

Cours de **Traitement des eaux**

Enseignant: KOUADIO Adolphe, Ingénieur en Chimie industrielle.

COURS DE TRAITEMENT DES EAUX

CONTENU :

Séquence 1 : Introduction au traitement des eaux.

Séquence 2 : Procédés généraux de traitement.

Séquence 3 : Procédés particuliers de traitement.

Proposition de : M. KOUADIO Adolphe, ingénieur en Chimie industrielle.

Volume horaire : 80 heures.

Séquence I : **INTRODUCTION AU TRAITEMENT DES EAUX**

- **Contenu de la séquence**

- I. Cycle de l'eau.
- II. Normes relatives aux eaux de consommation humaine.
- III. Caractéristiques des eaux naturelles.
- IV. Critères de choix des eaux.
- V. Impuretés rencontrées dans les eaux.
- VI. Traitements de l'eau potable.

Séquence II : **PROCEDES GENERAUX DE TRAITEMENT**

- **Objectif**

A l'issue de cette séquence, l'auditeur devra être capable de choisir parmi les traitements généraux, ceux qui seront nécessaires et les mieux adaptés à une eau présentant des caractéristiques données.

- **Contenu de la séquence**

Chapitre I : Prétraitement.

Chapitre II : Coagulation et floculation.

Chapitre III : Décantation.

Chapitre IV : Filtration.

Chapitre V : Désinfection.

II.1. PRETRAITEMENT

L'eau brute qui arrive à la station ne doit pas contenir de matériaux ou d'impuretés dont la nature, la concentration, la taille, etc., risqueraient d'empêcher le fonctionnement normal des unités de traitement.

Le prétraitement des eaux, qui peut se définir comme l'ensemble des opérations que subit l'eau en amont de la station, constitue une étape essentielle dans le processus du traitement.

En effet, le prétraitement conditionne les bons résultats qui seront obtenus lors du traitement proprement dit. Son objectif est de débarrasser l'eau des impuretés, en général grossières, qu'elle peut contenir et qui sont susceptibles de causer des préjudices aux diverses unités de la station.

Les procédés mis en œuvre sont purement physiques ou mécaniques et s'associent à un procédé chimique qui préserve la canalisation qui véhicule l'eau brute de l'action de certaines bactéries et facilite les étapes de traitement futures. Ces procédés mis en œuvre dans un contexte de traitement d'eau potable sont relatifs aux opérations suivantes:

- Dégrillage
- Tamisage
- Prétraitement au chlore.

Il vient s'ajouter à ces diverses opérations, un certain nombre d'aménagements relatifs :

- au captage de l'eau
- éventuellement à la constitution de réserves.

II.1.1. AMENAGEMENT DE LA PRISE D'EAU BRUTE

Bien qu'il ne s'agisse pas là d'une opération de prétraitement proprement dit, il est nécessaire d'aménager la prise d'eau de telle sorte que l'eau, là où elle est captée, soit la moins chargée possible. Ceci permettra de réduire au maximum l'importance des traitements à venir.

Le point de prélèvement sera choisi de telle façon que, tout au long de l'année, la teneur de l'eau soit la plus faible possible en

- matières en suspension
- colloïdes,
- plancton, etc...

Dans les lacs de grande profondeur, on aura intérêt à prélever l'eau à 30 - 35 cm de la surface, mais à 6 - 7 m au moins du fond, pour éviter de capter les particules qui se trouvent en mouvement sous l'action des courants de fond.

D'autre part, à cette profondeur la pénétration de la lumière est atténuée et le développement du plancton s'en trouve fortement réduit.

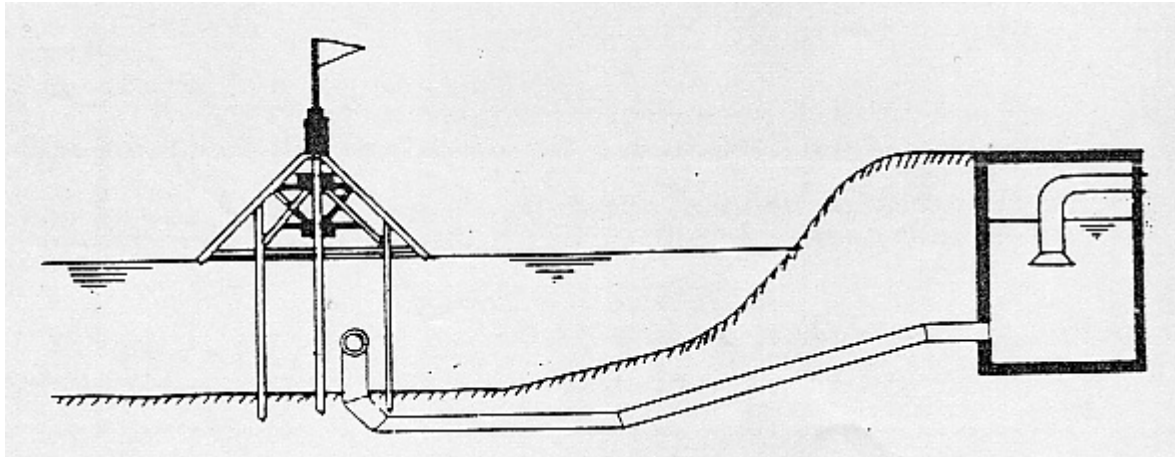


Fig. 6. *Prise d'eau dans le courant.*

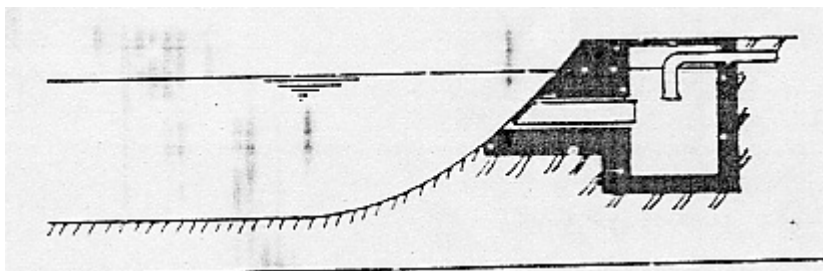


Fig. 7. *Prise d'eau sur berge.*

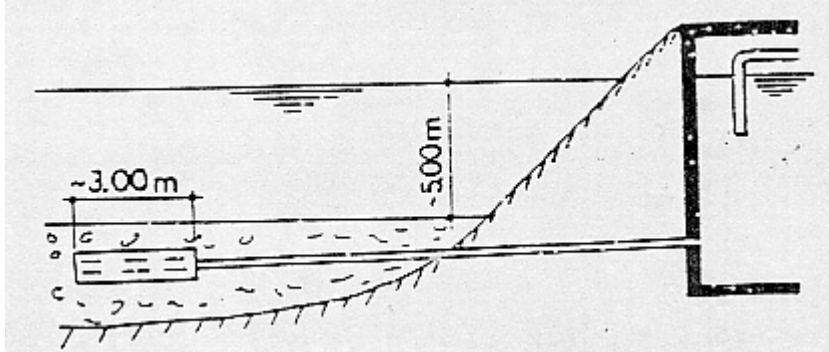


Fig. 8. *Prise d'eau dans le courant par puisard.*

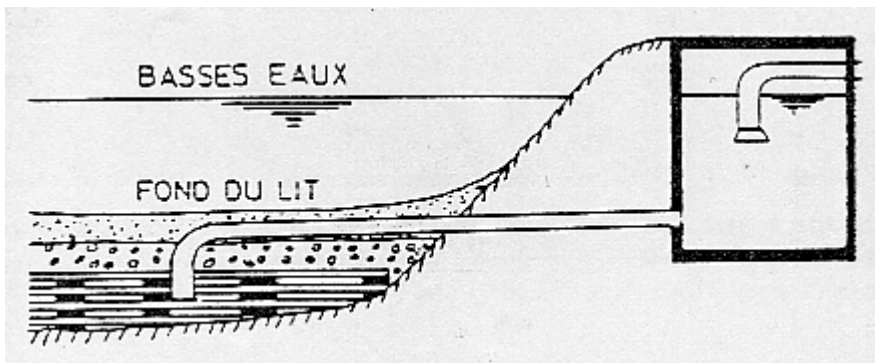


Fig. 9. *Prise d'eau dans le lit par grille de filtration.*

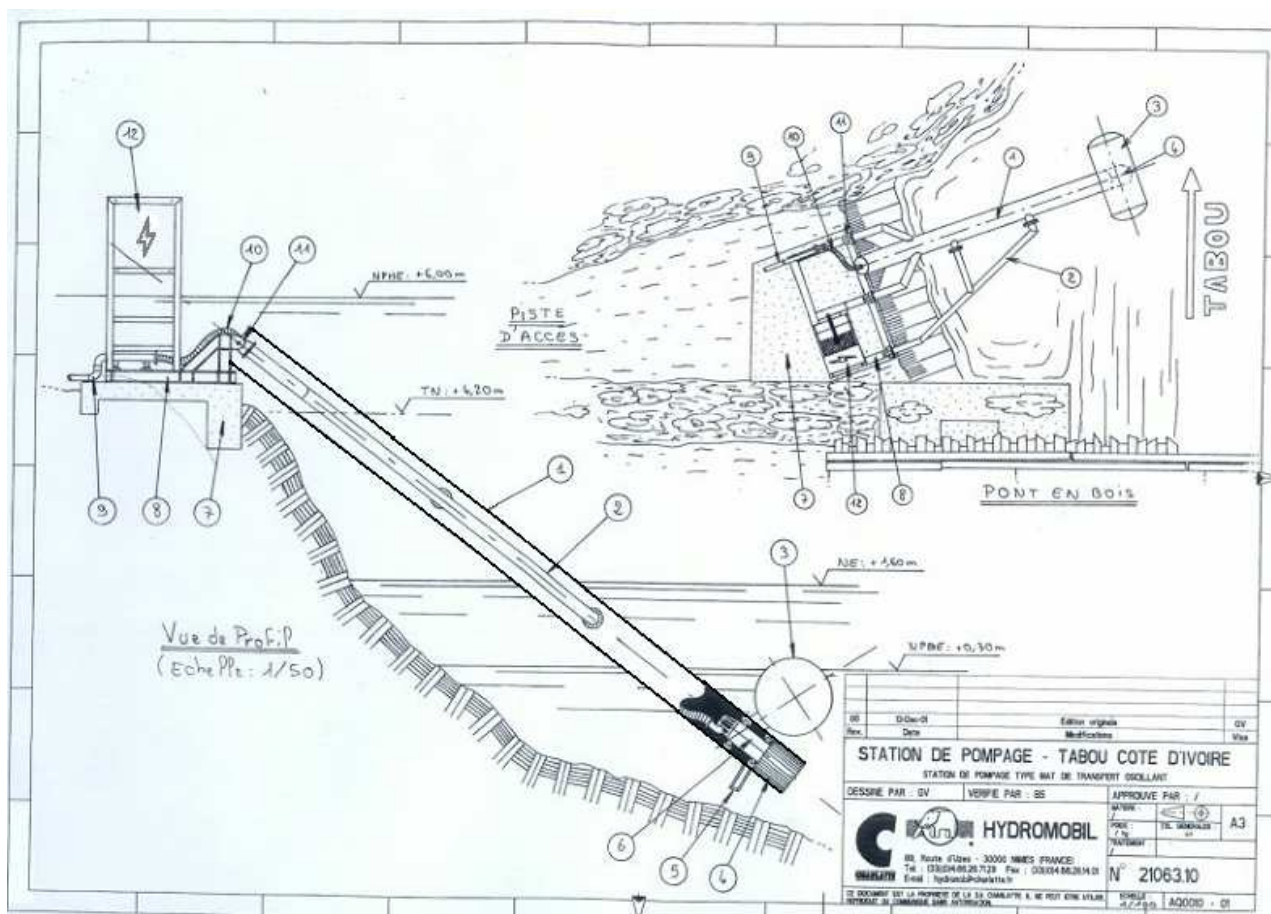


Fig. 10. Prise d'eau par mât oscillant HYDROMOBIL™.

II.1.2. OPERATION DE DEGROSSISSAGE

Divers procédés, complémentaires les uns des autres, sont utilisés pour éliminer les particules les plus grossières. En général, l'élimination commence par celle des plus gros éléments et s'achèvent par celle des plus petits.

II.1.2.1. DEGRILLAGE

Le dégrillage permet de protéger la station de l'arrivée intempestive de gros débris (troncs d'arbre, branches, cadavres d'animaux, etc.) susceptibles de provoquer des endommagements des dispositifs de pompes, par exemple ou de charger l'eau de matières organiques.

Le dégrillage fait appel à des grilles métalliques dont l'écartement des barreaux est décroissant.

On distingue :

- le prédégrillage, écartement de 50 à 100 mm ;
- le dégrillage moyen, écartement de 10 à 25 mm ;
- le dégrillage fin, écartement de 3 à 10 mm.

Les grilles peuvent être à nettoyage manuel ou automatique, et sont disposées dans des chenaux où transite l'eau brute.

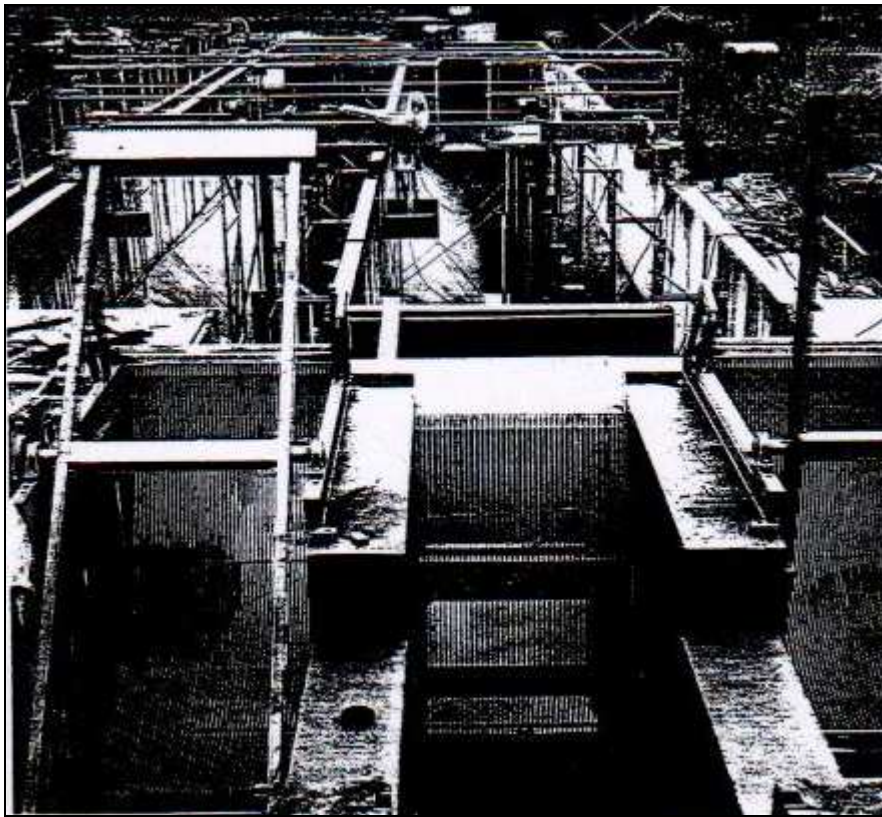
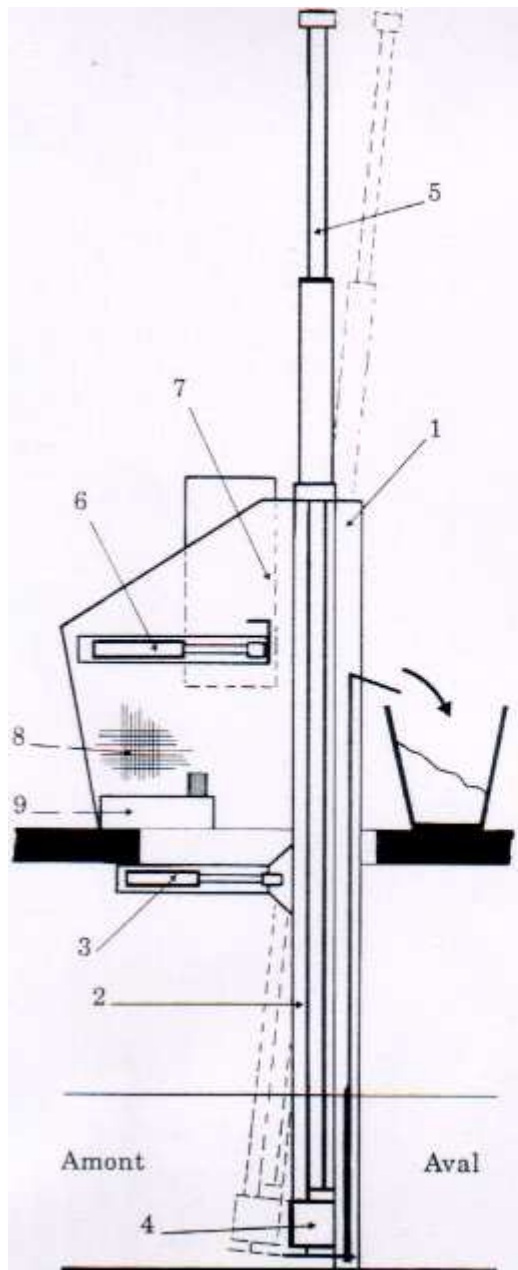


Fig. 11. Grille courbe.



1. Châssis rigide avec champ de grille.
2. Châssis mobile.
3. Vérin de châssis mobile.
4. Chariot porte-peigne.
5. Vérin de relevage.
6. Ejecteur.
7. Armoire électrique.
8. Protections grillagées.
9. Centrale hydrauliques.

Fig. 12. Coupe de la grille droite.

Remarque : la vitesse de passage à travers la grille doit être suffisante pour que les matériaux retenus soient appliqués sur la grille sans toutefois provoquer des pertes de charge prohibitive.

On adopte en général des vitesses de passage entre les barreaux de 0,6 à 1,2 m/sec qui peuvent être portées dans certains cas jusqu'à 1,4.

II.1.2.2. TAMISAGE

Le dégrillage ne permet pas d'éliminer certains éléments véhiculés par les eaux. Il en est ainsi par exemple des feuilles ou des insectes ; aussi a-t-on recours au tamisage qui comprend plusieurs étapes :

- le macrotamisage : les mailles vont de 0,2 à quelques millimètres.
- le microtamisage : le maillage est inférieur à 100 microns.

Les dispositifs de tamisage peuvent être :

- des tambours rotatifs, lorsque le niveau de l'eau est relativement constant ;
- des bandes de tamisage, lorsqu'il n'en est pas ainsi.

En eaux de consommation, le tamisage est intéressant pour traiter les eaux brutes à faible turbidité.

Le microtamisage peut ainsi arrêter le plancton et certaines matières organiques ou minérales dont la taille est supérieure à celle des mailles du tamis.

Il convient de préciser cependant que le microtamisage ne bloque :

- ni les argiles
- ni les éléments colloïdaux.

Il est d'autre part sans effet sur la couleur.

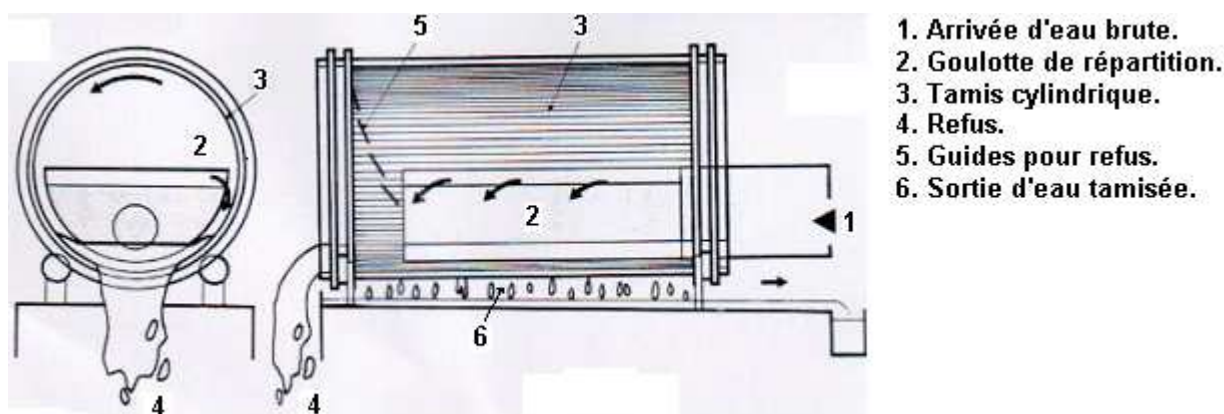


Fig. 13. Schéma d'un microtamis rotatif à alimentation intérieure et nettoyage par pulvérisation.

II.1.2.3. DESSABLAGE

Le dessablage peut être placé :

- soit avant,
- soit après le tamisage.

Il a pour but d'extraire le sable des eaux brutes, afin qu'il n'aille pas

- se déposer dans les conduites d'amenée d'eau à la station,
- surcharger les traitements ultérieurs,
- endommager les pompes par abrasion.

Le dessablage concerne des particules de diamètres supérieurs à 200 microns.

Ces appareils assurent la séparation des particules par centrifugation.

II.1.2.4. DEBOURBAGE

Le débouillage est une prédécantation située en amont de la station et dont le but est d'éliminer les sables fins et limons.

Le débouillage s'impose si la capacité de traitement du décanteur s'avère insuffisante, par rapport à la charge véhiculée par l'eau lors de son entrée en station.

Les débouilleurs sont dimensionnés de la même façon que les décanteurs statiques et peuvent faire appel à des flocculants.

II.1.2.5. DESHUILAGE

Le déshuilage est une opération de type « liquide/liquide ».

Les huiles, étant en général plus légères que l'eau, remontent en surface d'où elles sont éliminées par simple déversement.

En général, on dispose une cloison dans le canal d'amenée d'eau ; cette cloison fait barrage à l'huile qui se trouve à la surface libre, et un repris par l'intermédiaire de goulottes et de déversoirs orientables permettent l'élimination de l'huile...

Il existe également pour des grands plans d'eau, des récupérateurs mobiles flottants.

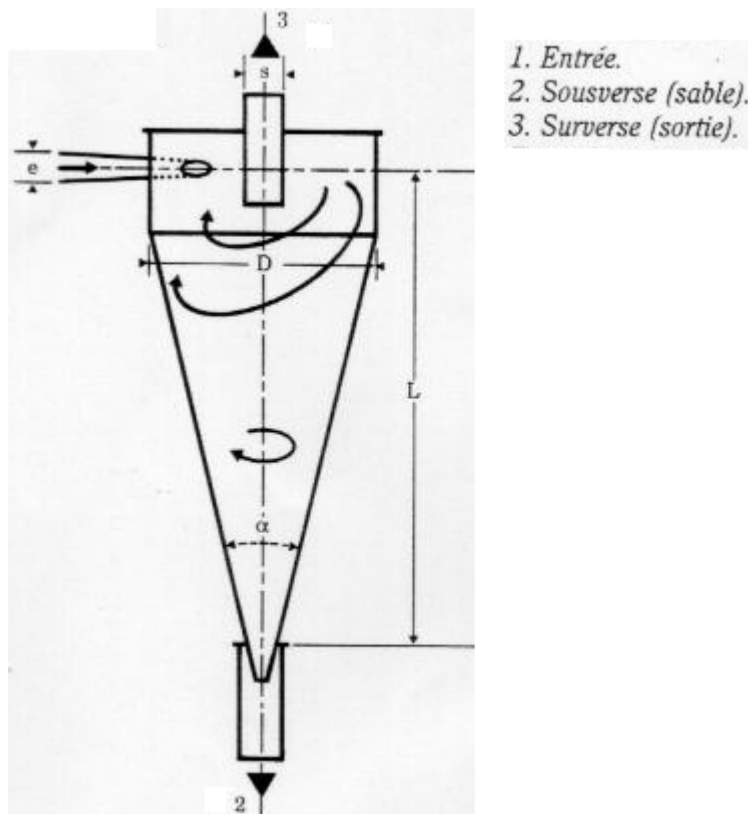


Fig. 14. Hydrocyclone.

II.1.3. PRETRAITEMENT CHIMIQUE

Lorsqu'une eau est chargée en matières organiques et en plancton, et qu'elle doit être amenée à la station par une conduite de grande longueur, il est indispensable d'effectuer une oxydation au départ de la

conduite. En effet, il convient d'éviter le développement de plancton sur la paroi, ce qui aboutirait à plus ou moins longue échéance, à l'obstruction partielle de la conduite.

Pour réaliser cette oxydation, on utilise, en général, le chlore ou ses dérivés.

Un autre intérêt de cette chloration réside dans le fait que les bactéries ferrugineuses et sulfato-réductrices, susceptibles d'attaquer le fer du matériau de la canalisation d'eau brute, seront annihilées par cette oxydation.

