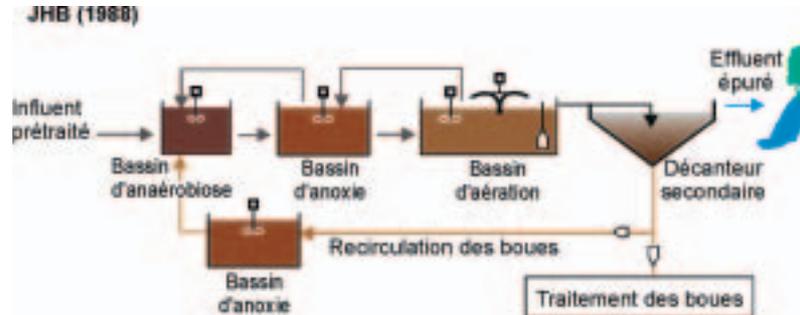
MUCT (1983)

Dans ce procédé, l'ajout d'un second bassin d'anoxie, permet de dissocier la recirculation des boues du clarificateur de la circulation de l'eau.



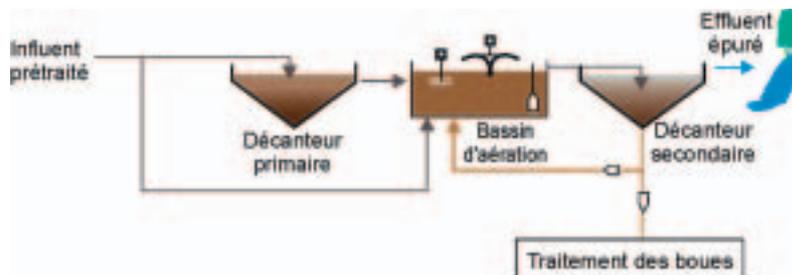
JHB (1988)

Ce procédé a été mis en œuvre sur la station d'épuration de Johannesburg. La recirculation des boues aboutit à un deuxième bassin d'anoxie.



Annexe 2 – Différents types de filières de traitement physico-chimique du phosphore

● LA PRÉ-PRÉCIPITATION

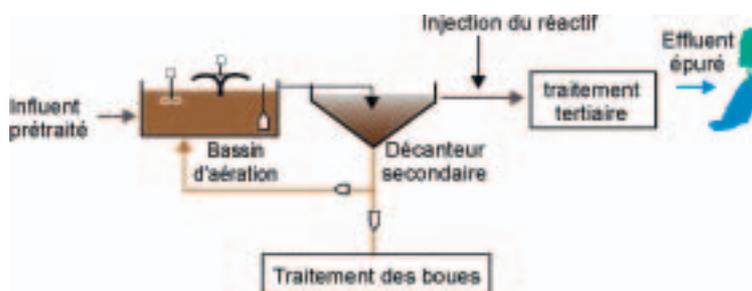


Le réactif est introduit à l'amont de la décantation primaire.

La déphosphatation primaire présente l'avantage de ne pas nécessiter de transformations importantes lorsque la station comporte un décanteur primaire. L'abattement obtenu sur la DBO est élevé (jusqu'à 70 %) ce qui soulage l'étape biologique aval.

Cette technique comporte deux inconvénients principaux : d'une part, les matières en suspension et les matières colloïdales de l'eau brute sont concernées par la réaction (ce qui entraîne une consommation importante de réactifs et la formation de boues légères sur l'étape biologique aval), et d'autre part, l'effluent parvenant au biologique peut être carencé en P si le traitement primaire est trop poussé bien que les polyphosphates ne soient pas piégés à ce stade.

● LA POST-PRÉCIPITATION



Si la post-précipitation permet d'obtenir de faibles concentrations de P en sortie (0,5 à 1 mg/l), elle nécessite l'ajout d'un décanteur supplémentaire.

Les doses de réactifs à ajouter sont, contrairement à ce que l'on pourrait penser, supérieures à la stœchiométrie.