La Fig. 15 compare les actions oxydantes des produits chlore, ozone et bioxyde de chlore.

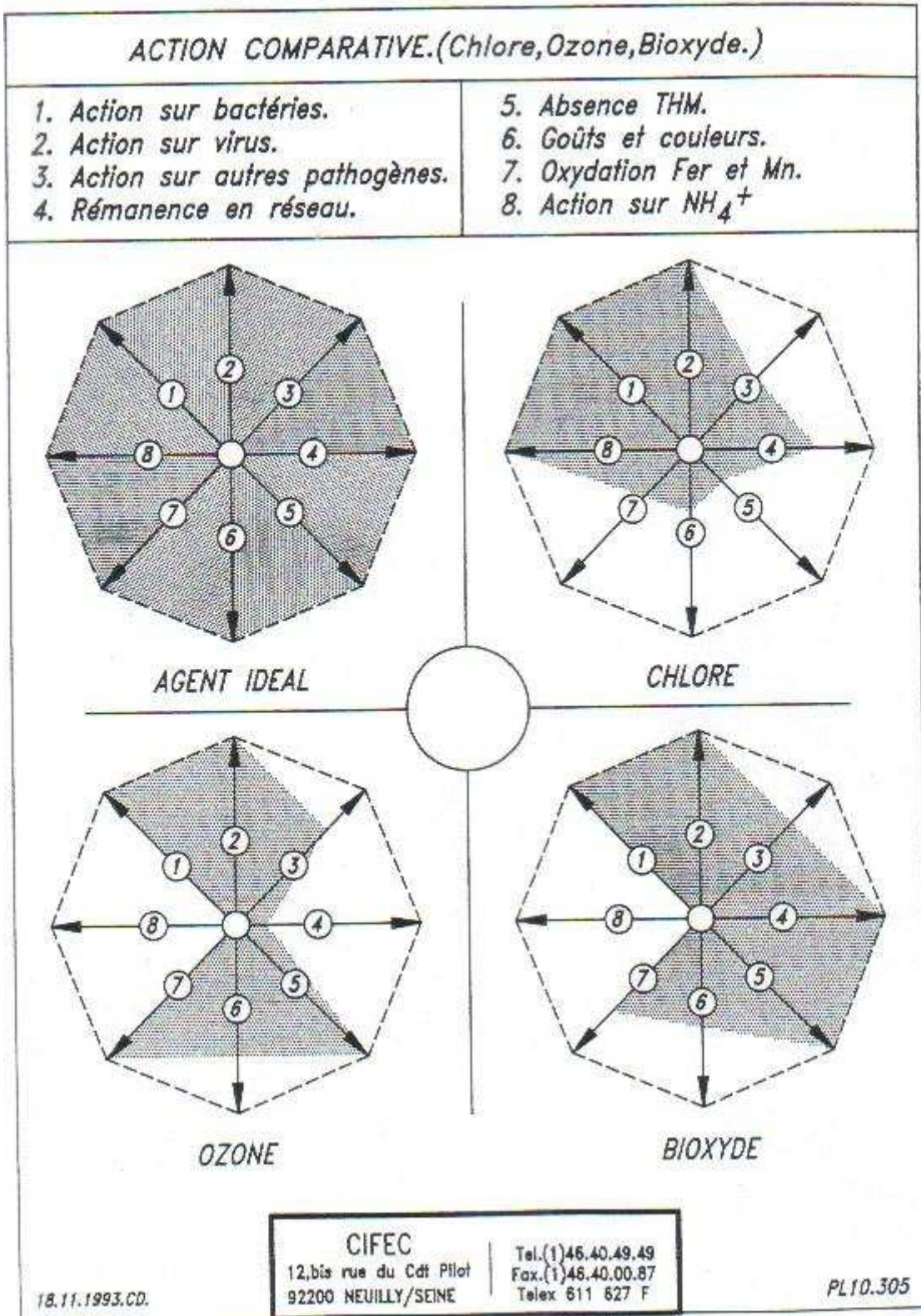


Fig. 15. Action comparative d'oxydants.

II.1.4. EMMAGASINAGE D'EAU BRUTE

L'emmagasinement d'eau brute présente un intérêt dans le cas où il peut se produire des sécheresses prolongées ou des pollutions accidentelles.

On dispose toujours ainsi de réserves qui seront utilisées tant que le retour à la normale n'aura pas lieu.

Au cours du stockage, on observe en général :

- une diminution des MES ;
- une augmentation du plancton ;
- un affaiblissement de NH_4^+ par nitrification ;
- un développement des algues et des champignons ;
- l'apparition de goûts et d'odeurs.

L'élimination de ces derniers nécessite des traitements particuliers et, en général, coûteux.

D'autre part, compte tenu de la surface mobilisée, il n'est guère envisageable de créer de telles réserves en milieu urbain.

II.2. COAGULATION ET FLOCCULATION

L'un des problèmes majeurs posés par le traitement des eaux de consommation, réside dans l'élimination des particules, minérales ou organiques, qui sont à l'origine de la turbidité et de la couleur de ces eaux. En effet, étant donné

- l'extrême petitesse des particules concernées,
- leur caractère en général colloïdal ...
- ... la vitesse de décantation de ces éléments indésirables est très faible, sinon nulle.

La décantabilité étant directement liée à la taille des particules, plus les particules seront volumineuses, plus leur décantation sera aisée.

L'objectif de la coagulation/floculation est d'obtenir à partir d'éléments individualisés dont la taille ne permet pas qu'ils décantent convenablement, des agrégats de plus en plus volumineux, dont le terme ultime est un "floc" facilement décantable.

Ce résultat est en général obtenu en deux phases :

- la phase de coagulation : au cours de celle-ci, les forces de répulsion qui existent naturellement entre les particules du fait de leurs charges de même signe, seront annihilées.
- la phase de floculation : durant cette dernière, les particules déchargées par le phénomène précédent seront regroupées, il en résultera des associations sous forme de flocons.

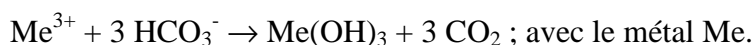
II.2.1. COAGULATION

Les colloïdes qui se trouvent dans les eaux naturelles sont en général de même signe et chargés négativement.

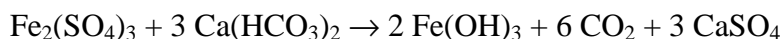
Cette similitude entraîne l'existence de forces répulsives qui empêchent l'association des particules ; il en résulte un système extrêmement stable qu'il convient donc de « déstabiliser ».

II.2.1.1. EQUATION GLOBALE DE LA COAGULATION

L'introduction d'un coagulant dans une eau naturelle généralement bicarbonatée calcique entraîne la réaction chimique suivante :



Soit pour le fer :



L'apparition d'acide carbonique ($\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$), au détriment de l'alcalinité, conduit à une diminution du pH, et cette valeur peut ne plus être optimum pour la formation des hydrocomplexes. Aussi est-il nécessaire de contrôler le pH afin que la coagulation puisse s'effectuer dans de bonnes conditions. En général, on sera amené à ajouter une base. Le plus souvent, il s'agira du lait de chaux.

II.2.1.2. FACTEURS DE LA COAGULATION

Divers facteurs sont susceptibles de modifier le processus de la coagulation. Aussi, en vue d'optimiser les résultats de celle-ci, convient-il de les prendre en compte.

Par ailleurs, dans l'état actuel des connaissances, aucune approche théorique ne permet de prévoir les doses optimales de réactif à utiliser. Seuls des tests de coagulation effectués avec l'eau à traiter permettront de définir les taux de produits de traitement à mettre en œuvre.

II.2.1.2.1. pH

Il est certainement le facteur le plus important à prendre en considération dans le domaine de la coagulation. L'expérience montre que pour chaque eau, existe une plage de pH pour laquelle la coagulation est optimale. Cette plage est non seulement fonction de la qualité de l'eau mais encore du coagulant utilisé.

II.2.1.2.2. Nature des particules

La coagulation des colloïdes d'origine organique (acides humiques, par exemple) exige des doses élevées de coagulant, approximativement proportionnelles à leurs concentrations. Tandis que les colloïdes minéraux sont déstabilisés par de faibles doses de coagulant, sans rapport à priori avec leurs concentrations.

II.2.1.2.3. Turbidité

Lorsque la turbidité est très élevée, la quantité de coagulant à utiliser est relativement faible ; ce qui s'explique par le fait que la probabilité de collision entre les particules est plus élevée. Par contre, lorsque la turbidité est faible, la coagulation présente des difficultés.

II.2.1.2.4. Température

Comme toute réaction chimique, la coagulation est accélérée par une élévation de température. Ce qui constitue un facteur favorable pour les pays tropicaux où les opérations sont plus rapides que dans les pays froids ou tempérés.

II.2.1.2.5. Minéralisation

Les sels dissous dans l'eau ont des influences diverses sur la coagulation ; c'est ainsi qu'ils peuvent modifier la plage optimale de pH, la quantité de coagulant à utiliser, le temps de réaction, etc. On a par ailleurs remarqué que le résiduel de coagulant dans les eaux traitées pouvait varier avec l'importance de la minéralisation.

II.2.1.2.6. Mode d'introduction des réactifs

L'expérience a montré qu'il est indispensable d'effectuer le mélange Eau à traiter/réactif, en deux étapes. Au cours de la première phase, on procède à un mélange énergique afin que la dispersion du

réactif au sein de l'eau à traiter soit rapide. La phase d'agitation rapide dure environ 1 minute, celle d'agitation lente au moins 10.

II.2.1.2.7. Choix du réactif et dose à utiliser

Les facteurs qui interviennent pour fixer le choix du produit de traitement et en déterminer la dose optimum à utiliser sont :

- les caractéristiques de l'eau brute,
- les modifications saisonnières de la qualité de l'eau,
- la nature des traitements ultérieurs,
- les inconvénients inhérents au produit choisi (délicatesse de la mise en œuvre, risque lié à la sécurité du manipulateur...)

II.2.1.2.8. Réactifs de la coagulation

Les réactifs employés en coagulation s'utilisent dans une plage de pH précise souvent déterminée par la solubilité de l'ion métallique Me^{3+} .

- **Sels de fer**

- **Chlorure ferrique**

Taux d'utilisation : 5 à 150 g/m³ de FeCl₃·H₂O ; pH d'utilisation : 4 à 11.

- **Sulfate ferreux**

Taux d'utilisation : 10 à 100 g/m³ de FeSO₄·7H₂O commercial + O₂, à pH 8 ; pH d'utilisation : 5 à 6.

Le sulfate ferreux exige une oxygénation pour être mis sous sa forme la plus active, Fe³⁺, à pH 8, en présence d'oxygène de l'air : $4 FeCl_3 + O_2 + 2 H_2O \xrightarrow{pH=8} 4 Fe(OH)_3$.

- **Association sulfate ferreux et chlore**

Taux d'utilisation : 10 à 100 g/m³ de FeSO₄·7H₂O commercial + 12%Cl₂ ; pH d'utilisation : 5 à 8,5 .

Le produit est introduit dans l'eau à traiter en même temps qu'on y injecte du chlore, à raison de 12% de la masse de sulfate ferreux commercial. On peut également oxyder le sulfate par le chlore avant son introduction. Dans ce cas, on obtient un mélange improprement appelé « chorosulfate ferrique ».

- **Sels d'aluminium**

- **Sulfate d'alumine**

Taux d'utilisation : 10 à 150 g/m³ de Al₂(SO₄)₃·18H₂O commercial solide (à 17% Al₂O₃) ; pH d'utilisation : 5,5 à 8 ;

– **Polymères d'aluminium**

- Polyhydroxychlorures d'aluminium (type PCBA) ;
- Polyhydroxychlorosilicates d'aluminium (type HERPIFLOC),
- Polyhydroxychlorosulfates d'aluminium (type WAC) ;
- Polyhydroxychlorures mixtes (type PAC-10, PAC-18...).

Les propriétés de ces produits sont réputées remarquables.

• **Coagulants organiques de synthèse**

- les épichlorhydrines d'éthylamines (EPIDMA),
- les mélaminesformaldéhydes ou mélamine formol,
- les polychlorures de diallyldiméthyl-ammonium (POLYDADMAC)...

Les coagulants organiques de synthèse ne sont qu'à leur début d'utilisation dans le domaine du traitement de l'eau potable et leur utilisation est soumise à la réglementation.

II.2.2. FLOCCULATION

La floculation a pour but de favoriser la réunion des particules en vue de la formation d'un floc aisément décantable. Pour qu'il en soit ainsi, la floculation doit accroître :

- le volume
- le poids
- la cohésion ...

... des amas formés par les particules.



Fig. 16. Représentation schématique de la formation de floc.

II.2.2.1. ETUDE THEORIQUE DE LA FLOCCULATION

De nombreuses hypothèses ont été proposées pour expliquer la floculation. Actuellement, selon H. Chevolet, on admet la prédominance de deux phénomènes liés au transport des particules au sein de la solution : la floculation péricinétique et la floculation orthocinétique.

Elles se distinguent l'une de l'autre par l'origine des mouvements de déplacement auxquels sont soumises les particules dans la solution.

II.2.2.1.1. Floculation péricinétique

La floculation péricinétique est liée à la diffusion brownienne qui est essentiellement provoquée par l'agitation thermique.

Les mouvements des particules sont alors parfaitement aléatoires. La vitesse de floculation, c'est-à-dire le nombre de particules qui disparaissent pour s'agglomérer par unité de temps, peut s'écrire :

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{4a}{3\eta} kTd^3 \text{ avec :}$$

N : nombre de particules par m^3

a : fraction des chocs efficaces

k : constante de BOLTZMANN ($1,38.10^{-23}$)

T : température absolue

η : viscosité dynamique (Pa.sec).

Ce type de floculation n'intervient que pour de petites particules dont la taille est inférieure à 1 micron.

La floculation péricinétique favorise par ailleurs la formation de microfloc.

II.2.2.1.2. Floculation orthocinétique

La floculation orthocinétique fait appel à l'énergie dissipée par l'agitation de l'eau. Cette agitation facilite l'agrégation des particules en favorisant la probabilité des rencontres. La vitesse du fluide variant dans l'espace et dans le temps, il s'établit un gradient de vitesse G . La vitesse de la floculation est alors donnée par la relation

$$\frac{dN}{dt} = -k.G.N^2.d^3 \text{ avec } d, \text{ diamètre de la particule.}$$

En pratique, on préfère, à cette expression, des formules empiriques. Toutefois, elle permet de voir l'influence de chaque paramètre :

- d^3 : une taille importante de particule favorisera la floculation
- N^2 : en augmentant le nombre de particules en présence, on favorisera la floculation, à l'exemple de l'usage de lits de boues.
- G : pour un système donné (d et N), le nombre de contacts est déterminé par G .

Pour des petites particules, la valeur de G doit être élevée, donc l'agitation doit être énergique. Par contre, si l'on a affaire à des particules de taille plus importante, une agitation relativement faible est suffisante.

D'une façon générale, il n'est pas souhaitable, même quand la théorie semble le justifier, d'augmenter inconsidérément la valeur de G . En effet, pour des valeurs trop élevées, le floc risque de subir un cisaillement allant à l'inverse du but recherché.

Valeurs pratiques du gradient de vitesse :

- Coagulation (dispersion du réactif, polymérisation, déstabilisation des particules) : nécessite un fort gradient pendant un laps de temps restreint : $G = 300$ à 600 s^{-1} , pendant quelques minutes.
- Floculation (formation des floes) : gradient optimal permettant un diamètre maximal et le plus de contact possible : $G = 30$ à 60 s^{-1} pendant 15 à 30 minutes. On utilise également en

dimensionnement la valeur du produit « $G \cdot \tau$ » recommandée entre 10^4 et 10^5 , τ étant le temps de séjour.

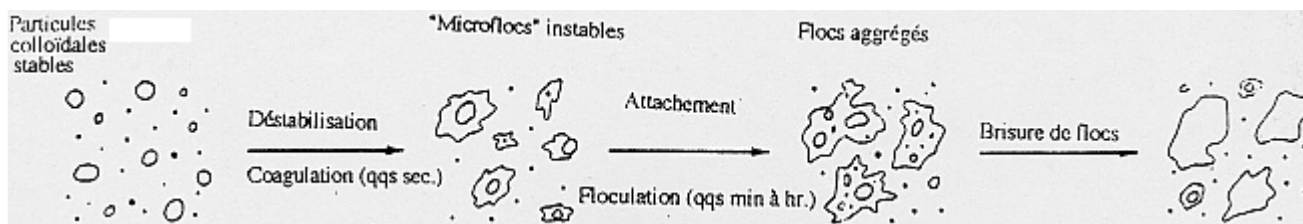


Fig. 17. Représentation schématique du processus de coagulation/floculation.

II.2.3. REACTIFS DE FLOCCULATION

On appelle flocculants, ou encore adjuvants de flocculation, les produits qui facilitent la formation des agrégats plus ou moins individualisés présents dans l'eau, après la phase de coagulation.

Les flocculants se distinguent les uns des autres par :

- leur nature : minérale ou organique ;
- leur origine : naturelle ou synthétique ;
- leur charge : négative, nulle ou positive.

II.2.3.1. FLOCCULANTS MINÉRAUX

Ce sont les plus anciens et sans doute les plus connus.

II.2.3.1.1. Silice activée

Associé au sulfate d'alumine comme coagulant, la silice activée donne d'excellents résultats.

Taux d'utilisation : 5% de celui du sulfate d'alumine (solution de SiO_2 préalablement activée avec du H_2SO_4) ; pH d'utilisation : 7 (ou légèrement inférieur à 7).

II.2.3.1.2. Autres flocculants minéraux

On peut citer : certaines argiles, le bentonite, le kaolin, des algues siliceuses, le carbonate de calcium précipité, le charbon actif en poudre, etc.

Le charbon actif en poudre intervient également comme adsorbant.

II.2.3.2. FLOCCULANTS ORGANIQUES

Il s'agit d'une façon générale de polyélectrolytes, qui peuvent être naturels ou synthétiques.

II.2.3.2.1. Polyélectrolytes naturels

- **Les alginates**

D'origine algale marine, les alginates ont leurs masses molaires de l'ordre de 10^4 à 10^5 . Ils ont l'avantage d'être autorisés dans presque tous les pays, pour le traitement des eaux de consommation. Associés aux sels ferriques, ils donnent de très bons résultats pour des doses d'utilisation allant de 0,5 à 2 mg/L.

- **L'amidon**

Obtenu à partir du manioc, de la pomme de terre et autres tubercules, l'amidon est un polyside utilisé en traitement des eaux de consommation aux doses de 1 à 10 mg/L.

II.2.3.2.2. Polyélectrolytes synthétiques

Il s'agit de macromolécules à longues chaînes obtenues par l'association de monomères eux-mêmes synthétiques et dont la masse molaire peut atteindre 10^7 .

Ces produits présentent cependant un certain nombre d'inconvénients :

- leur prix est élevé ;
- on ne connaît pas leur éventuelle toxicité.

Aussi, leur utilisation en traitement des eaux de consommation est-elle très limitée et soumise à autorisation.

La classification de ces produits se fait, en général, à partir du caractère anionique ou cationique du polymère :

- flocculants anioniques : copolymères de l'acrylamide et de l'acide acrylique ;
- flocculants cationiques : copolymères de l'acrylamide mais associés soit avec du méthacrylate soit un acrylate ;
- flocculants neutres : polymères de type polyacrylamides.

II.2.4. MISE EN OEUVRE DE LA COAGULATION FLOCCULATION

La mise en œuvre des diverses opérations de coagulation/flocculation implique :

- le choix des produits,
- la connaissance des doses optimales,
- le respect de certaines précautions dans le déroulement des opérations.

II.2.4.1. CHOIX DES REACTIFS

Aucune règle ne permet de prévoir à priori le coagulant et le floculant qui donneront les meilleurs résultats. Si l'expérience a montré que certaines associations coagulants/floculants, conduisaient à de bons résultats, aucune théorie n'est venue en expliquer la raison.

Seules les études conduites en laboratoire pourront déterminer quels sont les produits les mieux adaptés à une situation donnée.

II.2.4.2. MOMENT D'INTRODUCTION DES REACTIFS

L'introduction des réactifs, qu'il s'agisse du coagulant ou du floculant ne peut se faire à un moment quelconque.

D'une façon générale, la coagulation doit précéder la floculation, et ce n'est que lorsque la coagulation aura atteint une certaine maturité que l'on pourra ajouter le floculant. On s'exposerait à de graves déboires si l'on ne tenait pas compte de ce facteur important.

Le temps optimum au bout duquel il convient d'ajouter les adjuvants ne peut être défini que par des essais de laboratoire.

II.2.4.3. AGITATION

La coagulation exige, comme indiqué plus haut, un brassage énergique de l'eau afin d'homogénéiser le plus rapidement possible le mélange.

Différents systèmes adaptés permettent d'obtenir ce résultat ; ce sont :

- hélicoïde,
- diaphragme,
- chicanes,
- chambre de mélanges munie d'une turbine.

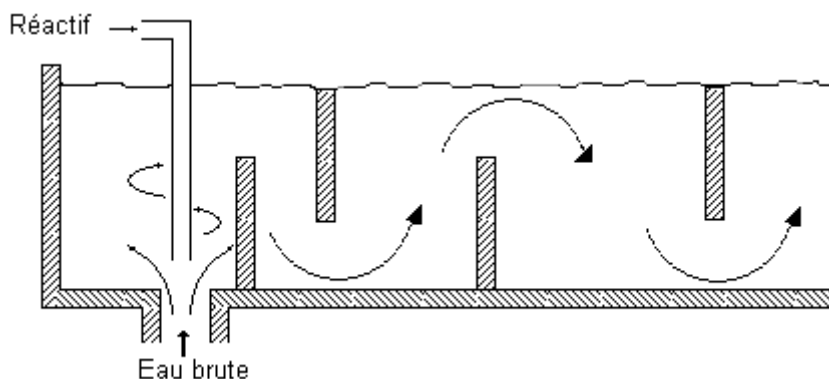


Fig. 18. Schéma de système d'agitation à chicanes.

S'agissant de la floculation, une agitation trop intense conduirait à la rupture mécanique des flocons et s'opposerait à la formation du floc lui-même. On retrouve là, en quelque sorte, ce qui ressortait de l'étude théorique de la floculation en ce qui concerne le gradient de vitesse G , lequel ne devait pas avoir une valeur trop élevée.

L'agitation est cependant nécessaire, car là aussi il faut :

- homogénéiser le mélange,
- faciliter les rencontres entre particules,
- éviter le dépôt du floc qui n'est pas encore complètement formé.

On procède donc par une agitation modérée qui constitue un compromis entre les diverses nécessités.

La floculation est effectuée dans des bassins munis de systèmes d'agitation à vitesse variable.

Durant la deuxième étape, on effectue une agitation lente qui a pour objectif de favoriser les contacts entre toutes les particules présentes, celles du floc déjà constitué, des grains de précipités, des colloïdes.

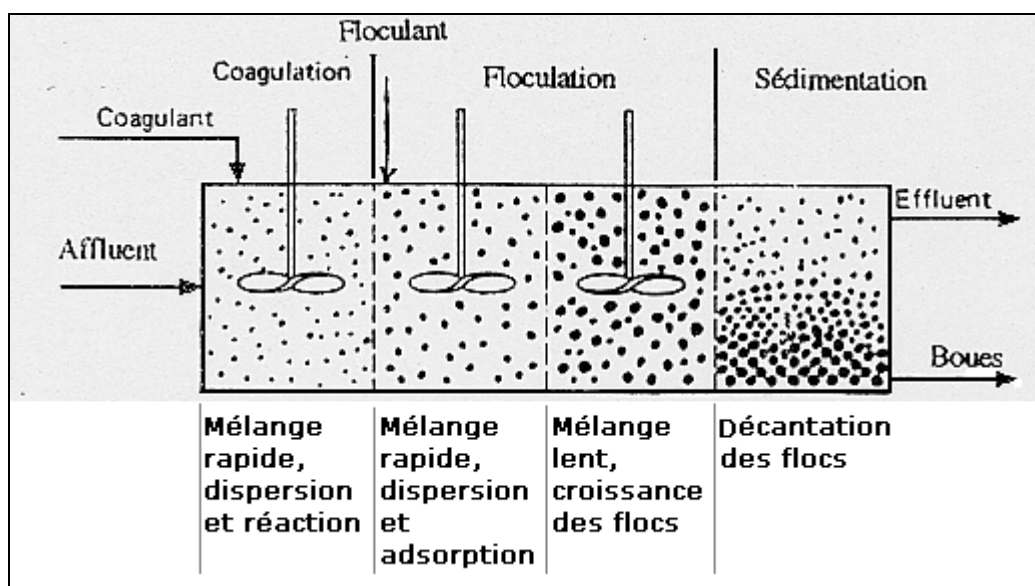


Fig. 19. Schématisation de la coagulation-floculation à la station.

II.2.5. CONTROLE DES OPERATIONS

Comme cela a été dit tout au long de chapitre, ce n'est que par les résultats obtenus au laboratoire qu'il sera possible de déterminer les conditions de mise en œuvre d'un traitement de coagulation floculation.

Les tests effectués au laboratoire porte sur :

- le choix des produits de traitement ;
- les doses qu'il convient d'utiliser ;
- les conditions opératoires.

Les moyens dont disposent les chimistes pour atteindre ces objectifs reposent essentiellement sur le Jar-test.

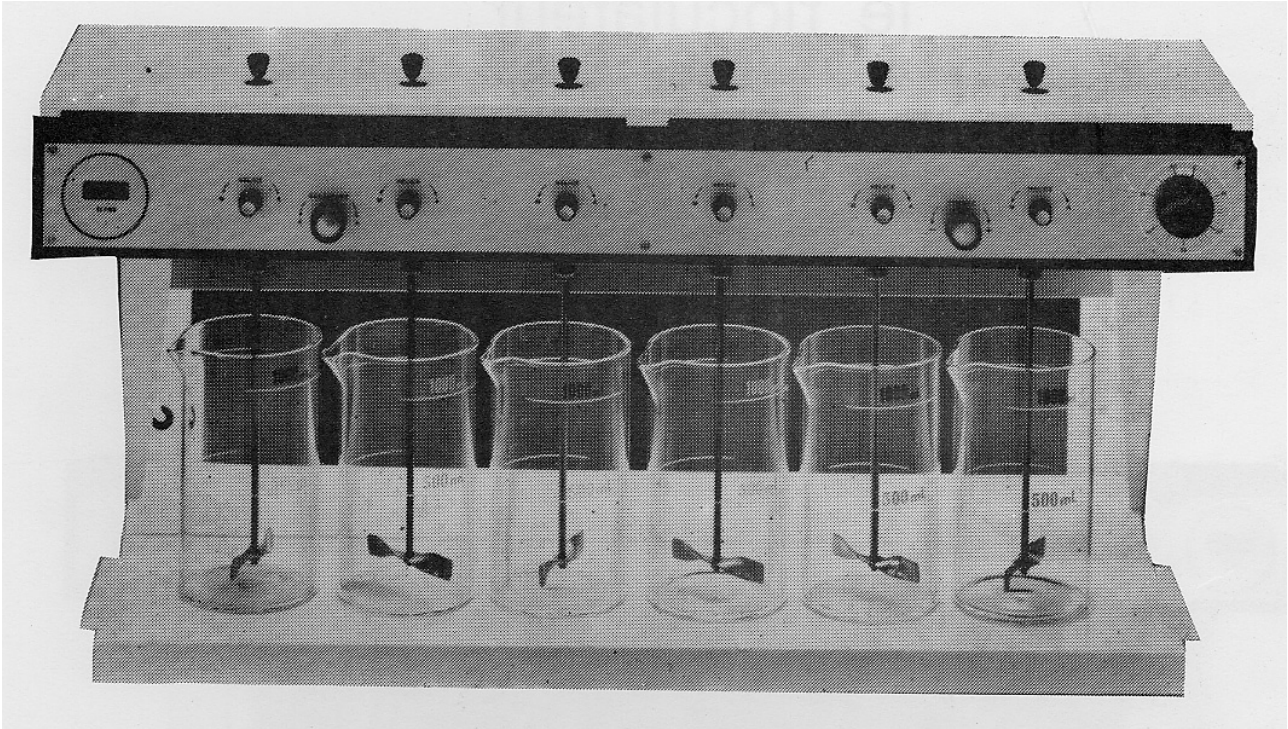


Fig. 20. Photo du Jar-test.

D'utilisation universelle, le Jar-test est un appareil de conception extrêmement simple. Il est constitué par un micro-floculateur à chambres multiples, des béchers de 1 litre, dans lesquels on introduit l'eau à traiter et les réactifs.

Pour un même réactif, dont la concentration varie d'un bécher à l'autre, on procède à des tests de floculation dans des conditions identiques, notamment en ce qui concerne l'agitation.

On peut ainsi effectuer toute une série d'essais, en modifiant la nature du réactif, les doses utilisées, les conditions opératoires, pH essentiellement.

Les observations visuelles concernant la formation et la cohésion du floc permettront de déterminer le traitement le plus adapté à une eau donnée (Fig. 21).

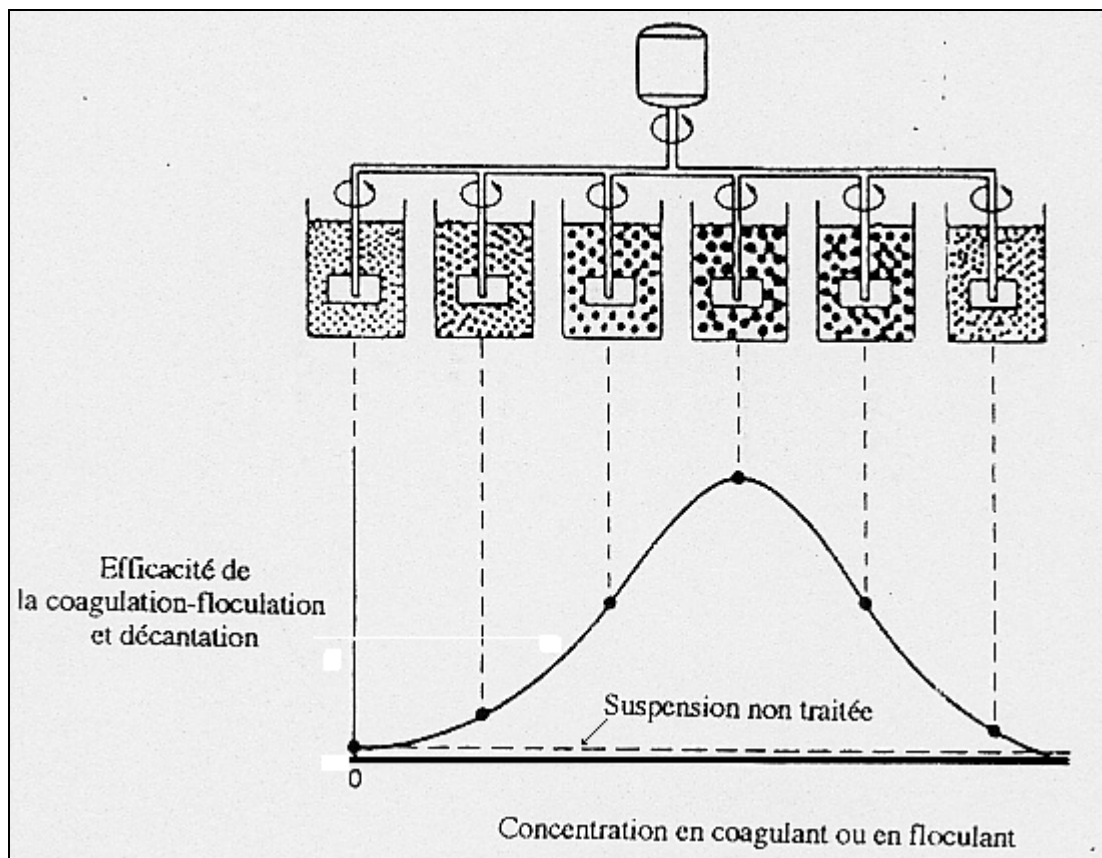


Fig. 21. Schéma du principe du Jar-test.

D'une façon générale, on procède de la façon suivante :

Le réactif est introduit dans les béchers et l'on procède à une agitation courte mais très rapide (1 à 3 min), suivie d'une autre plus longue et d'intensité modérée (12 à 15 min).

Une phase de repos, dans laquelle les floes formés sédimentent, succède à cette seconde agitation.

La durée de l'essai est d'une vingtaine de minutes et l'opérateur notera les renseignements suivants :

- délai d'apparition des floes ;
- vitesse de grossissement de ces derniers ;
- vitesse de sédimentation ;
- aspect général du floe : pas de floe, floe à peine décelable, petit floe, floe moyen, bon floe, très gros floe ;
- valeur de la turbidité ;
- coloration ;
- teneurs en matières organiques ;
- dureté et alcalinité résiduelles ;
- mesure spécifique au traitement : Fe^{2+} , Al^{3+} ...
- pH.

Ces mesures sont effectuées

- soit à partir de prélèvements effectués dans la partie supérieure des récipients ;
- soit après filtration sur papier filtre.

II.3. DECANTATION

II.3.1. ETUDE THEORIQUE DE LA DECANTATION

II.3.1.1. ETUDE DE LA DECANTATION LIBRE

La décantation libre concerne les particules grenues. Elle peut s'interpréter à partir de diverses théories qui font intervenir :

- soit la formule de STOCKES
- soit celle de NEWTON.

II.3.1.1.1. Théorie basée sur la formule de STOCKES

Sous l'action de la gravité, une particule immergée dans un liquide est soumise à un déplacement vertical dont la vitesse atteint une valeur limite, lorsque le poids de la particule est équilibré par les forces antagonistes qui s'opposent à son déplacement, à savoir :

- la poussée d'Archimède
- les forces de frottement.

Exprimons les forces en présence.

- **Poids de la particule, F_p**

$$F_p = m \cdot g$$

Soit en assimilant la particule à une sphère de rayon r

$$F_p = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_p g . \quad \rho_p, \text{ densité de la particule.} \quad (1)$$

- **Poussée d'Archimède, F_a**

$$F_a = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_e g . \quad \rho_e, \text{ densité de l'eau.} \quad (2)$$

- **Forces de frottement, F_f**

$$F_f = 6 \pi \eta r v \quad \eta, \text{ viscosité dynamique ; } v, \text{ vitesse d'écoulement.} \quad (3)$$

Lorsque $F_p = F_a + F_f$, la vitesse v atteinte par la particule est telle que :

$$F_p = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_p g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_e g + 6 \pi \eta r v$$

$$\Rightarrow \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_p - \rho_e) g = 6 \pi \eta r v$$

Dans ce cas, v atteint la vitesse limite de la particule : $v = \frac{2}{9} \frac{r^2 \Delta \rho}{\eta} g$. Expression que l'on écrit souvent sous la forme de : $v = \frac{1}{18} D^2 \frac{\Delta \rho}{\eta} g$. (4)

Cette formule est valable dans les limites de l'hypothèse de STOCKES :

- régime laminaire
- particules sphériques
- absence de coalescence
- force de frottement, F_f , supposée proportionnelle à la vitesse de chute, c'est-à-dire qu'il n'y a ni action des molécules les unes sur les autres ni effet de paroi.

II.3.1.1.2. Théorie basée sur la formule de NEWTON

- **Cas général**

On considère que les particules, au cours de leur déplacement, sont soumises à la force de traînée F_t définie par la formule de NEWTON :

$$F_t = C \frac{S}{2} \rho_e v^2 \quad (5)$$

C , coefficient de traînée ;
 S , section droite de la particule.

La force de traînée F_t s'interprète comme étant la résultante des forces de pesanteur et de celle d'Archimède.

Cette résultante s'écrit : $F_t = F_p - F_a$.

Donc $\frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_p - \rho_e) g = C \frac{S}{2} \rho_e v^2$.

En remplaçant S par πr^2 et en posant $D = 2 r$, on obtient : $v^2 = \frac{4}{3} \frac{D \Delta \rho}{C \rho_e} g$. (6)

Le coefficient de traînée C est relié au nombre de Reynolds Re par : $C = \frac{b}{(Re)^n}$; (7)

- b dépend de l'écoulement ;
- n est un coefficient empirique et dépend du régime hydraulique.

Comme $Re = \rho_e \frac{v D}{\eta}$, on en déduit $C = b \frac{\eta^n}{(\rho_e)^n v^n D^n}$.

Portons cette valeur dans (6).

$$v^2 = \frac{4}{3} \frac{D \Delta \rho}{\rho_e} g \frac{(\rho_e)^n v^n D^n}{b \eta^n}$$

D'où $v^{(2-n)} = \frac{4}{3} \frac{D^{(1+n)} \Delta \rho}{(\rho_e)^{(1-n)} b \eta^n} g$. (8)

Cette relation est valable pour tous les types d'écoulement ; il suffit de connaître Re , n , b .

Les unités utilisées sont les suivantes :

- D en mètre ;
- η en poiseuille ;
- ρ en kg.m^{-3} ;
- g en m.sec^{-2} ;
- ν en m.sec^{-1} .

• **Écoulement laminaire**

Encore appelé « écoulement de STOCKES » et valable pour : $10^{-4} < \text{Re} < 1$; $n = 1$; $b = 24$; $D < 100 \mu\text{m}$.

On a, dans ce cas, alors :
$$\nu = \frac{1}{18} D^2 \frac{\Delta\rho}{\eta} g \tag{9}$$

• **Écoulement turbulent**

Encore appelé « écoulement de NEWTON » et valable pour : $200 < \text{Re} < 10^5$; $n = 0$; $b=0,4$; $D > 1 \text{ mm}$.

D'où
$$\nu^2 = \frac{10}{18} \frac{D \Delta\rho}{\rho_e} g \tag{10}$$

• **Régime intermédiaire**

Encore appelé « écoulement de HAZEN » et valable pour : $1 < \text{Re} < 200$; $n = 0,6$; $b = 18,5$; $100 \mu\text{m} < D < 1 \text{ mm}$.

D'où
$$\nu^{(1,4)} = \frac{4}{55,5} \frac{D^{(1,6)} \Delta\rho}{(\rho_e)^{(0,4)} \eta^{(0,6)}} g \tag{11}$$

• **Corrections à apporter**

Les formules précédentes sont applicables à des particules sphériques. Il est donc nécessaire d'apporter des corrections, lorsque cette condition n'est pas remplie. Aussi a-t-on introduit un indice dit « indice de sphéricité, Ψ » qui représente le rapport entre le volume de la sphère de même surface totale que le grain considéré et le volume du grain lui-même.

Le terme $C = \frac{b}{(\text{Re})^n}$ devient $C' = \frac{b}{(\text{Re})^n} \Psi \tag{12}$

Les valeurs de Ψ , compte tenu de la forme des particules, sont données dans le tableau suivant :

Particules	Ψ	Particules	Ψ
Sable	2	Lamelle de graphite	22
Charbon	2,25	Lamelle de mica	170
Talc	3,25	Gypse	4

II.3.1.1.3. Bassin de décantation idéal

Considérons maintenant un bassin de décantation idéal (cf. Fig. 22).

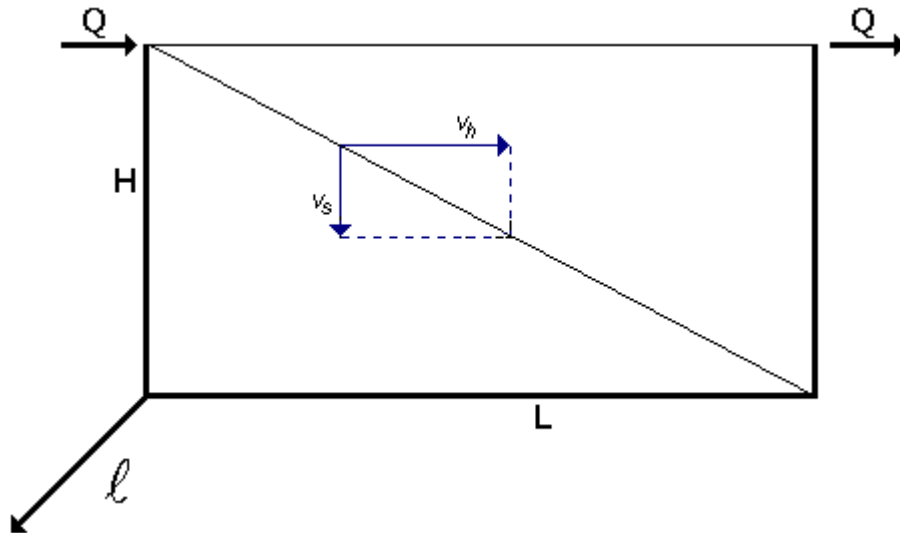


Fig. 22. Bassin de décantation idéal.

Dans un tel bassin, les paramètres en sont les suivants :

- Q, débit d'eau dans le décanteur
- ℓ , largeur
- L, longueur
- H, hauteur d'introduction du flux à décantier
- v_h , vitesse horizontale des particules entraînées par le flux
- v_v , vitesse verticale ou de chute des particules
- S_r , surface transversale du décanteur ($\ell \times H$)
- S_h , surface horizontale du décanteur ($\ell \times L$).

Nous considérons que les vitesses sont constantes. Ce qui implique :

- un débit Q constant
- une décantation de type libre.

- **Calcul de la vitesse minimum de chute**

Soit une particule pénétrant dans la zone de décantation à un niveau h quelconque.

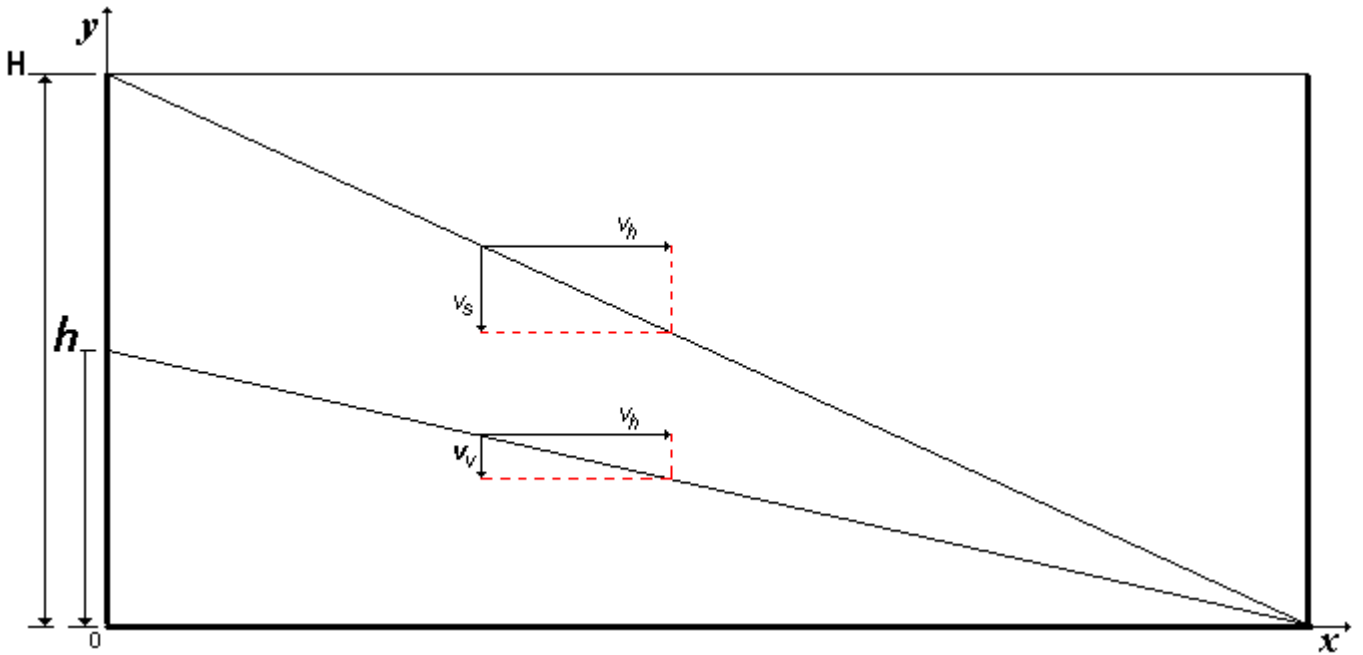


Fig. 23.

On peut écrire $Q = v_h \cdot S_t \Rightarrow v_h = \frac{Q}{S_t}$.

Puisque $S_t = \ell \cdot H$, alors $v_h = \frac{Q}{\ell \cdot H}$.

Appelons x , l'axe horizontal.

Au temps t_1 , on a : $x = v_h \cdot t_1$.

Soit $x = \frac{Q}{\ell \cdot H} t_1$.

Appelons y , l'axe vertical.

Au temps t_1 , on a : $y = -v_v \cdot t_1 + h$.

Soit t , le temps mis par la particule pour parcourir le bassin dans le sens horizontal, L , la longueur du bassin. On peut écrire : $L = v_h \cdot t = \frac{Q}{\ell \cdot H} t$.

$$\text{D'où } t = \frac{L \ell H}{Q} \tag{13}$$

Ce temps t représente celui dont dispose la particule pour atteindre le fond et donc être décantée.

Lorsque la particule est décantée, $y = 0$ et l'on peut écrire : $0 = -v_v \cdot t + h$. Soit $t = \frac{h}{v_v}$.

En comparant les deux expressions de t , on a : $\frac{L \ell H}{Q} = \frac{h}{v_v}$.

$$\text{D'où } v_v = \frac{h \cdot Q}{L \cdot \ell \cdot H} \tag{14}$$

• **Vitesse de surverse**

Cette vitesse v_v est celle que doit avoir au minimum la particule entrée au niveau h pour être retenue dans le décanteur. On l'appelle, en général, v_s , vitesse de surverse pour une entrée à la hauteur (limite) H.

Donc toutes les particules pour lesquelles $v_v > v_s$ seront retenues.

Celles dont la vitesse $v_v < v_s$ ne seront retenues que si elles pénètrent à un niveau inférieur (par exemple, $\frac{1}{2}H$ sur la Fig. 24).

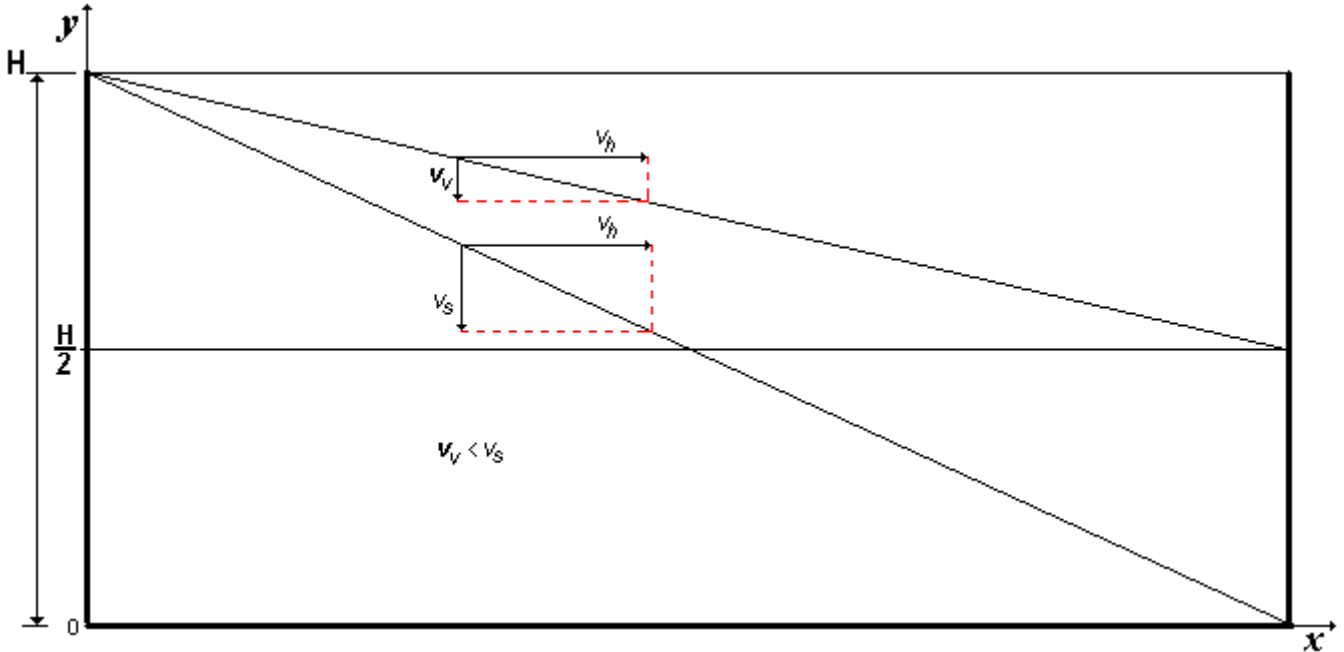


Fig. 24.

• **Rendement du décanteur**

– **Cas des particules animées de la même vitesse de chute**

Considérons une particule qui pénètre dans le décanteur au niveau de la surface libre.

Ce niveau correspond à la hauteur H du bassin.

Si du fait de vitesse horizontale, la particule met le temps t_0 pour parcourir la longueur L du bassin, ce temps t_0 est celui maximum dont elle dispose pour atteindre le fond.