Annexe 3 – Étude économique du traitement du phosphore

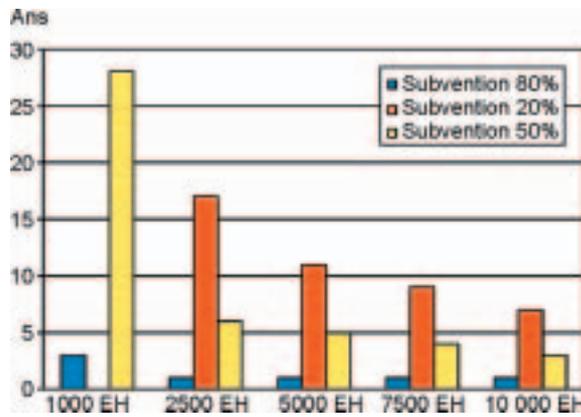


Figure 1 – Rentabilité de la déphosphatation combinée en fonction du taux de subvention

48

Figure 2 – Rentabilité de la déphosphatation combinée en fonction du coût d'investissement des ouvrages et équipements

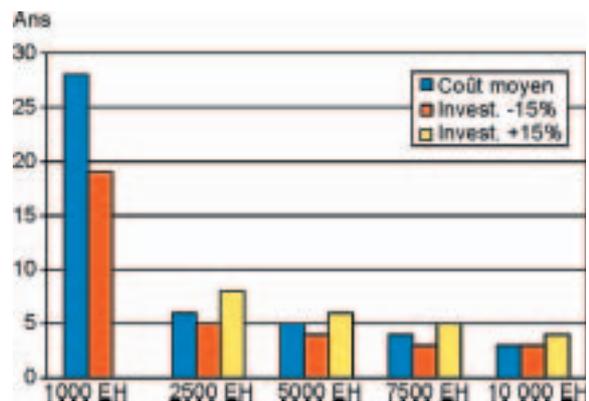
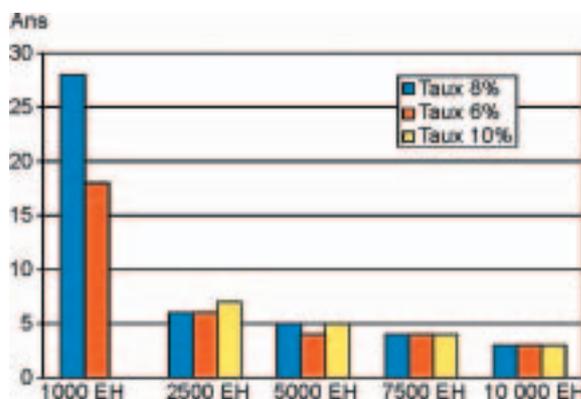


Figure 3 – Rentabilité en fonction du taux d'actualisation





Résumé

Le traitement du phosphore contenu dans les eaux usées relève d'une double exigence réglementaire et environnementale dont l'objectif est la limitation de l'eutrophisation des eaux continentales. Ainsi est-il courant que soit imposé aux rejets de stations d'épuration de capacité de traitement inférieure à 10 000 EH, situées ou non en zone sensible, un niveau minimum sur le paramètre phosphore.

Le présent ouvrage propose aux petites collectivités un outil d'aide à la décision, en termes de choix technique et financier, pour maîtriser l'élimination du phosphore des eaux résiduaires par voie biologique et par voie physico-chimique. Il présente brièvement les aspects réglementaires et fait le point sur l'origine et les formes du phosphore. Il décrit ensuite les aspects techniques des filières biologique et physico-chimique sous forme de recommandations en termes de dimensionnement et de gestion. Il offre enfin une comparaison économique des différents modes du traitement du phosphore.

Mots-clefs :

Déphosphatation, Dimensionnement, Réactifs de floculation, Boues, Coûts d'investissement et de fonctionnement



Abstract

Phosphorus removal in small activated sludge wastewater treatment plants – comparison of technical and economical aspects for biological and physico-chemical phosphorus removal

Phosphorus removal from wastewaters is induced by both policies and environmental requirements to reduce the eutrophication in surface waters. So, waste water treatment plants which capacity is under 10 000 PE, discharging or not to sensitive areas, are frequently required to meet a minimum level of phosphorus removal.

This document provides the small communities with a technical and an economical tool that guides the choice between a physico-chemical or a biological phosphorus removal process. It briefly presents the principal characteristics of phosphorus and gives its origin and its chemical forms. Technical advices are then proposed to design and manage both physico-chemical and biological phosphorus removal plants. Finally, an economic comparison of the two phosphorus removal approaches is presented.

Keywords :

Phosphorus removal, French design practice, flocculants, sludge production, capital and operating costs, wastewater, domestic wastewater.