On a donc :

$$H = v_s t_0$$

v_s , vitesse de surverse, représente la vitesse de sédimentation de la particule qui, entrée au niveau H, décante dans le temps t_0 .

$$t_0 = \frac{H}{v_s} .$$

Si on considère maintenant une autre particule pénétrant dans le décanteur au niveau h, cette particule dispose également du temps t_0 pour rejoindre le fond du bassin, et sa vitesse v_v est telle que :

$$t_0 = \frac{h}{v_v}$$

En comparant les deux expressions de t_0 , il vient :

$$\frac{h}{H} = \frac{v_v}{v_s}$$

D'où

$$v_v = v_s \frac{h}{H}$$

donc si une particule pénètre à un niveau quelconque dans le décanteur, elle sera retenue à la condition que :

$$v_v > v_s \frac{h}{H}$$

Si $v_v = v_s$, toutes les particules pénétrant à un niveau quelconque seront décantées.

La fraction f (%) des particules animées d'une vitesse v_v , et qui décanteront, sera telle que :

$$f = \frac{v_v}{v_s} \cdot 100$$

Il est possible d'exprimer f (%) en fonction de certaines caractéristiques géométriques du bassin.

Nous avons toujours : $t_0 = \frac{H}{v_s}$

mais également $t_0 = \frac{L}{v_h}$

En comparant les deux expressions, il vient : $v_s = \frac{H}{L} v_h$

Multiplions le numérateur et le dénominateur par ℓ : $v_s = \frac{H \cdot \ell}{L \cdot \ell} v_h$

Or $H \cdot \ell \cdot v_h = Q$

$$L \cdot \ell = S_h$$

D'où $v_s = \frac{Q}{S_h}$

La fraction décantée $f = \frac{v_v}{v_s}$ peut donc s'écrire :

$$f = v_v \frac{S_h}{Q} \quad (18)$$

Cette équation permet de calculer le rendement d'un bassin de décantation, en ce qui concerne les particules dont la vitesse de chute v_v est la même.

– Cas des particules animées de vitesses de chute différentes

Considérons maintenant un décanteur dans lequel sont introduites des particules dont la vitesse de chute v_v n'est pas identique.

Ce décanteur travaille dans des conditions de débit telles que sa vitesse de surverse v_s est bien définie.

Nous rappelons que v_s est la vitesse minimum de chute que doit avoir la particule qui pénètre en surface, pour atteindre le fond du décanteur durant le temps où elle séjourne dans celui-ci.

On a vu que :

$$v_s = \frac{Q}{S_h}$$

Toutes les particules ayant une $v_v > v_s$ seront bien évidemment éliminées, celles qui ont une vitesse de chute $v_v < v_s$ le seront cependant en partie, compte tenu de leur niveau d'entrée dans le décanteur.

Le tracé expérimental de la fonction $f_{nd} = f(v_v)$ en posant « f_{nd} , fraction de particules non décantées », permet de déterminer la fraction totale, f_d , des particules qui seront décantées, quelle que soit leur vitesse de chute.

– **Tracé expérimental de $f_{nd} = f(v_v)$**

On fait chuter dans une colonne de 2 m de haut, des particules grenues, en provenance des eaux brutes à traiter. On laisse la décantation se faire, et à des instants réguliers, on prélève des échantillons au fond de la colonne.

Le rapport du poids de MES déposées, à celui des MES totales introduites dans la colonne, permet d'établir la fraction des particules décantées et celles des particules non décantées.

Si

- m_o , quantité de MES introduite dans la colonne ;
- m_d , quantité de MES déposée, au temps t ;
- m_{nd} , quantité de MES non déposée;

on a

- fraction déposée, $f_d = \frac{m_d}{m_o}$
- fraction non déposée, $f_{nd} = 1 - \frac{m_d}{m_o} \dots$

... v_v s'obtient en faisant : $v_v = \frac{H}{t}$, H étant la hauteur de la colonne.

On dresse le tableau de valeurs suivantes :

t	t_1	t_2	t_3	etc..
f_{nd}				
v_v				

On peut alors tracer la courbe $f_{nd} = f(v(t))$. Cf. Fig. 25.

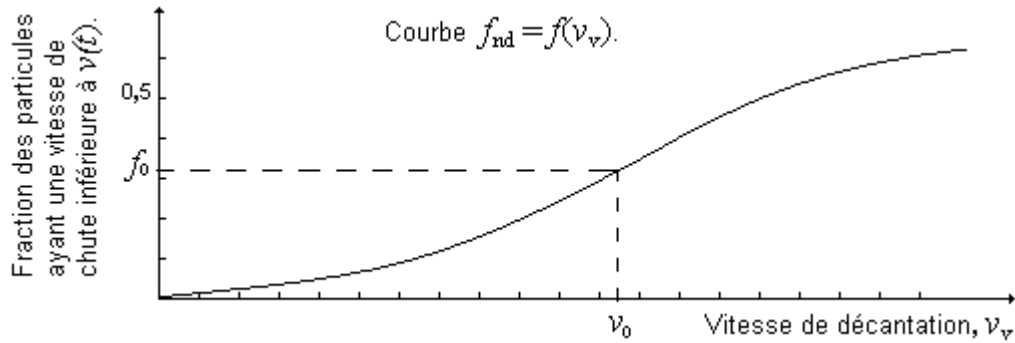


Fig. 25. Courbe $f_{nd} = f(v(t))$.

– Expression du rendement

Pour un décanteur dont la vitesse de surverse est v_s , on montre que le rendement R s'exprime par :

$$R = (1 - f_0) + \frac{1}{v_s} \int_0^{f_0} v_v df$$

avec

- f_0 fraction des particules ayant une $v_v < v_s$.
- $\frac{1}{v_s} \int_0^{f_0} v_v df$ terme qui rend compte des particules appartenant à la catégorie f_0 et ont décanté, compte tenu de leur niveau d'entrée h .

En effet, ces particules seront éliminées, si leur vitesse v_v est telle que : $v_v = v_s \frac{h}{H}$.

L'expression $\int (v_v df)$ se calcule par intégration graphique et correspond à la surface hachurée de la courbe de la Fig. 26.

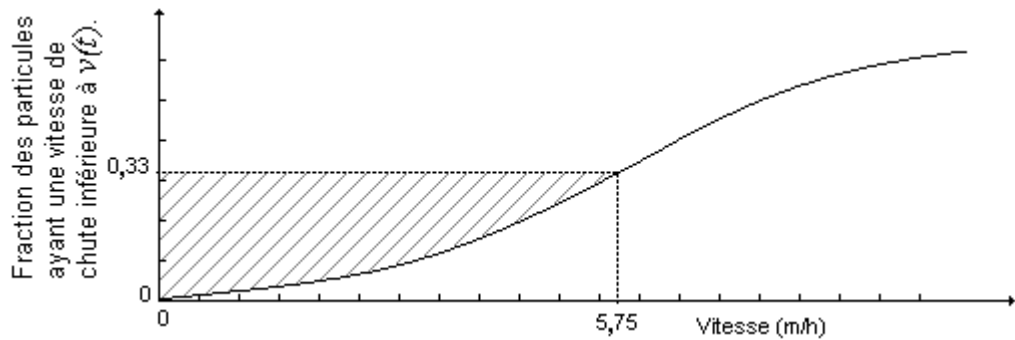


Fig. 26.

II.3.1.2. ETUDE DE LA DECANTATION DIFFUSE

II.3.1.2.1. Principe

Durant leur chute, les particules colloïdales s'agglomèrent les unes aux autres. Il en résulte deux conséquences aux effets opposés :

- la taille des amas formés s'accroît au fur et à mesure de leur déplacement. Ce qui est facteur favorable pour la décantation puisque la vitesse de celle-ci est d'autant plus élevée que le volume de particules est important;
- cependant, cette augmentation de volume est accompagnée d'une diminution de la densité et ce phénomène contrarie la décantation.

Enfin de compte, la particule sera soumise à la résultante de ces deux effets antagonistes et l'augmentation de la taille des particules l'emportera sur la diminution de la densité.

Dans un bassin à flux hydraulique horizontal, la trajectoire des particules, du fait de l'accélération qu'elles subissent, sera curviligne.

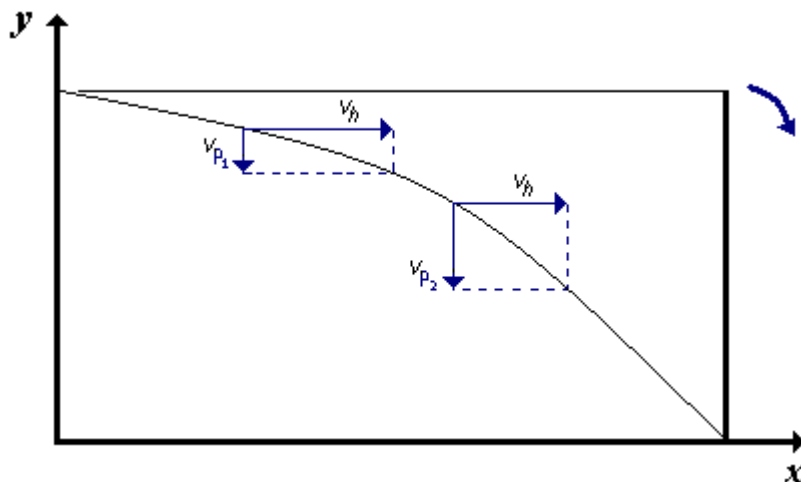


Fig. 27. Trajectoire d'une particule dans une décantation diffuse.

Il n'existe pas de formulation mathématique permettant de calculer les vitesses de décantation comme dans le cas des particules grenues. Seuls des essais de laboratoire permettent de tracer les courbes d'élimination des particules, en fonction

- de leur niveau d'entrée
- du temps ...

... dans le cas des colloïdes.

II.3.1.2.2. Procédure expérimentale

On simule la décantation des particules dans une colonne de 2,4 m de haut et on s'impose un certain pourcentage d'élimination constant pour des hauteurs de chute différentes. Ce qui correspond à des temps bien évidemment différents eux aussi.

Exemple : on désire obtenir une élimination de 30% de particules initialement présentes.

On introduit l'eau à traiter au niveau 60 cm et la laisse décanter jusqu'à ce que 30% de la concentration initiale des particules se soient déposées.

On note alors le temps t_{60} .

On reprend l'expérience en partant du niveau 120 cm et on note le temps t_{120} qui correspond à celui nécessaire pour déposer également 30% de la concentration initiale.

On fait de même pour les autres niveaux, 180, 240 et on relève les temps respectifs t_{180} , t_{240} .

On trace alors la courbe d'élimination 30%.

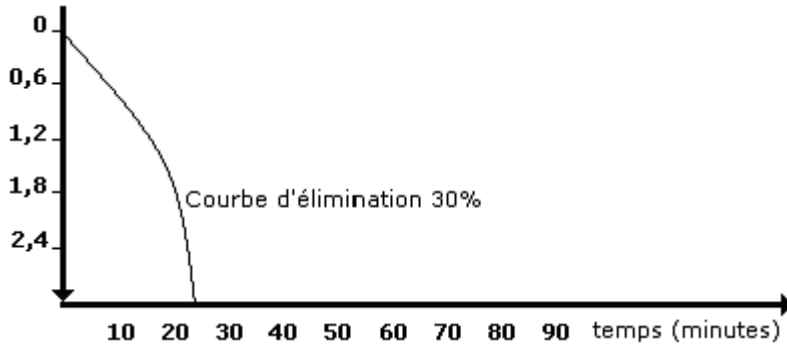


Fig. 28. Courbe d'élimination de particules décantables pour un pourcentage donné.

Ces opérations sont reconduites pour 40, 50, 60%, etc. ... d'élimination et l'ensemble des courbes obtenues permet de construire le diagramme suivant :

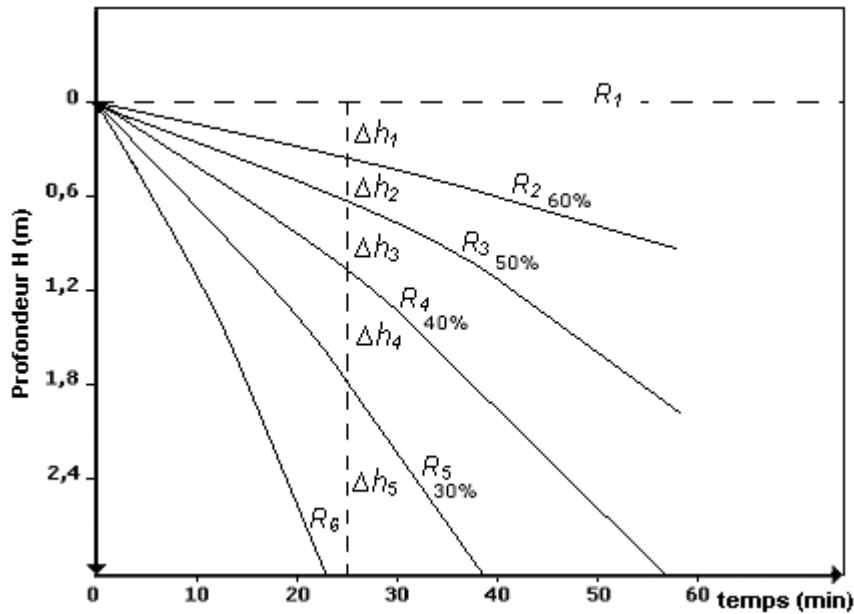


Fig. 29. Courbe d'équi-élimination de particules décantables.

II.3.1.2.3. Utilisation du diagramme

Ce diagramme d'expérimentation permet de déterminer :

- le rendement du décanteur pour un pourcentage d'élimination voulu
- le temps de séjour requis
- la vitesse v_v nécessaire.

- **Calcul du rendement**

Le rendement du décanteur est obtenu en appliquant :

$$R\% = \frac{\Delta h_1 (R_1 + R_2)}{H} + \frac{\Delta h_2 (R_2 + R_3)}{H} + \dots + \frac{\Delta h_n (R_n + R_{n+1})}{H}, \text{ avec} \quad (20)$$

- R , pourcentage total de particules éliminées dans un bassin de décantation idéal (rendement) ;
- $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$, pourcentages de particules éliminées dans un bassin de décantation idéal, à une profondeur h , et après un temps de rétention t ;
- $\Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_3, \dots, \Delta h_n$, hauteurs moyennes entre deux courbes de même pourcentage d'élimination des particules ;

- H, hauteur de la colonne.

- **Calcul du temps de séjour**

Le temps de séjour est celui des particules qui pénètrent au plus haut niveau. On le lit directement sur le diagramme, là où les courbes d'équi-élimination coupent l'axe des temps.

- **Calcul de la vitesse de surverse**

Pour chaque % d'élimination désiré, la vitesse de surverse est telle que : $v_v = \frac{H}{t}$.

Si on l'exprime en heures, on aura : $v_v = \frac{H}{t \text{ (en mn)}} \times 60$.

A partir de ces divers résultats, on peut établir le diagramme du rendement du décanteur.

- **Diagramme du rendement**

On construit la courbe R% en fonction de v_v et à partir de ce diagramme, on peut reconnaître la vitesse v_v nécessaire pour obtenir un rendement donné (cf. Fig. 30).

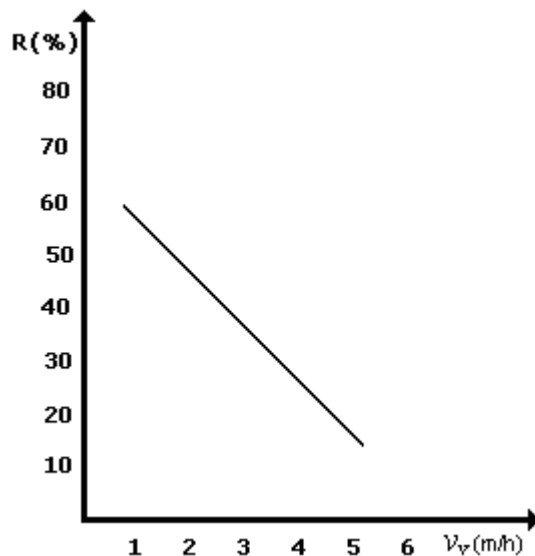


Fig. 30. Rendement en fonction de v_v .

II.3.1.3. ETUDE DE LA DECANTATION FREINEE

La décantation freinée, dite « en piston », a fait l'objet d'une théorie largement acceptée, celle de KYNCH.

II.3.1.3.1. Théorie de KYNCH

L'hypothèse fondamentale est que la vitesse de décantation dépend uniquement de la concentration locale C en particules.

Quand on réalise une décantation à partir d'une suspension relativement concentrée ($> 500 \text{ mg/L}$ de MES) dans une colonne de hauteur et de diamètre suffisants, et que l'on mesure la hauteur de la couche supérieure du floc en fonction du temps, on obtient une courbe de ce type :

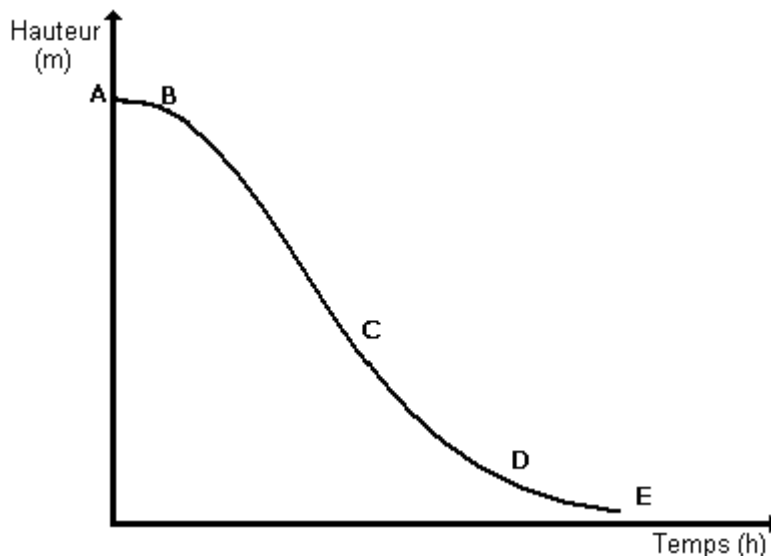


Fig. 31. Courbe de vitesse de chute de particules, dans une décantation freinée.

Considérons les divers segments de cette courbe :

- **A-B.** La surface de séparation est plus ou moins nette ; elle correspond à la phase de coalescence des floes. Il peut arriver que des phénomènes d'ordre cinétique rendent cette phase inexistante.
- **B-C.** On a un segment rectiligne important qui traduit une vitesse de chute constante v_0 . Cette vitesse est fonction inverse de la concentration initiale de la suspension. Si on prend pour exemple une boue activée qui relève du traitement des eaux usées, on constate que lorsque la concentration passe de 1 à 4 g/L, la vitesse diminue de 6 à 1,8 m/h.
- **C-D.** Ce tronçon présente une concavité orientée vers le haut et correspond à un ralentissement progressif de la vitesse de chute de la couche supérieure du floc.
- **D-E.** A partir de D, les floes se touchent et exercent une compression sur les couches inférieures.

II.3.1.3.2. Résultats pratiques

Ce sont les segments B-C et C-D qui sont intéressants dans la théorie de KYNCH. Ils correspondent aux cas rencontrés dans les décanteurs statiques à lits de boues.

Considérons le cas d'une décantation freinée où la phase de coalescence est absente.

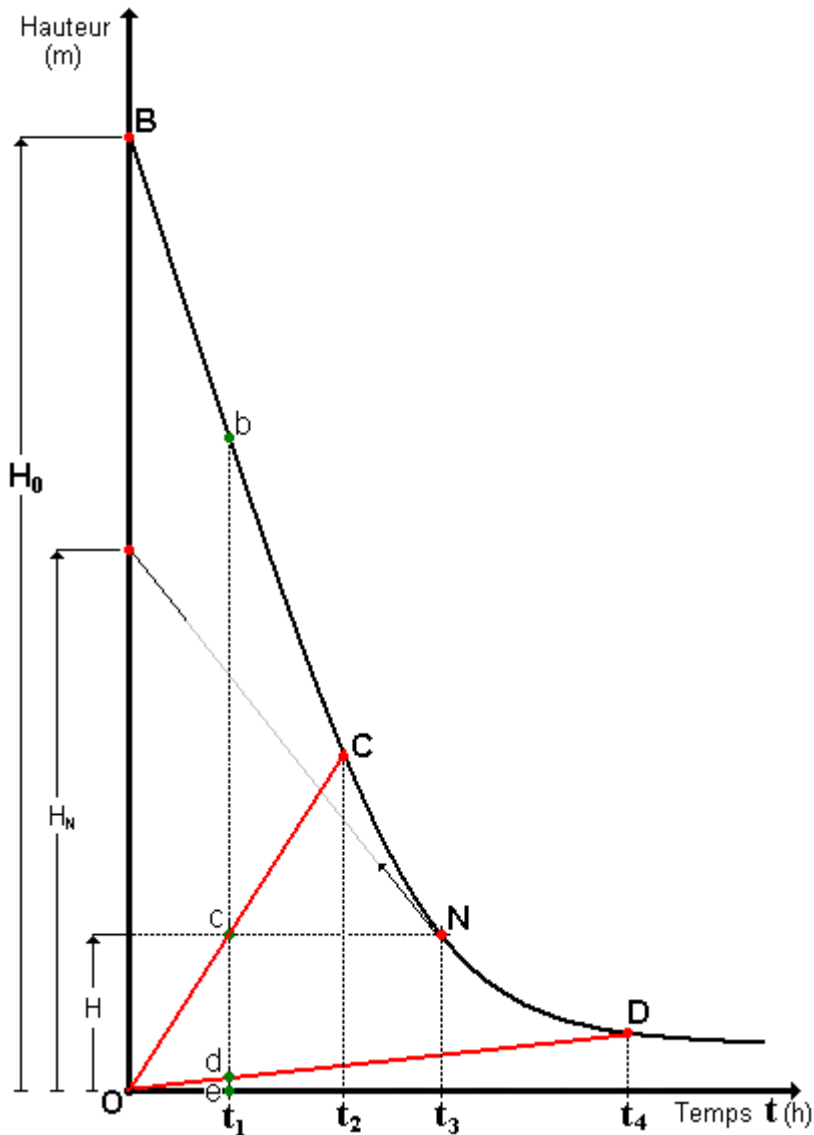


Fig. 32. *Décantation freinée sans phase de coalescence.*

Dans le triangle BOC, la concentration et la vitesse de chute sont constantes et correspondent aux conditions initiales régnant en B.

Dans le triangle COD, les courbes de même concentration sont des droites passant par l'origine et la concentration croît au fur et à mesure que l'on se rapproche du point D ; les diverses couches sont donc appelées à se toucher de plus en plus pour en arriver à provoquer un phénomène de compression qui se manifeste en D.

Il est donc possible, grâce à la courbe précédente de connaître la composition du milieu boueux à divers instants.

- **Instant t_1**

La composition du milieu en fonction du niveau auquel on se déplace est donnée par la verticale élevée en t_1 :

- b-c, vitesse de chute constante, composition constante (conditions initiales) ;
- c-d, vitesse de chute décroissante, composition décroissante ;

– d-e, phénomène de compression, concentration maximum.

- **Instant t_2**

La zone supérieure a disparu.

- **Instant t_3**

Il ne subsiste plus que la zone inférieure.

La concentration en un point N quelconque de C-D se détermine en traçant la tangente au point considéré qui coupe l'axe des ordonnées en H_N .

On a à l'interface : $C_N = \frac{H_0}{H_N}$

La vitesse de décantation est donnée par :

$v_N = \frac{dH}{H_N}$; c'est-à-dire par la pente de la tangente N_{H-N}

Corrélativement à la concentration initiale C_0 , la concentration moyenne, C_H , de la boue sur toute la hauteur H sera : $C_H = C_0 \frac{H_0}{H}$. (21)

Les trois parties, BC, CD et DE, de la courbe de KYNCH (Fig. 32) trouvent leur application dans le calcul des ouvrages en sédimentation freinée :

- la phase BC correspond au domaine des décanteurs à contact de boue ;
- la phase CD est relative aux ouvrages dans lesquels une concentration de la boue est recherchée (appareils à recirculation de boue épaissies) ;
- la phase DE est exploitée pour l'épaississement des boues.

II.3.1.3.3. Détermination de la vitesse de surverse

La détermination de la vitesse de surverse nécessite des mesures expérimentales.

On procède de la façon suivante : une colonne de verre est remplie du mélange eau à traiter, coagulant et floculant. On y observe le déplacement de l'interface et on note la hauteur de ce dernier en fonction du temps. Les résultats sont alors portés dans un tableau à partir duquel on établit la courbe de KYNCH (Fig. 33).

t (min)	t ₀	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄
H (m)	H ₀	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄

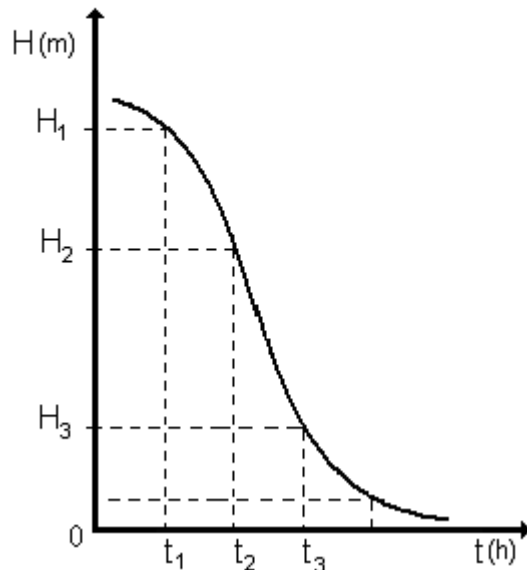


Fig. 33. Courbe de KYNCH.

Si on appelle C₁, C₂, C₃, etc., les concentrations moyennes des boues lorsque l'interface se trouve respectivement aux niveaux H₁, H₂, H₃, etc., on a toujours : C₀.H₀ = C_n.H_n

Le décanteur dispose d'une surface S pour traiter les boues qui arrivent par minute. La quantité de ces boues est liée au débit et à la concentration et peut s'écrire : Q₀.C₀

La colonne a pour caractéristiques :

- s (petit s) surface
- H₀ hauteur.

En un temps t, elle traite une quantité de boues C₀ H₀ s .

Si l'on veut comparer le « travail » de la colonne à celui du décanteur, il est nécessaire d'utiliser des temps identiques.

Les surfaces S et s doivent être telles que : $\frac{S}{s} = \frac{Q_0 \cdot C_0 \cdot t}{C_0 \cdot H_0 \cdot s}$.

D'où l'on tire $S = \frac{Q_0 \cdot t}{H_0}$. (22)

Soit $\frac{Q_0}{S} = \frac{H_0}{t}$. (23)

II.3.1.3.4. Bilan matière

Si l'on considère les flux de matières (Fig. 34) dans un décanteur, on peut établir le bilan qui suit.

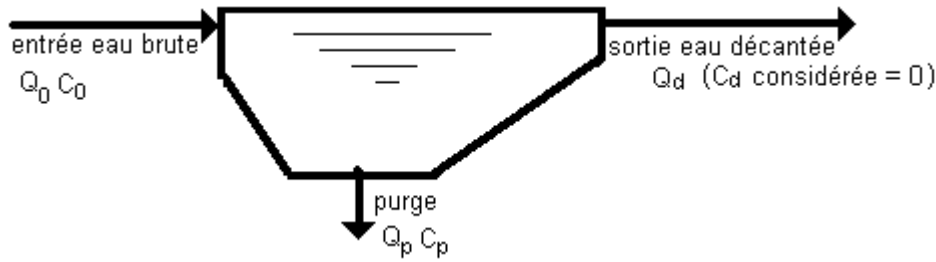


Fig. 34. Sens des flux de matières dans un décanteur.

On a
$$\begin{cases} Q_0 = Q_d + Q_p \\ Q_0 \cdot C_0 = Q_p \cdot C_p \end{cases} \text{ . Soit } \frac{C_0}{C_p} = \frac{Q_p}{Q_0} \text{ .}$$

En considérant $\frac{C_0}{C_p} = \frac{H_p}{H_0} = \frac{Q_p}{Q_0}$, il vient $Q_p = Q_0 \cdot \frac{H_p}{H_0}$.

La vitesse de surverse étant, par définition, $v_s = \frac{Q_d}{S}$,

on obtient en substituant S :
$$v_s = \frac{H_0 - H_p}{t} \text{ .} \tag{24}$$

• **Exploitation**

- H_0 correspond à la hauteur de l'interface, lorsque l'on se situe au temps $t = 0$.
- H_p correspond à la hauteur de l'interface, pour $t = t_p$, temps au bout duquel la concentration de la boue est celle souhaitée pour la purge.

A partir du tableau des essais donnant $H = f(t)$, on peut déduire t puisque que l'on connaît H (H_p). On peut donc ainsi calculer v_s la vitesse de surverse.

• **Charge matière**

Elle s'exprime en kg de MES par m² de surface horizontale du décanteur par heure (ou par jour) et représente de ce fait, la quantité de MES dans le décanteur.

Précisons qu'un décanteur n'est pas une simple cuve dans laquelle les boues vont se déposer, mais un ensemble relativement complexe comprenant divers éléments et dispositifs annexés à l'unité principale : trémies à boues, collecteur d'eau décantée, racleur de boues, systèmes d'extraction automatique de boues.

Dans le cas de la décantation libre ou diffuse, on fait appel essentiellement à la vitesse de surverse pour dimensionner les ouvrages, alors que dans celui de la décantation freinée, c'est à la charge matière C_m que l'on a généralement recours.

$$C_m = \text{kg de MES/m}^2/\text{jour.} \tag{25}$$

En comparant $v_s = \frac{Q_d}{S}$ à v_s donnée par (24), on obtient :
$$\frac{Q_0}{S} = \frac{H_0 - H_t}{t} \text{ .}$$

Appelons Q_j le débit journalier en m³ et S la surface du décanteur. Si nous voulons ramener les calculs au jour puisque C_m utilise cette unité, nous devons écrire :

$$\frac{Q_j}{S} = \frac{H_0 - H_t}{t} \times 1440 \quad (1 \text{ jour} = 1440 \text{ mn}).$$

Q_j/S représente le volume d'eau qui est pris en compte chaque jour par m^2 de surface.

La concentration de l'eau brute en MES étant C_0 en g/L, la quantité totale des MES présentes dans ce volume représente la charge matière. On écrira :

$$C_m = \frac{Q_j}{S} \cdot C_0 \cdot 10^3 .$$

$$\text{Soit } C_m = (1,44 \times 10^6) \frac{H_0 - H_t}{t} \times C_0 . \quad (26)$$

II.3.2. DIVERS TYPES DE DECANTEURS

II.3.2.1. DECANTEURS STATIQUES

Les décanteurs statiques sont ceux qui n'utilisent pas les boues déjà formés dans les processus de décantation (voir Fig. 35). Ce type de décanteur est en général précédé d'une chambre de mélange où l'on assure une diffusion rapide des réactifs, et d'un flocculateur à brassage lent pour favoriser la floculation.

II.3.2.1.1. Décanteur statique à flux horizontal

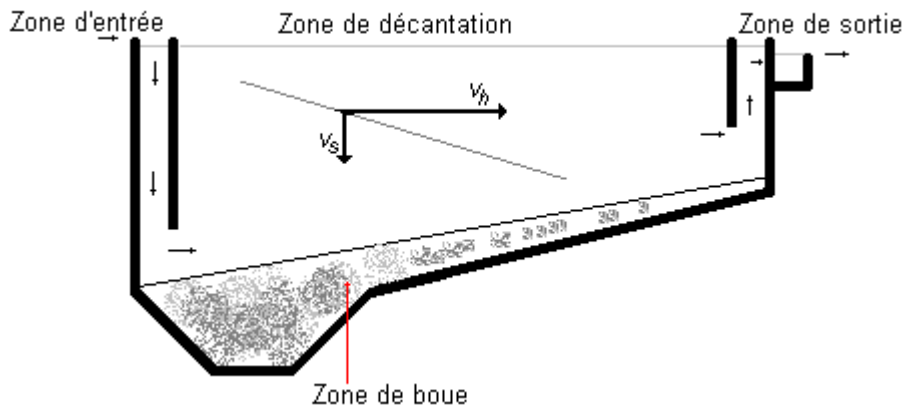


Fig. 35. Schéma du décanteur statique à flux horizontal.

- **Entrée du décanteur**

Elle doit être conçue d'une façon telle que l'énergie de l'eau d'arrivée soit dissipée, et que le flux puisse être distribué uniformément dans le bassin. La vitesse d'entrée doit être inférieure à 0,3 mm/sec.

L'arrivée de l'eau dans le bassin de décantation proprement dit se fait en général de l'une des deux façons suivantes :

- le flux arrive sous une paroi plongeante et débouche ainsi dans le bassin ;

– le flux pénètre dans le décanteur par l'intermédiaire d'orifices pratiqués dans la paroi.

- **Zone de décantation**

Dans cette zone, les filets liquides doivent rester aussi parallèles que possible ; ce qui implique qu'il n'y ait aucun élément perturbateur, vent, soleil, tourbillons.

La zone de décantation constitue la partie utile du décanteur et se caractérise par sa longueur L, sa largeur l, sa hauteur H.

- **Zone de sortie**

De même que pour l'entrée de l'eau, la sortie de celle-ci doit s'effectuer avec un minimum de turbulences afin d'éviter la remise en suspension et l'entraînement des particules déjà déposées.

Des goulottes, des déversoirs en V peuvent être utilisés.

Les matières flottantes qui peuvent se manifester à la surface du décanteur sont éliminées par une paroi plongeante juste avant la reprise de l'eau.

Le débit maximum d'un décanteur est de 8 à 15 m³/h par m de déversoir.

- **Zone des boues**

Les boues qui se forment progressivement au fur et à mesure de la sédimentation doivent être évacuées régulièrement car leur accumulation finirait par modifier la hauteur de décantation et nuirait au rendement du bassin.

D'autre part la stagnation de ces boues conduirait à la manifestation de réactions anaérobies.

Le volume utile de cette zone varie avec le mode d'évacuation de ces dernières, intermittent ou continu, leur charge et leur consistance.

Un volume utile de 25% du volume total est un minimum.

- **Extraction des boues**

Les boues sont rassemblées dans une trémie ; une pente d'au moins 1 % est ménagée pour le radier.

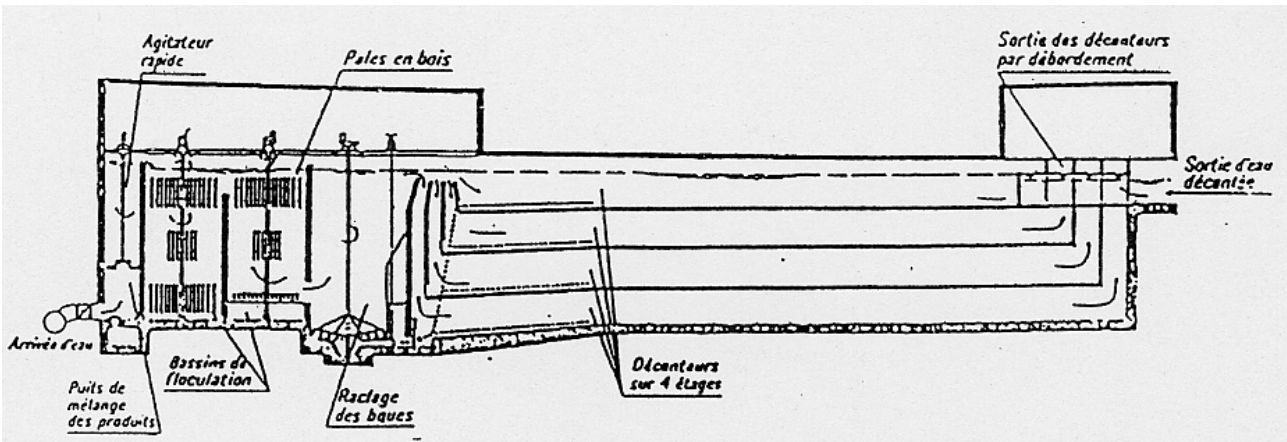
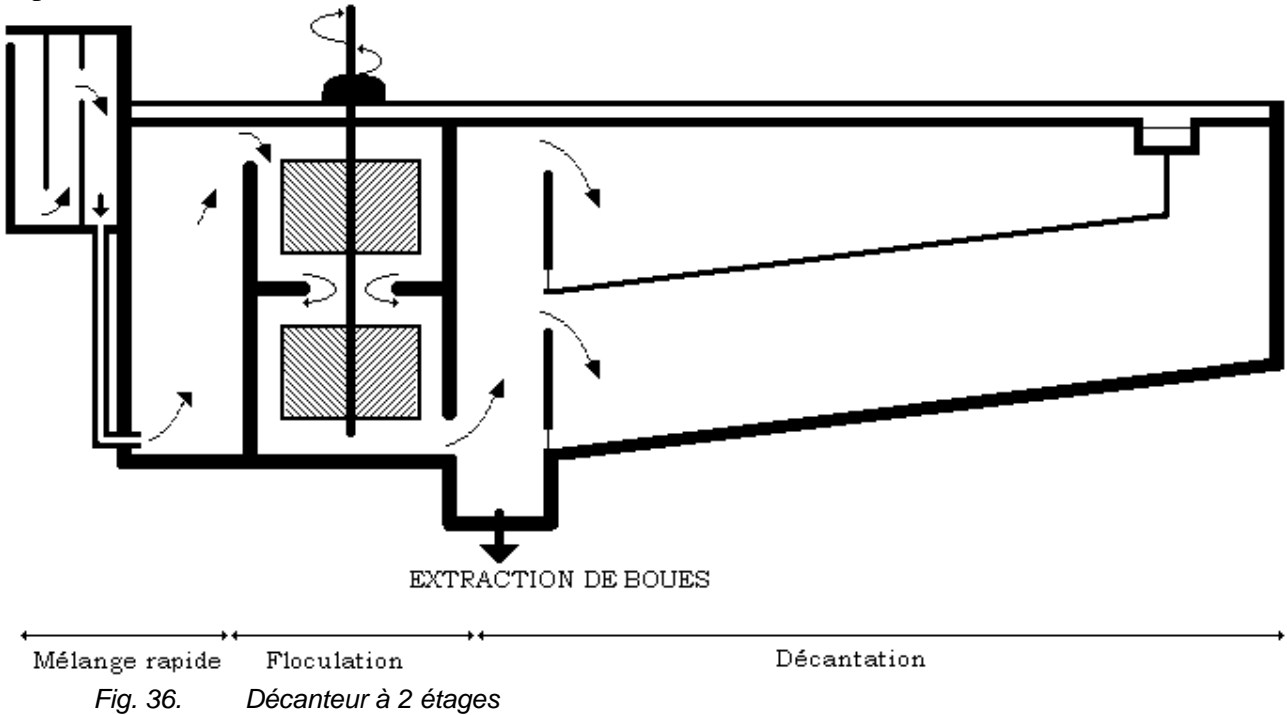
Des racleurs motorisés sont utilisés pour amener les boues vers la trémie. Ces racleurs peuvent être de différents types. Il peut s'agir entre autres de racleurs à pont qui se déplacent longitudinalement, ou de racleurs à chaînes sans fin immergées. L'évacuation des boues se fait par simple ouverture d'une vanne qui débouche sur un caniveau, ou par l'intermédiaire d'une pompe à boues.

Précisons que le temps de séjour de l'eau dans le décanteur est de l'ordre de 1 à 4 h.

II.3.2.1.2. Décanteur à étages

Dans un décanteur à un seul niveau, il n'y a que les particules dont la vitesse de chute est égale ou supérieure à v_s qui peuvent être totalement éliminés.

L'idée est donc venue d'interposer plusieurs paliers dans le décanteur de telle sorte que les particules aient moins de chemin à parcourir pour atteindre la surface sur laquelle elles pourront se déposer.



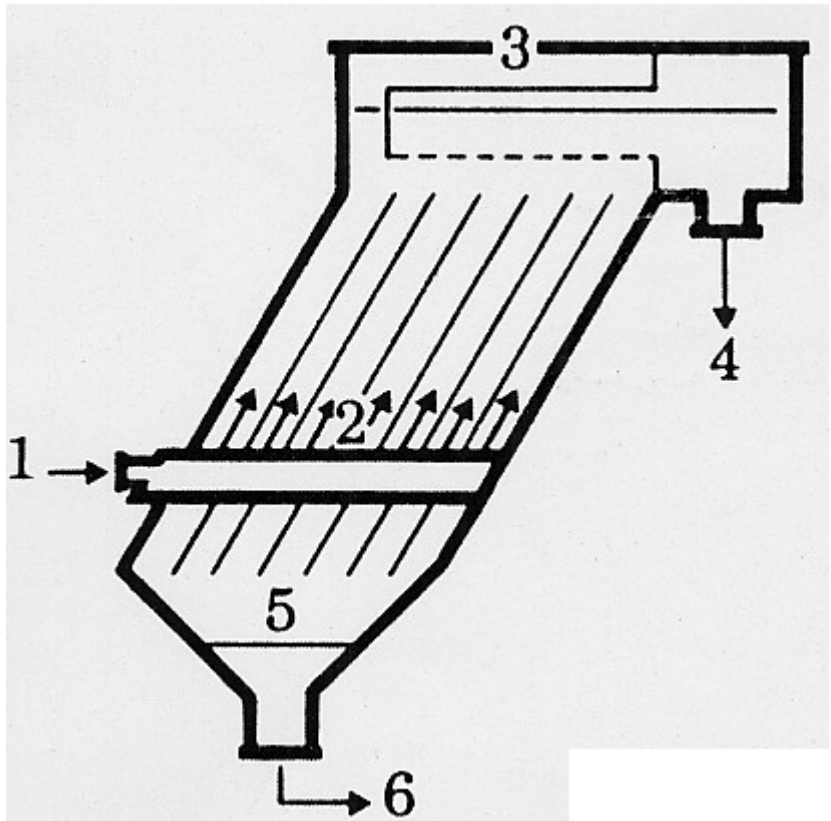
On note qu'il s'agit, sur la Fig. 37, d'un bloc flocculateur-décanteur.

II.3.2.1.3. Décanteur lamellaire

On peut considérer que ce type de décanteur constitue le terme ultime du précédent.

Il est constitué par des plaques inclinées disposées perpendiculairement au flux et qui forment une infinité de niveaux.

Exemple de Bouaflé, Côte d'Ivoire (cf. Fig. 38, Fig. 39, Fig. 40, Fig. 41).



1. Entrée de l'eau flocculée.
2. Zone de transit dans le faisceau de lamelles.
3. Récupération de l'eau décantée.
4. Sortie de l'eau décantée vers le filtre.
5. Zone à boues.
6. Evacuation des boues.

Fig. 38. Sens des flux dans le décanteur de BOUAFLE, Côte d'Ivoire, 35 m³/h.

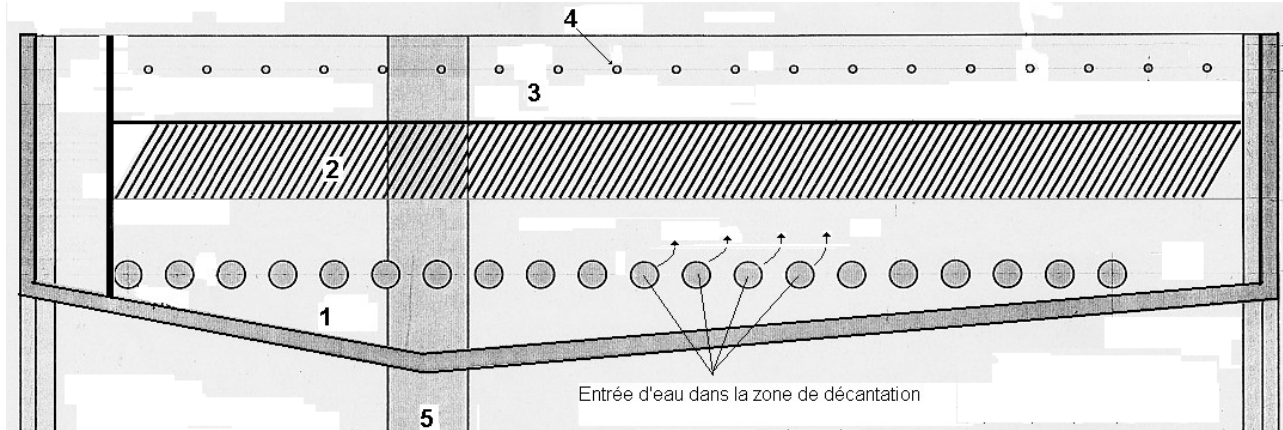


Fig. 39. Coupe schématique du décanteur lamellaire de Bouafilé.

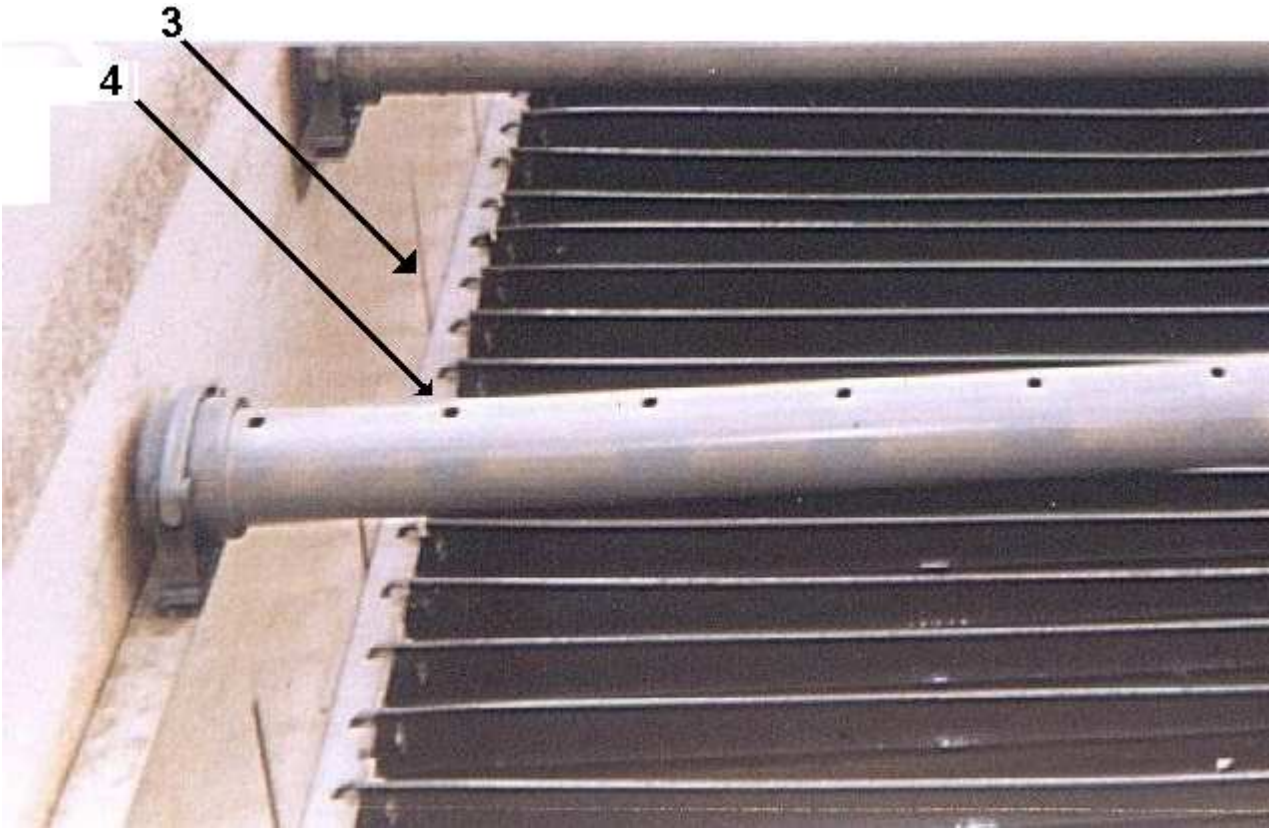


Fig. 40. Photo des lamelles dans le décanteur de Bouaflé (non noyé).

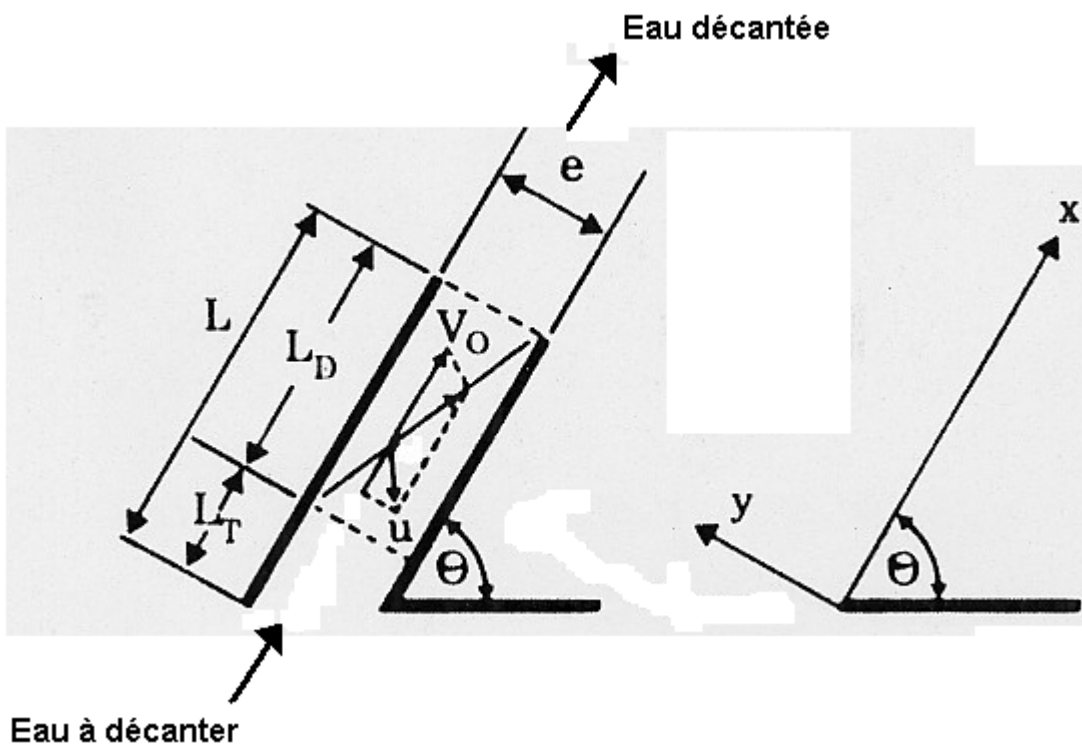


Fig. 41. Schéma du principe de la décantation lamellaire de Bouaflé.

II.3.2.1.4. Décanteur cylindro-conique

Ce type d'appareil à flux ascendant est surtout utilisé dans les petites stations dont les débits Q sont inférieurs à $20 \text{ m}^3/\text{h}$. On le trouve fréquemment aussi, lorsqu'il s'agit d'éliminer les produits résultant de l'utilisation de réactifs chimiques, par exemple dans le cas de la décarbonatation.

La vitesse ascensionnelle de l'eau ne doit pas dépasser 1 à 2 m/h et la pente de la partie conique doit être comprise entre 45 et 65° .

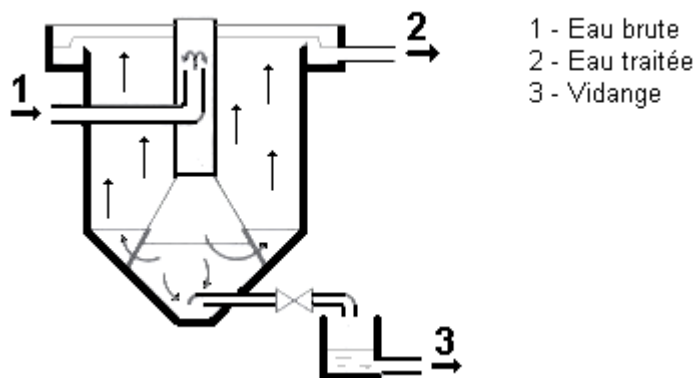


Fig. 42. Décanteur cylindro-conique.

II.3.2.1.5. Décanteurs circulaires

Les décanteurs circulaires, dans leur fonctionnement, peuvent être considérés comme la juxtaposition de multiples décanteurs « classiques ».

Les calculs relatifs à ces derniers leur sont donc applicables à condition toutefois de prendre en compte la modification de la vitesse moyenne horizontale.

II.3.2.2. DECANTEURS A CONTACT DE BOUES

Nous savons que l'agglomération des particules a d'autant plus de chances de se faire que leur concentration est élevée. En effet, la probabilité de rencontres, et donc d'association, est fonction du nombre de particules présentes dans un espace donné. C'est la raison pour laquelle, lors des opérations de floculation, on introduit dans l'eau à traiter des réactifs susceptibles de libérer de grandes quantités de particules.

Les décanteurs à contact de boues reposent sur ce principe.

Lorsque le bassin est mis en eau au début des opérations, l'introduction des réactifs qui a eu lieu en amont dans une chambre des mélanges, a déjà entraîné la formation d'un floc plus ou moins abondant. Une partie des flocons ainsi formés va demeurer dans le bassin et accueillir en quelque sorte le flux suivant. Les particules qui arrivent vont donc se retrouver en contact des constituants du floc déjà constitué et cela ne pourra que favoriser leur capture et donc leur décantation.

On distingue deux types de décanteurs à contact de boues :

- le décanteur à recirculation de boues
- le décanteur à lits de boues.

II.3.2.2.1. Décanteurs à recirculation de boues

Les boues sont séparées de l'eau clarifiée dans une zone de décantation, puis recyclées partiellement vers une zone de mélange où arrivent l'eau brute et les réactifs.

L'agitation peut être mécanique ou hydraulique.

II.3.2.2.2. Décanteurs à lits de boues

Il s'agit d'un décanteur assez particulier qui repose sur le phénomène ci-après.

Soit un tube de verre dans lequel on a introduit une eau brute additionnée de flocculants. Le tube est alimenté par le bas et l'eau peut circuler de bas en eau.

Le floc étant formé, faisons arriver l'eau de deux façons :

- **Progressivement**

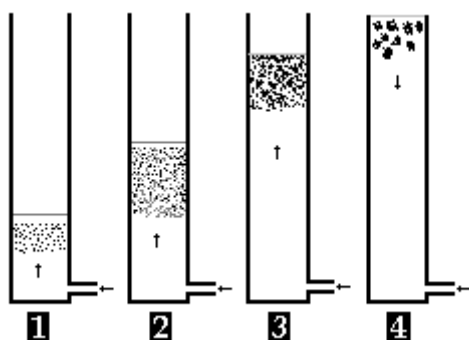


Fig. 43. Introduction d'eau dans un lit de boues progressivement

- Le floc subit une expansion.
- Il est entraîné vers le haut par le flux.
- Il se tasse et se transforme en une masse compacte à travers laquelle l'eau ne peut plus passer.

A un certain moment, le floc « éclate » et est entraîné par l'eau (voir Fig. 43).

- **Brutalement et durant un court instant**

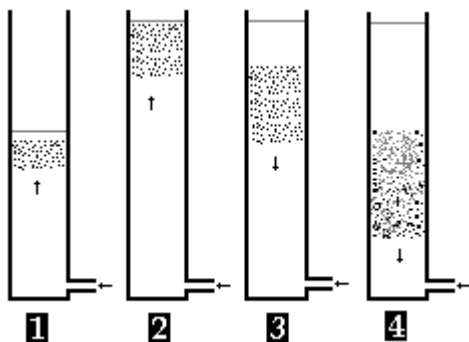


Fig. 44. Introduction d'eau dans un lit de boues brutalement

Au bout d'un certain temps, le floc redescend en entraînant les particules apportées par l'eau.

On peut donc tirer les conclusions suivantes :

- dans le cas d'une arrivée d'eau lente et continue, la structure du floc se modifie, il devient imperméable à l'eau et il n'est plus au contact de celle-ci que par sa surface externe. Dans ces conditions, le floc ne joue pas le rôle qu'on attend de lui. Les particules qu'il contient ne peuvent plus rencontrer celles qui arrivent avec le flux. (Cf. Fig. 43).
- Par contre, si l'eau arrive rapidement dans un temps très court, cette imperméabilité ne se manifeste plus ; le floc, lorsqu'il redescend, permet aux flocons qui le constituent de capturer les particules apportées par l'eau brute. Cf. Fig. 44.

Ce principe de la Fig. 44 trouve son application dans les décanteurs du type PULSATOR™, l'origine de ce terme provenant de la façon dont l'eau est introduite, par « pulsations ».

II.3.2.3. DECANTEURS A FLUX LESTE

Ce type de décanteur est relativement récent et repose sur un principe mis en évidence par une équipe de chercheurs hongrois, dans les années 60.

Si on introduit dans une eau traitée par des flocculants classiques du sable ayant une certaine granulométrie, le processus de floculation se trouve complètement modifié.

Dans le cas habituel, celui où l'on n'utilise pas de sable, le floc se forme en une vingtaine de minutes et donne des flocons de 1 à 2 mm de diamètre qui se déposent lentement.

Si on ajoute du sable, celui-ci traverse rapidement le milieu en entraînant matières en suspension et colloïdes.

Ce principe a été appliqué au CYCLOFLOC™ (Cf. Fig. 45).

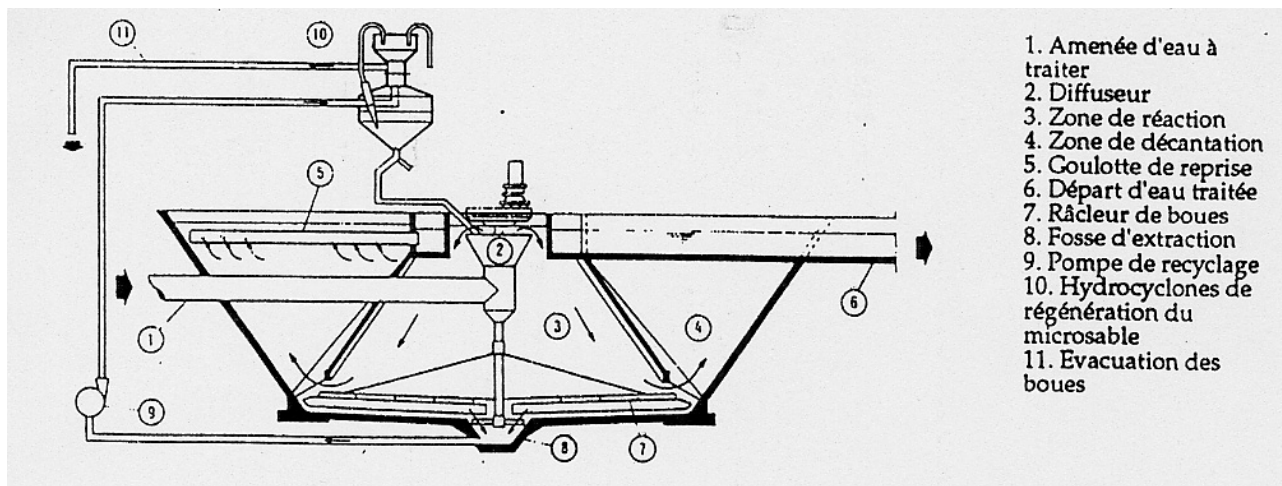


Fig. 45. Schéma du principe de fonctionnement du décanteur à flux lesté type CYCLOFLOC™.

Les vitesses standard obtenues avec ce type de décanteur peuvent atteindre 10 m/h, soit 3 fois celles que l'on obtient avec les autres procédés.

Le sable utilisé doit avoir une granulométrie de 0,02 à 0,10 mm.

II.4. FILTRATION

L'eau brute, à l'issue des différents traitements qu'elle a pu subir depuis son entrée en station, qu'il s'agisse :

- de la coagulation floculation,
 - de précipitations chimiques quelconques,
- se trouve chargée en particules solides plus ou moins décantables.

A partir de ce moment, deux voies s'offrent au traiteur d'eau pour éliminer l'ensemble des particules :

- Décantation suivie d'une filtration. Cette double opération sera nécessaire, si les impuretés se trouvent en concentration telle que le filtre serait très rapidement colmaté par l'arrivée massive de particules floculées.
- Simple filtration. Cette solution sera adoptée si la teneur en particules est faible.

Il est donc à noter que si la décantation est fréquente, elle n'est pas toujours nécessaire ; par contre la filtration s'avère pratiquement toujours indispensable.

II.4.1. NOTIONS GENERALES

La filtration est un procédé de séparation physique qui utilise le passage d'un mélange solide-liquide à travers un matériau poreux appelé filtre.

La phase liquide traverse le matériau poreux. La phase solide est retenue par celui-ci.

Les particules solides vont donc s'accumuler progressivement dans le filtre et conduire au colmatage inéluctable de ce dernier, si les mesures nécessaires ne sont pas prises pour y parer.

Il faut donc envisager périodiquement des opérations de nettoyage du filtre.

La filtration est un traitement « d'affinage » qui doit permettre une excellente élimination :

- des bactéries
- de la turbidité
- de la couleur
- des goûts et odeurs.

II.4.2. DIFFERENTS TYPES DE FILTRATION

Si les matières en suspension ont un diamètre supérieur à celui des pores du filtre, elles sont retenues à sa surface. Le filtre joue alors le rôle d'une simple « passoire » et l'on peut dire que certains des procédés vus précédemment :

- le dégrillage,
 - le tamisage, etc.
- s'assimilent à ce type de filtration.

Dans ce cas, on parle de filtration :

- en surface
- sur support.

Cependant, d'une façon beaucoup plus générale, la filtration constitue un phénomène complexe qui met en jeu non seulement la surface du filtre, mais aussi son épaisseur, et l'on dit que l'on a affaire dans ce cas à la filtration :

- dans la masse
- en profondeur
- sur lit filtrant.

Dans le domaine qui nous concerne, à savoir celui du traitement des eaux de consommation, le procédé à lit filtrant est de loin le plus fréquent.

II.4.3. LOI DE DARCY

Les phénomènes d'écoulement d'un liquide dans un milieu poreux sont régis par la loi de DARCY :

$$v = \frac{K \cdot dP}{\eta \cdot dH}$$

avec

- v : vitesse d'écoulement
- K : perméabilité de la couche filtrante
- dP : perte de charge à travers le filtre
- dH : hauteur de la couche filtrante
- η : viscosité dynamique de l'eau.

On peut également écrire :

$$dP = \frac{\eta}{K} \cdot dH \cdot v$$

On voit ainsi que la perte de charge subie par le fluide lors de la traversée du milieu poreux est directement proportionnelle à :

- sa viscosité, η
- la hauteur du lit, H
- la vitesse d'écoulement, v

et inversement proportionnelle à la perméabilité du milieu au fluide considéré.

II.4.4. MILIEU POREUX

De nombreux produits naturels et synthétiques peuvent être utilisés dans les opérations de filtration. Mis à part le cas des filtres qui sont utilisés dans le cadre de la neutralisation ou reminéralisation des eaux, le matériau filtrant se doit d'être insoluble et inattaquable par l'eau et les solides qui se trouvent retenus.

Certains de ces matériaux sont relativement polyvalents, d'autres plus spécifiques.

Les sables quartzeux ont été les premiers matériaux à être utilisés pour la filtration et ils constituent encore le produit de base pour la filtration. On peut cependant faire appel à d'autres types de matériaux parmi lesquels nous citerons :

- l'anthracite
- le grenat
- la pierre ponce
- les pouzzolanes
- le marbre
- le charbon actif.

Les deux derniers cités jouent par ailleurs un rôle important :

- le premier comme neutralisant de l'agressivité,
- le second dans l'élimination de certaines pollutions.

L'anthracite et le marbre peuvent être substitués au sable lorsqu'il est nécessaire d'éviter toute trace de silice dans certains traitements relatifs aux eaux industrielles, mais des considérations économiques peuvent faire également utiliser ces matériaux dans le traitement des eaux de consommation.

Certains filtres utilisent une combinaison de plusieurs matériaux ; ce sont les filtres multicouches, dont les applications sont particulières.

Le choix qui est fait d'un matériau plutôt que d'un autre, fait intervenir des considérations diverses :

- techniques
- économiques.

II.4.4.1. CARACTERISTIQUES DES MILIEUX POREUX

Divers paramètres sont utilisés pour caractériser le milieu poreux, les uns faciles à déterminer, les autres faisant appel à des techniques sophistiquées...

D'une façon générale, ces paramètres rentrent dans le cadre de ceux que l'on utilise pour caractériser tout matériau, et ils sont définis à partir de normes précises:

II.4.4.1.1. Granulométrie

La granulométrie est caractérisée par une courbe donnant le pourcentage (%) en poids des grains passant à travers les mailles d'une série de tamis normalisés qui vont en général de 0,1 à 16 mm.

On a recours en général à la norme NF X 11.507 pour effectuer les mesures.

Ces mesures consistent à peser 100 g de matériau filtrant, après séchage durant 4 heures. Le matériau est ensuite tamisé successivement sur les différents tamis normalisés et la masse retenue sur chacun d'eux est notée.

A partir de ces résultats, on calcule la masse de matériau qui a traversé le tamis et on l'exprime en pourcentage de la masse totale de matériau utilisé pour l'analyse.

S'agissant du sable, les tamis utilisés ont une maille de 0,2 à 2 mm, en général.

II.4.4.1.2. Taille effective, TE

La TE, qu'on appelle encore « diamètre effectif » correspond à la grosseur des mailles du tamis qui laisse passer 10% de la masse de l'échantillon.

II.4.4.1.3. Coefficient d'uniformité, CU

Le coefficient d'uniformité CU se détermine en faisant le rapport suivant :

$$CU = \frac{\text{Taille des 60\%}}{\text{Taille des 40\%}}$$

Il est souhaitable que ce rapport soit inférieur à 1,6 mais dans certains cas on peut admettre 1,8.

II.4.4.1.4. Forme des grains

Elle peut être :

- sphérique, lorsqu'il s'agit de sables de mer ou de rivière,
- anguleuse, dans le cas de matériaux concassés.

A granulométrie égale, des particules anguleuses génèrent une perte de charge inférieure à celle provoquée par des grains sphériques.

II.4.4.2. FRIABILITE

La friabilité représente la capacité d'un matériau à donner des « fines », suite à des chocs mécaniques ou thermiques.

Elle se détermine en soumettant le matériau à un concassage qui s'effectue dans des conditions déterminées, puis à comparer la nouvelle courbe granulométrique à la courbe initiale.

II.4.4.3. PERTE A L'ACIDE

La perte à l'acide traduit la sensibilité du matériau aux acides et donc au CO₂ agressif.

Elle se mesure en pesant le matériau après qu'il ait été mis au contact de HCl à 20 % durant 24 heures.

II.4.4.4. DENSITE RELATIVE DU SABLE, γ_s

La densité relative du sable peut être déterminée expérimentalement en divisant sa masse par le volume d'eau qu'il déplace.

Entre autres méthodes, il est possible de procéder comme suit :

- de l'eau est introduite dans une éprouvette graduée de telle sorte qu'un espace vide soit ménagé, soit V_0 le volume occupé par cette eau.
- On ajoute alors une masse connue du sable dans l'éprouvette, soit m_s cette masse.
- le niveau de l'eau monte dans l'éprouvette et atteint le niveau V_1 .

On note la différence de volume $V_1 - V_0$, le volume d'eau déplacée.

La densité relative du sable par rapport à l'eau est donnée par :

$$\gamma_s = \frac{\text{Masse du sable}}{\text{Masse de l'eau déplacée}}$$

II.4.4.5. POROSITE, P

Lorsqu'un matériau tel le sable remplit un récipient quelconque, on conçoit que les grains ne s'ajustent pas parfaitement les uns aux autres et que, par conséquent, il subsiste de nombreux vides entre eux. On appelle porosité le rapport du volume des vides par le volume total, occupé par le matériau.

Appelons : V_v volume des vides, V_s volume des grains, V_t volume total, ρ_u masse unitaire sèche du matériau, γ_s densité relative du sable. La porosité p s'écrit :

$$\text{Porosité } p = 1 - \frac{\rho_u}{\gamma_s}$$

II.4.5. CHOIX DE LA GRANULOMETRIE

Ce choix est à faire en liaison avec l'épaisseur de la couche de matériau filtrant. En général, plus le sable sera fin, plus l'épaisseur de la couche pourra être réduite. Cependant, il pourra en résulter certains inconvénients.

On peut définir dans leurs grandes lignes, les domaines d'application des différentes tailles effectives courantes pour un coefficient d'uniformité habituel de l'ordre de 1,2 à 1,8 .

II.4.5.1. $0,3 < TE < 0,5$

Filtration très rapide, sous pression, jusqu' à 25, sinon 50 m/h.

Ce procédé peut être appliqué

- aux eaux de piscine
- aux eaux peu chargées (turbidité < 100 mg de SiO_2) soumises à une filtration directe après coagulation.

Le lavage de tels filtres s'effectue à l'eau seule.

II.4.5.2. $0,6 < TE < 0,8$

On utilisera ce matériau dans les cas suivants :

- Filtration sans décantation préalable, avec ou sans coagulant, pour des eaux dont la turbidité est inférieure à 50 mg de SiO₂.
- Filtration d'eaux décantées à vitesse limitée, environ 7 m/h, en filtre ouvert, pouvant être augmentée sous pression. Une perte de charge dP de 0,6 bar est un maximum.

II.4.5.3. $0,9 < TE < 1,35$

En couche homogène, c'est la granulométrie la plus fréquemment utilisée dans les pays européens et en Côte d'Ivoire. On l'applique à

- la filtration des eaux décantées ;
- la filtration des eaux peu turbides, avec coagulation sur filtre ;
- la filtration directe des eaux brutes peu chargées, en vue d'utilisations industrielles.

La dP limite est de 0,3 bar.

Cette taille convient parfaitement aux filtres à plancher, lavables à l'eau et à l'air, et permet des vitesses de filtration allant jusqu'à 15 et 25m/h.

II.4.6. EPAISSEUR D'UNE COUCHE FILTRANTE

Quand on filtre sur un matériau de granulométrie donnée et que l'on augmente progressivement l'épaisseur de la couche filtrante, on constate après maturation du filtre :

- que la turbidité du filtrat diminue jusqu'à une certaine valeur;
- que cette valeur reste stable et ne s'améliore plus, si l'on continue à faire croître l'épaisseur de la couche filtrante.

Cette valeur définit la hauteur minimale de lit filtrant à mettre en œuvre pour obtenir le meilleur filtrat correspondant à la granulométrie du matériau utilisé.

Il en résulte, pour une vitesse de filtration donnée, une perte de charge minimale.

En effet, d'après la loi de DARCY, la perte de charge dP étant fonction de l'épaisseur traversée, dH , toute augmentation de cette épaisseur entraînera un accroissement de dP , et cela sans que la qualité de l'eau filtrée s'en trouve améliorée.

Il est cependant évident que la durée de vie du filtre, que l'on peut traduire comme sa capacité de rétention des particules, est fonction de l'épaisseur du lit filtrant, et qu'il convient de se ménager une certaine hauteur supplémentaire de la couche filtrante.

Pour pouvoir utiliser au mieux le lit filtrant, c'est-à-dire profiter de l'encrassement de la quasi totalité de la hauteur disponible, il faut disposer d'une perte de charge telle que le temps mis par le filtre pour l'atteindre, soit légèrement inférieur au temps au bout duquel la turbidité de l'eau atteint la valeur maximale que l'on s'est fixée.

II.4.7. CYCLE DE FILTRATION

De par son principe même, un filtre ne peut fonctionner indéfiniment :

- il s'encrasse progressivement ;
- les pertes de charges deviennent prohibitives ;
- la qualité de l'eau diminue ;
- à un certain moment, il ne retient plus les particules.

On dit alors que le filtre est crevé et il convient alors de procéder à sa remise en état par un lavage qui éliminera les particules retenues.

II.4.7.1. COLMATAGE DU FILTRE

Le colmatage est l'obstruction progressive des interstices du matériau filtrant liée au fonctionnement du filtre.

Le colmatage entraîne l'augmentation des pertes de charge que l'on constate au cours du vieillissement du filtre.

Si l'on fonctionne à pression d'alimentation constante, le débit va baisser.

Si l'on veut travailler à débit constant, il est nécessaire d'augmenter la pression d'alimentation, au fur et à mesure du colmatage.

On observe que la vitesse de colmatage est fonction :

- de la nature des particules retenues
- de la vitesse de filtration
- des caractéristiques du matériau.

II.4.7.2. LAVAGE DES FILTRES

A un certain moment, les pertes de charge deviennent prohibitives et la turbidité de l'eau atteint la limite imposée. Il est donc nécessaire de remettre le filtre en état, par un lavage approprié.

La quasi totalité des installations utilise un lavage en deux temps :

- Air et eau
- Eau seule.

II.4.7.2.1. Lavage au mélange air et eau

En général, le débit Q d'eau de lavage est tel que : $5 < Q < 10 \text{ m}^3/\text{h}$.

L'air est insufflé sous une pression de 0,4 bar et sa vitesse est de l'ordre de 40 à 60 m/h.

II.4.7.2.2. Lavage à l'eau seule

Il permet d'entraîner les particules détachées hors du filtre et nécessite le passage de l'eau durant 8 à 10 minutes, avec une vitesse d'environ 20 m/h.

II.4.7.2.3. Introduction de l'air et de l'eau

On utilise des buselures fixées sur le plancher du filtre, pour amener l'eau et l'air nécessaires aux opérations de lavage. Ces buselures peuvent être de deux types suivant qu'elles sont destinées au lavage à l'eau seule ou au mélange de l'air et de l'eau. Dans ce dernier cas, le dispositif le plus adapté est celui qui fait appel à des buselures à queue.

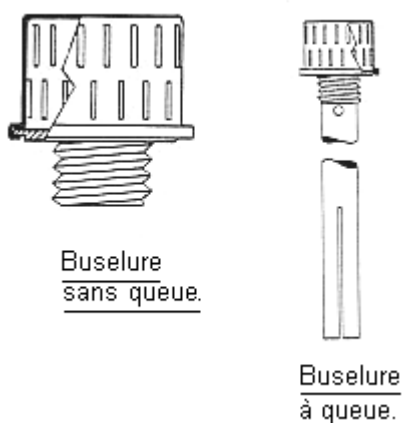


Fig. 46. Buselures

L'air injecté sous le plancher forme un matelas qui vient alimenter les trous et les fentes des buselures en assurant un excellent mélange de l'air et de l'eau (cf. Fig. 47).

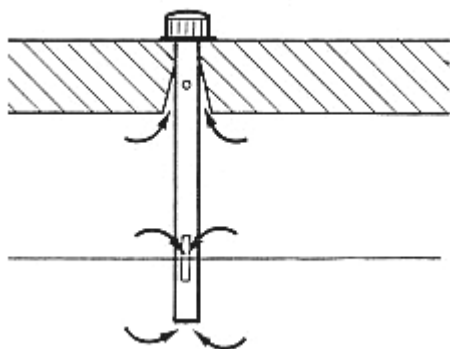


Fig. 47. Buselure et circuit de lavage à l'air et l'eau.

Afin d'éviter la formation de chemins préférentiels dans la masse filtrante (que l'on désigne sous le terme de « mud balls »), il faut avoir une densité de buselures d'environ 50 par m² de plancher, et le débit d'air doit être de l'ordre de 1 m³/buselure/m.

II.4.8. CONCEPTION DE FILTRES

Les filtres peuvent être ouverts ou sous pression mais en ce qui concerne les eaux de consommation humaine, la plupart des installations sont du type ouvert.

II.4.8.1. FILTRES OUVERTS

Leur structure est en général en béton, et le plus souvent les eaux qu'ils reçoivent ont été préalablement flocculées et décantées.

Ces filtres fonctionnent à des vitesses comprises entre 4 et 20 m/h, à l'exception toutefois des filtres lents, et on les classe en filtres rapides classiques et filtres à grande vitesse.

Les premiers travaillent dans la gamme 5 à 10 m/h, les seconds dans celle de 7 à 20 m/h.

Il en existe de nombreux types mais l'on peut schématiser de la façon de la Fig. 48.

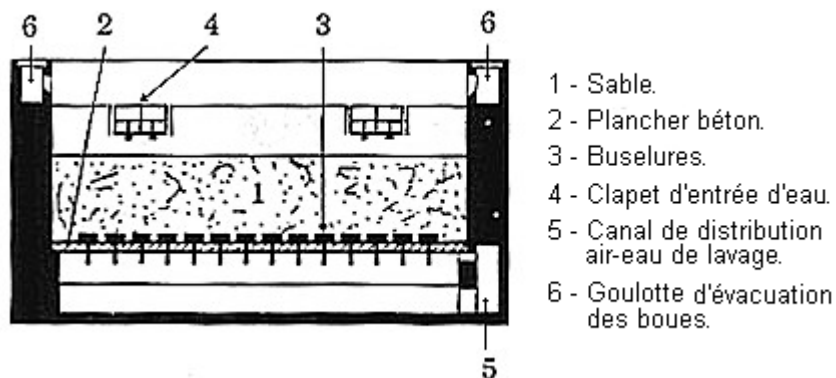


Fig. 48. Schéma de filtre ouvert

La Fig. 49 indique les sens des flux d'air et d'eau de lavage, pendant les phases de lavage ou pendant l'exploitation.

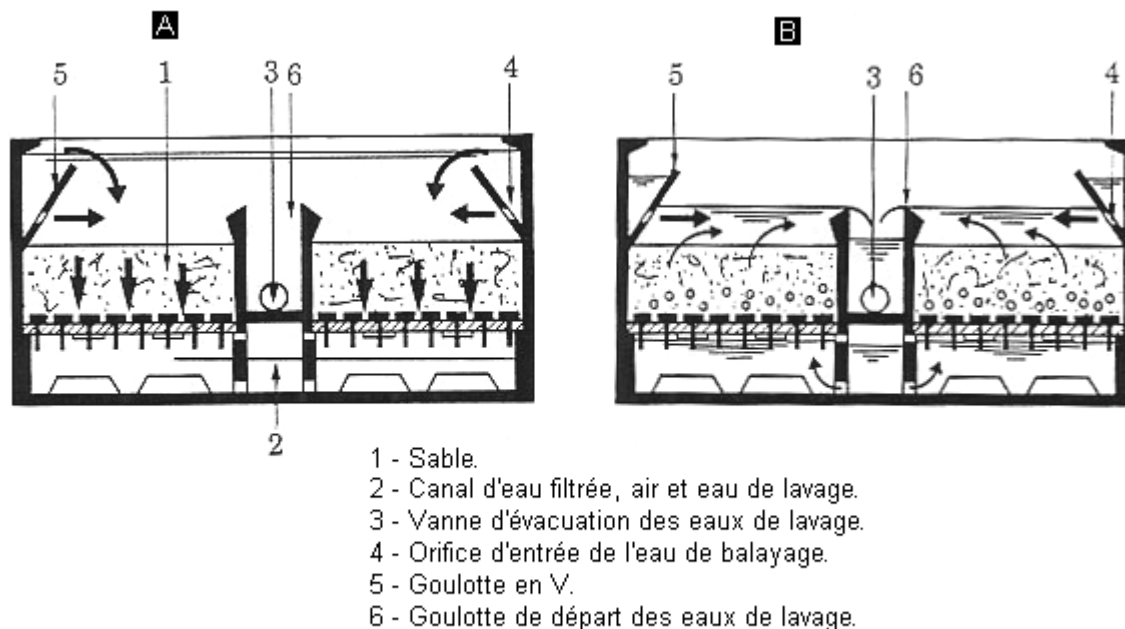


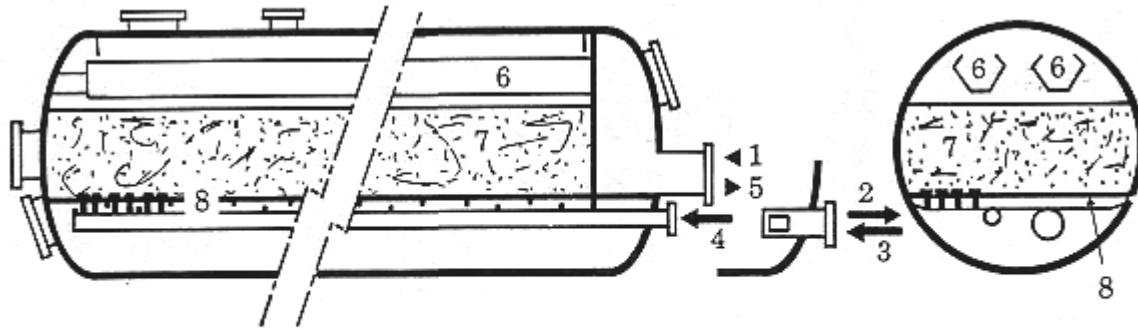
Fig. 49. Schémas de filtres ouverts en exploitation

II.4.8.2. FILTRES SOUS PRESSION

Leur armature est en général métallique et ils peuvent être verticaux ou horizontaux.

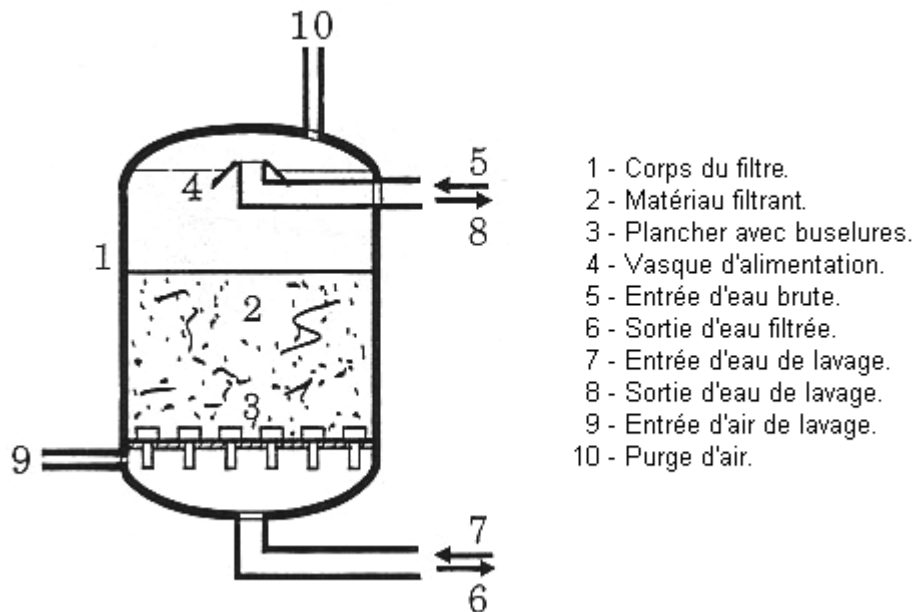
Les verticaux sont beaucoup plus fréquents.

Les vitesses de filtration utilisées vont de 5 à 50 m/h.



- | | |
|-----------------------------|---|
| 1 - Entrée d'eau brute. | 5 - Effluent de lavage. |
| 2 - Sortie d'eau filtrée. | 6 - Goulotte de collecte d'effluents de lavage. |
| 3 - Entrée d'eau de lavage. | 7 - Matériau filtrant. |
| 4 - Air de lavage. | 8 - Plancher avec buselures. |

Fig. 50. Schéma de filtre horizontal sous-pression.



- | |
|------------------------------|
| 1 - Corps du filtre. |
| 2 - Matériau filtrant. |
| 3 - Plancher avec buselures. |
| 4 - Vasque d'alimentation. |
| 5 - Entrée d'eau brute. |
| 6 - Sortie d'eau filtrée. |
| 7 - Entrée d'eau de lavage. |
| 8 - Sortie d'eau de lavage. |
| 9 - Entrée d'air de lavage. |
| 10 - Purge d'air. |

Fig. 51. Schéma de filtre vertical sous-pression.



Fig. 52. Exemple de filtre sous-pression. Elimination biologique du Fe et du Mn. DEGREMONT, France.

II.4.9. REGULATION DES FILTRES

L'évolution naturelle d'un filtre conduit à son encrassement. Il en résulte :

- une augmentation de la perte de charges
- une diminution du débit filtré.

Une régulation s'impose donc et selon le système utilisé, on classera les filtres en :

- filtres à encrassement ;
- filtres à débit constant ;
- filtres à débit variable

II.4.9.1. FILTRES A ENCRASSEMENT

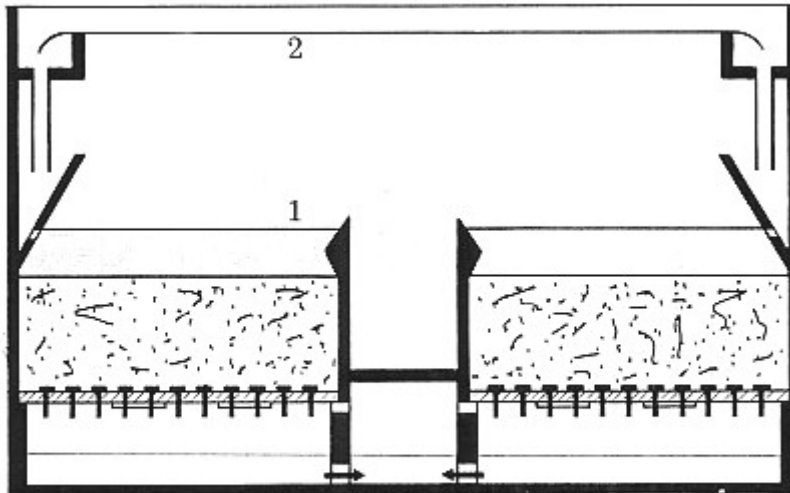
Ce sont des filtres à débits constants et à niveaux variables.

Une équirépartition du débit total à filtrer est réalisée à l'entrée des filtres où l'eau chute d'une hauteur variable, suivant l'état du colmatage.

Quand le filtre est propre, le sable est juste couvert d'eau dont le débit est maintenu par la cote du déversoir de sortie d'eau filtrée.

A encrassement maximal, le niveau atteint la cote du plan d'eau d'alimentation.

En général, l'élévation de ce niveau d'eau est de 1,5 à 2 m, suivant la granulométrie. Fig. 53.



1 - Niveau minimal, filtre propre.
2 - Niveau maximal, filtre encrassé

Fig. 53. Schéma de filtre à encrassement

II.4.9.2. FILTRES A DEBIT CONSTANT

Le niveau de l'eau sur les filtres est pratiquement constant.

L'eau filtrée est restituée 2 à 3 m plus bas à un débit constant et égal au débit entrant divisé par le nombre de filtres.

Le maintien de ce débit constant quel que soit le degré d'encrassement des filtres est assuré par un régulateur placé à la sortie de chacun d'eux et qui agit :

- soit en régulateur de niveau,
- soit en régulateur de débit.

Cet organe crée une perte de charge auxiliaire importante lorsque le filtre est propre et qui s'annule lorsque le filtre est totalement encrassé.

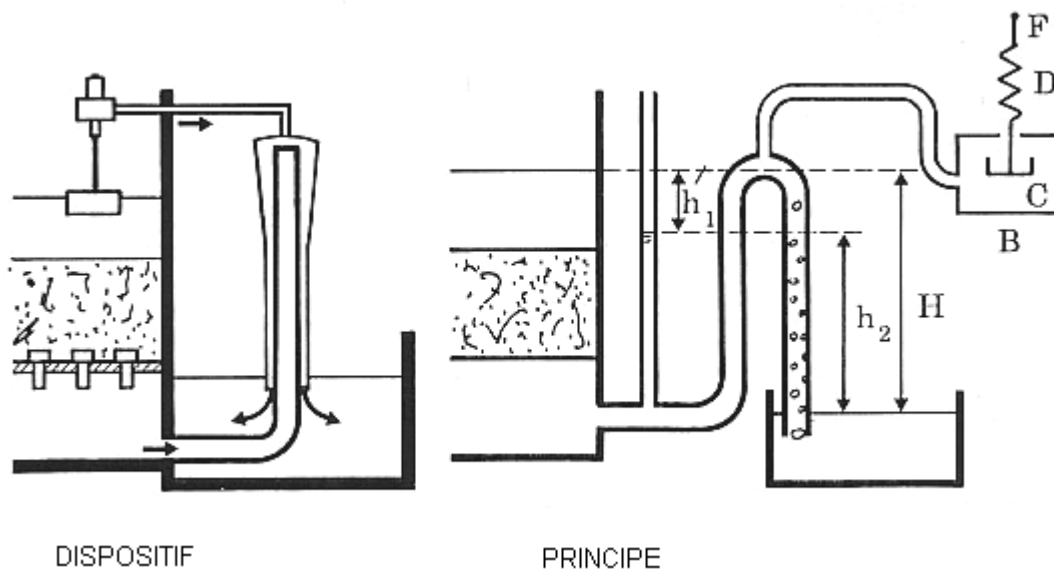
II.4.9.2.1. Exemple du régulateur hydraulique

Il fait appel :

- à un organe de régulation, le siphon
- à un organe de détection et de commande, la boîte de partialisation.

- **Le siphon**

Il est constitué par deux tubes concentriques, l'eau provenant du filtre par le tube intérieur et s'écoulant dans la vasque de restitution par le tube extérieur.



DISPOSITIF

PRINCIPE

Fig. 54. Schéma du siphon concentrique

- **La boîte de partialisation :**

La boîte de partialisation est un dispositif qui permet d'introduire de l'air au sommet du siphon. On conçoit que si de l'air est introduit à ce niveau, il va en résulter une « gêne » à l'écoulement de l'eau, autrement dit une perte de charge.

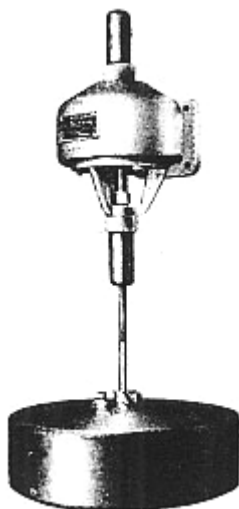


Fig. 55. Boîte de partialisation

L'instrument est réglé de telle sorte que la perte de charge générée soit maximum en début de cycle, c'est-à-dire quand le filtre est propre. Au fur et à mesure de l'encrassement, les pertes de charges augmentent.

Afin de compenser ce phénomène qui conduirait à une diminution du débit, on va réduire l'apport d'air qui est à l'origine de la perte de charge auxiliaire et donc réduire du même coup cette dernière.

Ainsi la perte de charge « totale » sera maintenue constante de même que le débit du filtre. Le débit d'air est asservi au niveau de l'eau dans le filtre.

II.4.9.2.2. Exemple du régulateur électronique

L'organe de réglage est une vanne installée en sortie d'eau filtrée, commandée par un vérin hydraulique. Un capteur de pression fournit un signal électrique proportionnel à sa hauteur d'immersion. Ce signal est comparé à la valeur de consigne relative au niveau à maintenir constant. Tout déséquilibre entre la valeur de consigne et la valeur mesurée se traduit au sein du régulateur électronique par un ordre visant soit à ouvrir, soit à refermer la vanne de sortie d'eau filtrée.

II.4.9.3. FILTRES A DEBIT VARIABLE

Il existe des installations qui comportent des filtres ne travaillant :

- ni à niveau variable
- ni avec régulation individuelle.

C'est notamment le cas pour certaines batteries de filtres ouverts ou sous pression (exemple de la Fig. 54).

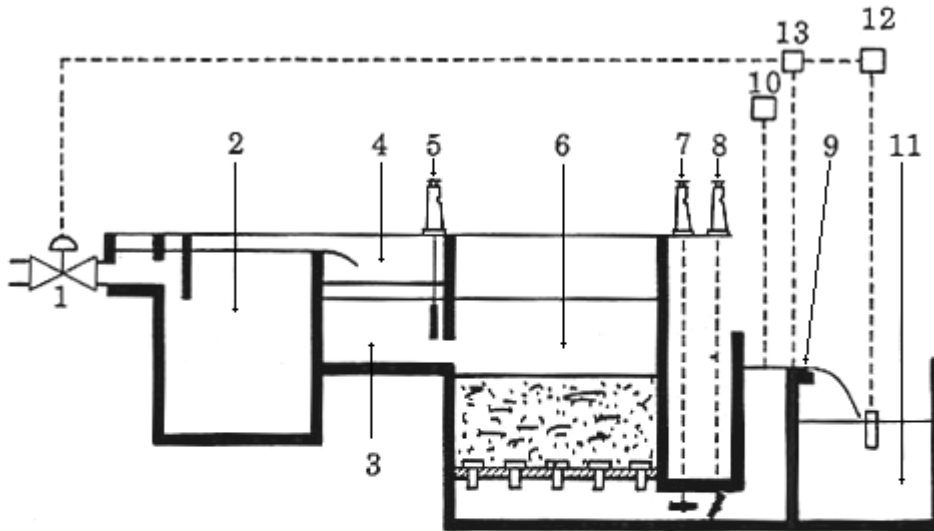
L'eau filtrée s'écoule dans des vasques individuelles dont le déversoir (9) est calé de façon telle que le lit filtrant soit couvert à l'arrêt des filtres, c'est-à-dire que la masse filtrante reste « en eau ».

Chaque sortie de filtre (7) est équipée de deux vannes :

- l'une pouvant être soit ouverte, soit fermée ;
- l'autre prenant diverses positions en vue de créer une perte de charge auxiliaire.

L'alimentation (1) en eau brute est ajustée en fonction du niveau dans la citerne à eau traitée (11), grâce à un détecteur de niveau (12) et un régulateur général (13).

Le débit d'eau brute sera donc réglé en fonction du niveau dans la citerne et il va en résulter un niveau variable sur les filtres.



- | | |
|--|--|
| 1 - Vanne d'entrée d'eau brute. | 7 - Vanne de sortie d'eau filtrée. |
| 2 - Décanteur. | 8 - Vanne de réglage de la perte de la perte de charge auxiliaire. |
| 3 - Goulotte d'alimentation des filtres. | 9 - Déversoir de sortie individuelle des filtres. |
| 4 - Déversoir de trop-plein. | 10 - Débitmètre individuel. |
| 5 - Vanne d'entrée. | 11 - Citerne générale d'eau traitée. |
| 6 - Filtre à débit décroissant. | 12 - Mesure du niveau dans la citerne. |
| | 13 - Régulateur du débit d'eau brute. |

Fig. 56. Schéma du filtre à débit variable

II.5. DESINFECTION

La désinfection a pour but d'éliminer l'ensemble des micro-organismes susceptibles de transmettre des maladies. Cette désinfection n'inclut pas nécessairement la stérilisation qui conduit, elle, à la destruction de tous les organismes vivants dans l'eau.

La désinfection fait appel à deux types de traitements :

- les uns reposent sur l'utilisation de réactifs chimiques doués de pouvoir germicide, des oxydants en général ;
- les autres sur la mise en œuvre de procédés physiques : adsorption, radiation.

II.5.1. PARAMETRES GENERAUX RELATIFS A LA DESINFECTION

Le choix du désinfectant et la qualité de la désinfection dépendent d'un certain nombre de paramètres et de notions qu'il importe d'explicitier.

II.5.1.1. EFFET REMANENT

L'effet rémanent pour un désinfectant est celui de maintenir ses caractéristiques bactéricides durant un certain temps relativement long, après qu'il ait été introduit dans l'eau. A contrario, un désinfectant non doté de pouvoir rémanent, à l'exemple de l'ozone, voit son pouvoir bactéricide s'estomper quelques instants après son introduction dans l'eau.

La persistance des effets rémanents permet de garantir les qualités de l'eau traitée durant son séjour dans le réseau de distribution. En effet, il subsistera dans ces conditions :

- un pouvoir bactériostatique susceptible de bloquer toute reviviscence bactérienne ;
- un pouvoir bactéricide capable de s'opposer aux conséquences d'une pollution fortuite et ponctuelle du réseau.

II.5.1.2. CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES

Dans le cas de l'utilisation d'un réactif, il convient que ce dernier fasse preuve d'un certain nombre de qualités :

- avoir une très bonne solubilité dans l'eau ;
- posséder une stabilité acceptable dans le temps, de telle sorte qu'il subsiste dans l'eau et durant une période aussi longue que possible, un résiduel du produit ;
- ne pas réagir avec d'autres composés présents dans l'eau afin d'être exclusivement utilisé pour le rôle qui lui est imparti.

II.5.1.3. DIVERS PARAMETRES

Au point de vue analytique, le désinfectant doit pouvoir être identifié et dosé facilement.

Sur le plan économique, il doit être d'un coût relativement modique.

Le procédé de désinfection qui remplirait l'ensemble de ces conditions serait le procédé idéal ; il n'en va malheureusement pas ainsi, tous les procédés ayant leurs défauts!

II.5.1.4. CONDITIONS A RESPECTER

II.5.1.4.1. Qualité de l'eau à traiter

Pour atteindre les résultats escomptés, la désinfection doit se faire sur une eau de bonne qualité, c'est-à-dire qui a déjà été débarrassée de la plus grande partie de ses MES (<1 mg/L). En effet, dans le cas contraire, les micro-organismes peuvent trouver refuge au sein des MES et être ainsi protégés à l'encontre des désinfectants.

D'autre part, la présence de matières organiques va entraîner la consommation du désinfectant par ces composés, réduisant ainsi la concentration de produit capable d'agir sur les micro-organismes.

II.5.1.4.2. Caractéristiques chimiques de l'eau

La présence dans l'eau de traces de

- phénols
- méthyl-cétones

peut conduire, avec certains désinfectants tels que le chlore, à la formation de composés qui confèrent à l'eau des caractéristiques organoleptiques inacceptables.

Aussi, le choix du traitement devra-t-il tenir compte de la présence éventuelle de certains composés.

II.5.2. TRAITEMENT D'OXYDATION

II.5.2.1. PRINCIPES GENERAUX DE LA DESINFECTION

Le taux de destruction des micro-organismes par un désinfectant est fonction de divers facteurs :

- pouvoir « intrinsèque » du désinfectant ;
- concentration utilisée ;
- temps de contact ;
- température de l'eau ;
- pH de l'eau ;
- type et nombre des micro-organismes à éliminer ;

- présence dans l'eau de certains éléments consommateurs de chlore ou non.

II.5.2. OXYDATION PAR LE CHLORE

II.5.2.1. Propriétés physiques

Dans les conditions normales, le chlore est un gaz jaune verdâtre, irritant pour les yeux, la peau et les muqueuses.

On peut déjà en conclure que son utilisation appellera un certain nombre de précautions.

Sa densité par rapport à l'air est de 2,49 et sa solubilité dans l'eau est de l'ordre de 7 g/L.

II.5.2.2. Propriétés chimiques

- **Pouvoir oxydant**

Le chlore se caractérise par un pouvoir oxydant très élevé qui résulte de la position privilégiée qu'occupe le chlore dans la classification périodique des éléments de Mendeleïev.

En effet, le chlore appartient à la famille des halogènes, il est situé juste sous le fluor et manifeste un caractère électro-négatif très marqué.

Le chlore est l'un des éléments capables d'oxyder l'eau et cette propriété est à l'origine de celles dont il fait usage dans la désinfection.

- **Degrés d'oxydation**

Le chlore présente de multiples degrés d'oxydation comme le montre le tableau 4 :

Tableau 3. Degrés d'oxydation du chlore.

Degré d'oxydation	Anions	Acides	Sels	Divers
-1	Cl^-	Chlorhydrique	Chlorures	
0				Chlore
+1	ClO^-	Hypochloreux	Hypochlorites	
+3	ClO_2^-	Chloreux	Chlorites	
+4	ClO_2			Dioxyde de chlore
+5	ClO_3^-	Chlorique	Chlorates	
+7	ClO_4^-	Perchlorique	Perchlorates	

La plupart de ces degrés d'oxydation sont stables à l'exception toutefois du degré 4 qui se manifeste dans le bioxyde de chlore, ClO_2 . Ce composé n'en est pas moins intéressant car il possède des propriétés remarquables en matière de désinfection.

• **Action sur l'eau**

Le chlore réagit sur l'eau. C'est l'un des rares éléments à avoir un tel comportement.

La réaction est une solvolysse et aboutit à la destruction de la molécule d'eau, comme s'il s'agissait d'un simple réactif : $Cl_2 + H_2O \rightleftharpoons HClO + HCl$.

Dans cette réaction, le chlore qui est au degré d'oxydation 0 passe à deux degrés différents :

- +1 dans $HClO$
- -1 dans HCl .

Il s'agit donc là d'une réaction de dismutation.

A cette première réaction s'en ajoute une autre liée à la dissociation de l'acide hypochloreux formé :



Ces deux réactions montrent que le pH a un rôle déterminant dans l'équilibre et l'on remarque immédiatement que :

- si le pH croît, il y a consommation de H^+ , l'équilibre évolue vers la droite, donc dans le sens de la formation de ClO^- .
- si le pH décroît, l'équilibre est déplacé vers la gauche, il y a formation de chlore.

Ce phénomène présente un intérêt majeur dans le cas de l'utilisation du chlore comme désinfectant. En effet, l'efficacité de la chloration se trouve sous l'étroite dépendance du pH. Au point de vue quantitatif, on a pu établir que dans les conditions normales, les espèces dominantes se répartissaient comme le montre la Fig. 57.

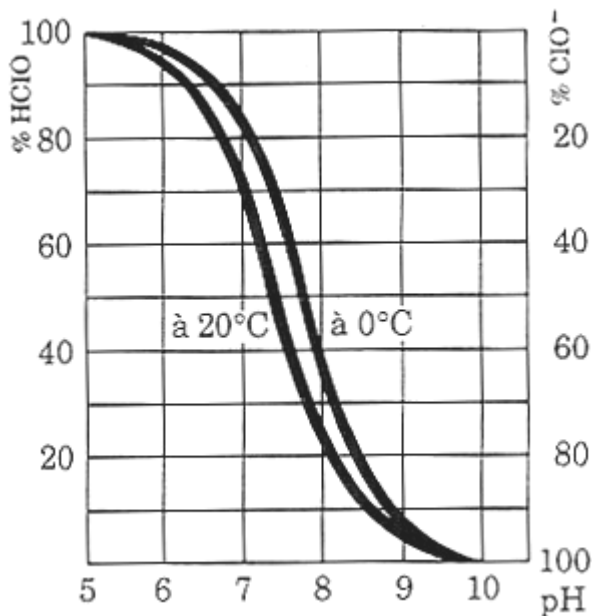


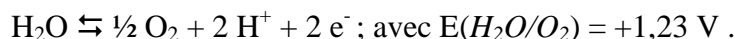
Fig. 57. Répartition de $HOCl$ et ClO^- , en fonction du pH.

- $HClO$ prédomine à pH inférieur à 7,5
- ClO^- prédomine à pH supérieur à 7,5.

• **Stabilité des solutions aqueuses**

En solution aqueuse Cl_2 , $HClO$, ClO^- , sont instables car susceptibles d'oxyder l'eau ; compte tenu des potentiels redox des couples formés.

L'eau peut en effet s'oxyder selon la réaction :



Nous savons que pour qu'une telle réaction ait lieu, il faut que le potentiel redox du couple qui sera opposé à celui de l'eau lui soit supérieur. Or dans le cas qui nous concerne les couples redox antagonistes sont :

- $Cl_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2 Cl^- : E = +1,39 \text{ V} .$
- $2 HClO + 2 H^+ + 2 e^- \rightleftharpoons Cl_2 + 2 H_2O : E(ClO^-/Cl_2) = +1,61 \text{ V} .$

Les potentiels redox étant supérieurs à celui de l'eau, celle-ci sera oxydée par Cl_2 et $HClO$.

Du fait de cette oxydation, les solutions de chlore et d'hypochlorite se conservent assez mal. Cependant la vitesse de la réaction reste faible, ce qui atténue les conséquences néfastes du phénomène.

Il est à noter toutefois que la lumière accélère considérablement ce type de réactions.

• **Réactivité du chlore**

Le chlore n'est pas un produit chimique anodin, il possède une forte réactivité et celle-ci peut se manifester à l'encontre :

- de certains matériaux mis à son contact,
- de NH_4^+ pour former des chloramines,
- de matières organiques avec lesquelles il donne des haloformes.

• **Degré d'efficacité**

Quand on compare l'efficacité de diverses combinaisons du chlore, en vue de l'élimination à 99% d'Eschérichia Coli par le chlore utilisé sous diverses formes, on note ce qui suit.

Pour un temps de contact de 10 min, il faut :

- 0,01 ppm de chlore sous forme $HClO$
- 2 ppm de chlore sous forme ClO^- .

Pour une concentration de 0,1 ppm en chlore, il faut :

- 2 min de contact avec la forme $HClO$
- 100 min de contact avec la forme ClO^- .

La forme $HClO$ non dissociée possède une efficacité très supérieure à celle de la forme ClO^- .

II.5.2.2.3. Effets secondaires de la chloration

La réactivité du chlore notamment à l'égard des composés ammoniacaux et des matières organiques a été déjà démontrée. Il convient de préciser les effets secondaires de la chloration, lorsque de telles substances sont présentes dans les eaux devant être désinfectées.

• Demande en chlore

Si on ajoute des doses croissantes de chlore à une eau exempte d'ammoniaque et de ses dérivés, on fait les observations suivantes :

- au début, l'eau consomme le chlore au fur et à mesure de son introduction, c'est-à-dire que l'on ne trouve pas traces de chlore « libre » dans l'eau ;
- après ajout d'une certaine quantité de chlore, il apparaît à un certain moment un résiduel, c'est-à-dire du chlore libre dont la concentration croît au fur et à mesure que l'on continue à introduire le chlore.

Le graphique suivant (Fig. 58) montre l'évolution de la concentration du chlore résiduel en fonction du taux de chlore utilisé.

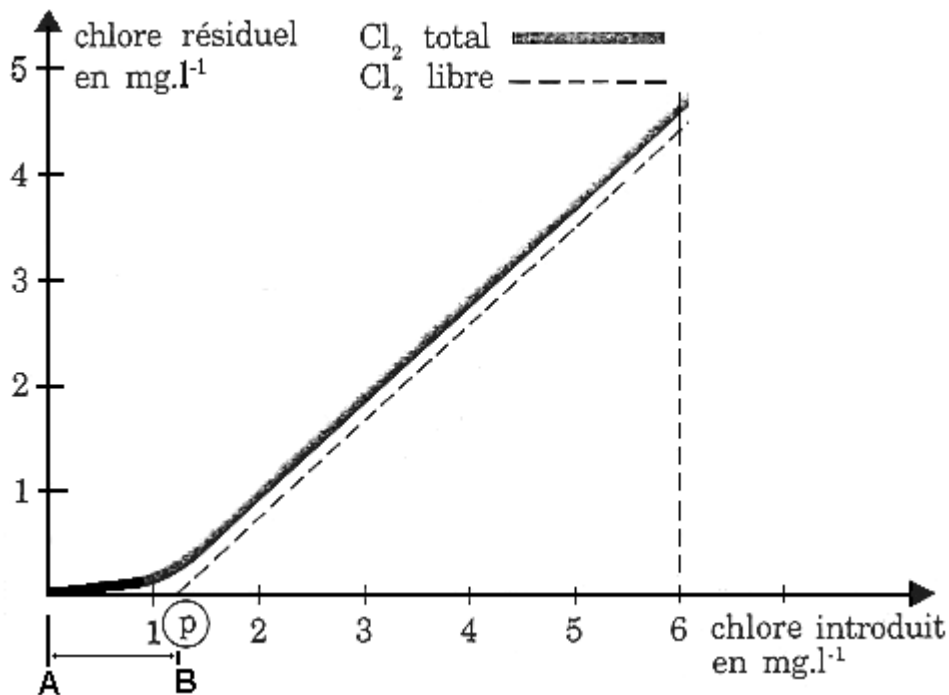


Fig. 58. Demande en chlore

La partie AB correspond à la consommation du chlore par les diverses substances oxydables présentes dans l'eau.

On l'appelle demande en chlore, et c'est seulement lorsque cette dernière aura été satisfaite que le chlore pourra jouer son rôle bactéricide.

Dès l'instant que la demande en chlore est satisfaite, l'excès de chlore ajouté reste à l'état de chlore libre.

• Les chloramines

Dans le cas d'une eau contenant de l'ammoniaque ou ses dérivés telles les amines, l'aspect de la courbe est tout autre :

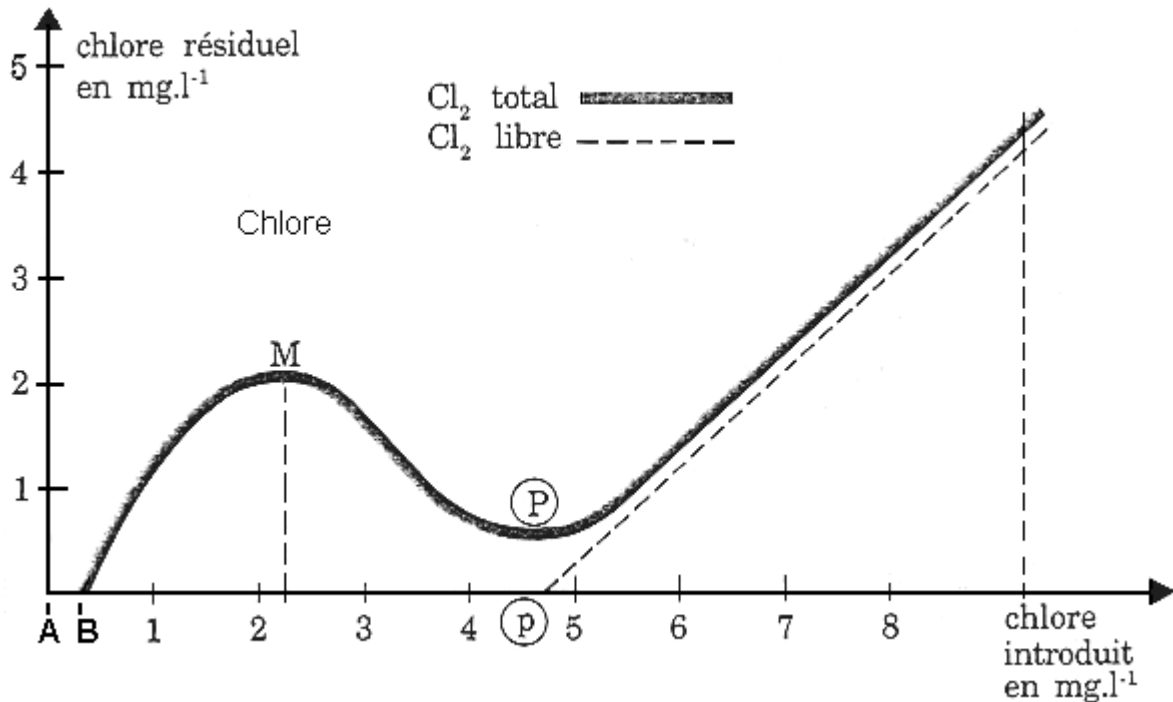


Fig. 59. Détermination du point de rupture (Break-point)

L'explication de cette courbe est la suivante :

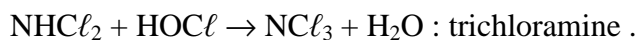
- A-B : demande en chlore par les composés non ammoniacaux ;
- B-M : consommation du chlore par l'ammoniaque libre et les composés renfermant des ions ammonium.

Le chlore réagit initialement avec les composés contenant de l'ammonium, selon les réactions:

- $\text{NH}_4^+ + \text{HOCl} \rightarrow \text{NH}_2\text{Cl} + \text{H}_2\text{O} + \text{H}^+$: monochloramine
- $\text{NH}_2\text{Cl} + \text{HClO} \rightarrow \text{NHCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$: dichloramine.

Du début de la courbe et jusqu'au point M, il y a formation de mono et de dichloramines qui répondent au dosage du chlore résiduel total.

- M-P : formation des trichloramines au détriment des mono et dichloramines :



Les trichloramines ainsi formées ne répondent pas au dosage du chlore résiduel, par conséquent ce dernier « diminue ».

En effet, puisque les mono et dichloramines disparaissent et que le chlore ajouté est bloqué sous forme de trichloramines ; le chlore résiduel total semble décroître.

On aboutit ainsi au point P. La dose de chlore totale qui a été ajoutée à ce stade de la chloration correspond alors au point critique appelé encore « Break-Point ».

Au delà du point critique, le chlore résiduel total augmente de la même quantité que celle qui est introduite et ce chlore résiduel se trouve essentiellement sous forme de chlore libre.

Précisons les termes suivants :

- Chlore libre : ensemble du chlore sous formes $\text{Cl}_2, \text{HClO}, \text{ClO}^-$
- Chlore combiné : ensemble du chlore sous formes de chloramines

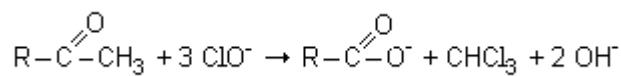
- Chlore actif libre : ensemble du chlore non ionisé, Cl_2 , $HClO$
- Chlore total : ensemble du chlore combiné et non combiné.

- **Les haloformes**

La présence dans les eaux de méthylcétones ou de composés susceptibles d'en fournir par oxydation, conduit à la formation de dérivés trihalogénés appelés « haloformes », en raison de l'analogie qu'ils présentent avec le chloroforme $CHCl_3$.

On a pris l'habitude de désigner sous le terme de « précurseurs », les substances donnant des haloformes avec le chlore.

La réaction de base dans la genèse des haloformes s'écrit :



Outre $CHCl_3$, on peut trouver les haloformes $CHBrCl_2$ (dichlorobromométhane), $CHBr_2Cl$ (dibromochlorométhane), $CHICl_2$ (dichloriodométhane), etc.

La présence de l'iode et du brome dans ces trihalogénures s'explique par le caractère très électro-négatif du chlore ; ce qui permet à ce dernier de déplacer les deux éléments cités de certaines de leurs combinaisons, telles les iodures et bromures.

- **Les organochlorés**

La chloration des matières organiques entraîne la formation de multiples composés dont certains n'ont toujours pas été formellement identifiés ; ce qui laisse quelques inquiétudes aux traiteurs d'eau quant aux effets que pourraient avoir ces composés sur le plan sanitaire.

Parmi ces substances, les organochlorés, suspectés d'être cancérogènes, font l'objet de multiples recherches.

- **Les chlorophénols**

En présence de traces de phénols ou de composés de même nature, la stérilisation au chlore confère à l'eau une saveur extrêmement désagréable suite à la formation de chlorophénols.

Des traitements complémentaires seront par la suite nécessaires pour éliminer ce mauvais goût (charbon actif).

II.5.2.2.4. Mise en oeuvre du chlore

Le chlore est distribué dans une filière de traitement des eaux au moyen de chloromètres. Ces derniers sont conçus :

- pour assurer un arrêt automatique de la distribution du chlore, s'il n'y a plus d'eau de dilution,
- pour éviter tout désagrément de chlore dans l'atmosphère.

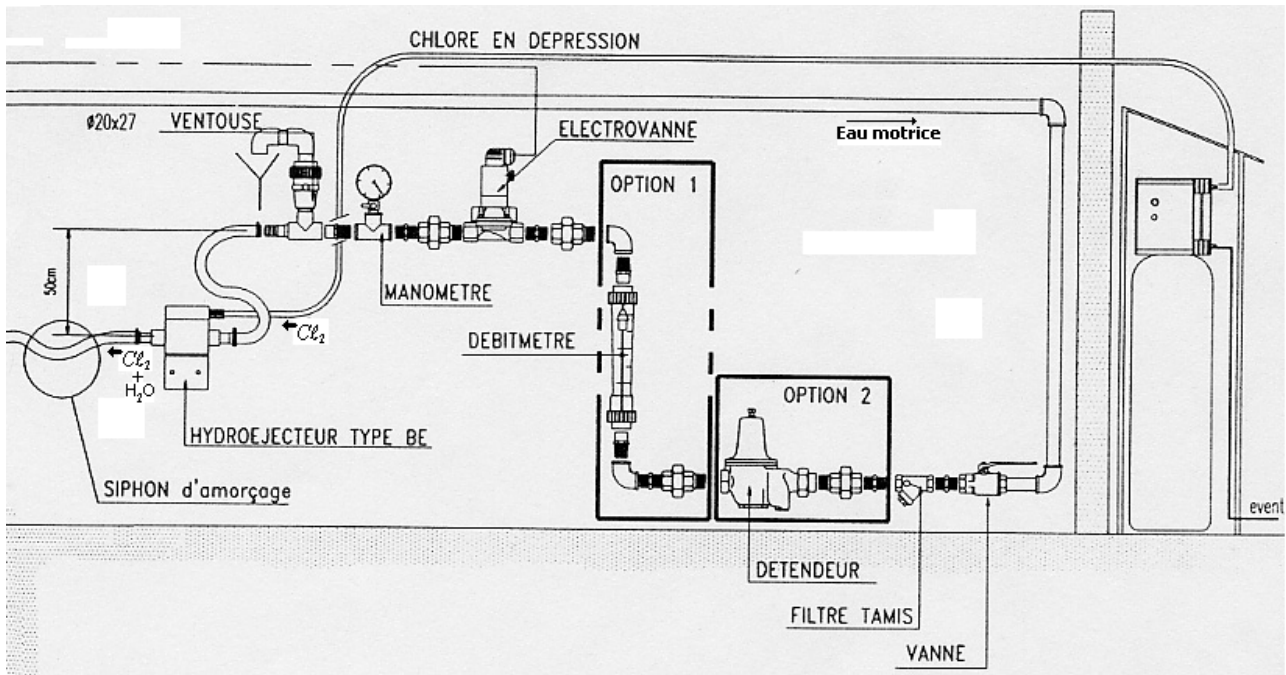


Fig. 60. Schéma d'un système d'injection de chlore.

Les stations de chloration doivent posséder un système de neutralisation capable de faire face à tout incident de fonctionnement de l'unité.

La salle de stockage des réservoirs de chlore et celle des chloromètres doivent être rigoureusement isolées.

S'il se produit une fuite, un détecteur déclenche immédiatement une alerte et met en marche automatiquement :

- des ventilateurs qui aspirent le chlore émis
- une pompe qui amène la solution neutralisante.

Le contact entre l'air chloré et la solution se fait à contre courant au travers du matériau de remplissage d'une colonne prévue à cet effet.

La solution neutralisante est constituée :

- soit de soude
- soit d'hyposulfite de sodium.

Les réactions de neutralisation s'écrivent :

- $\text{NaOH} + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{NaCl} + \text{NaOCl}$
- $2 \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{S}_4\text{O}_6 + 2 \text{NaCl}$

II.5.2.3. OXYDATION PAR LES HYPOCHLORITES

II.5.2.3.1. Caractéristiques de la désinfection par les hypochlorites

Ce sont des procédés :

- rustiques,

- peu onéreux,
- susceptibles d’être mis en œuvre par des personnels peu qualifiés.

Ceci explique le succès que connaît toujours la désinfection

- à l’hypochlorite de sodium ou eau de Javel,
- à l’hypochlorite de calcium.

En Côte d’Ivoire, c’est ce dernier procédé qui domine très largement.

L’utilisation des hypochlorites nécessite cependant des manipulations non négligeables car les produits étant relativement instables, on ne peut en préparer de trop gros volumes ; ce qui conduit à renouveler fréquemment les réactifs.

Le mode d’action des hypochlorites est strictement identique à celui du chlore gazeux. Au contact de l’eau, les hypochlorites se dissocient de la façon suivante :

- $XClO \rightarrow X^+ + ClO^-$
- ClO^- , compte tenu du pH, redonne l’équilibre classique qui aboutit à la formation de $HClO$:
 $ClO^- + H^+ \rightarrow HClO$

II.5.2.3.2. Hypochlorite de sodium $NaClO$

Les solutions d’hypochlorite de sodium, communément appelées « eaux de Javel », sont caractérisées par leur teneur en chlore actif. Cette teneur est exprimée en degrés chlorométriques, encore appelés degré GAY LUSSAC.

Le degré chlorométrique correspond à 3,17 g/L de Chlore.

Les produits industriels utilisés pour la désinfection des eaux titrent en général de 47 à 50° chlorométriques. Les eaux de Javel à usage domestique se limitent à une concentration d’environ 12 à 18°.

La solution d’hypochlorite de sodium est ajoutée à l’eau à traiter après avoir été éventuellement diluée, par l’intermédiaire d’un doseur.

Il convient de noter que l’hypochlorite de sodium est le sel d’un acide faible et d’une base forte. De ce fait, il présente donc un caractère basique très marqué. Aussi, pour les eaux chargées en calcium, y a-t-il risque de voir précipiter celui-ci !

II.5.2.3.3. Hypochlorite de calcium $Ca(ClO)_2$

Il se présente en général sous forme de poudre qui titre 65 à 70% de $Ca(ClO)_2$; ce qui correspond à 650-700 g/kg de chlore actif.

II.5.2.4. OXYDATION PAR LE BIOXYDE DE CHLORE

II.5.2.4.1. Propriétés du bioxyde de chlore

Le bioxyde de chlore présente des propriétés remarquables en matière de désinfection.

Ces propriétés le feraient préférer aux autres procédés utilisant la chloration, si sa mise en œuvre était moins délicate et son coût d'investissement moins élevé.

- **Propriétés physiques**

Le bioxyde de chlore, ClO_2 est un gaz de couleur vert foncé dont l'odeur est encore plus désagréable que celle du chlore.

Sa densité par rapport à l'air est de 2,39. Sa solubilité dans l'eau à 25°C vaut 81 g/L.

Le bioxyde de chlore a donc une solubilité dix fois supérieure à celle du chlore.

- **Propriétés chimiques**

Le bioxyde de chlore est instable sous forme gazeuse et subit une certaine décomposition en solution sous l'action de la lumière.

C'est un oxydant puissant, capable de détruire les phénols y compris les chlorophénols. Il n'agit pas sur l'ammoniaque (voir Fig. 15, Action comparative d'oxydants.).

Ce comportement à l'égard des deux composés précités montre tout l'intérêt qu'il présente par rapport aux autres composés du chlore car il met à l'abri de formation de trihalométhanes (THM) suspectés d'être cancérogènes.

II.5.2.4.2. Production du bioxyde de chlore

Étant donné son instabilité, le bioxyde de chlore doit être produit « in situ ». On utilise à cet effet :

- soit l'action de HCl sur le chlorite de sodium :
 $5 NaClO_2 + 4 HCl \rightarrow 4 ClO_2 + 2 H_2O + 2 NaCl$
- soit l'action du chlore sur le chlorite :
 $2 NaClO_2 + Cl_2 \rightarrow 2 ClO_2 + 2 NaCl$.

Du fait de risque d'explosion lié au premier procédé, celui-ci a tendance à être abandonné au profit du procédé au chlore.

II.5.2.4.3. Intérêt du bioxyde de chlore en désinfection

Le pouvoir désinfectant de ClO_2 est comparable à celui du chlore, dans le domaine de pH où ce dernier est normalement utilisé ; c'est à environ 50%, pour un pH < 7.

Pour une zone de pH comprise entre 7 et 10, l'efficacité du bioxyde de chlore est supérieure à celle du Cl_2 .

Les avantages de ClO_2 par rapport au Cl_2 sont les suivants :

- il ne réagit pas avec l'ammoniaque ;
- il n'entraîne pas la formation de chlorophénols ;
- il ne produit que très peu d'haloformes.

Par ailleurs, il est très efficace pour la destruction des algues et possède un pouvoir rémanent supérieur à celui du chlore.

II.5.2.5. OXYDATION PAR L'OZONE

L'ozone est une variété allotropique de l'oxygène et répond à la formule O_3 .

C'est un gaz de densité 1,657 par rapport à l'air, et qui, sous forte épaisseur, a une couleur bleue.

L'ozone est un oxydant énergétique qui transforme les grosses molécules organiques, y compris les structures cycliques, en éléments plus simples, le terme de ces transformations étant souvent des aldéhydes et cétones.

II.5.2.5.1. Production de l'ozone

L'ozone est un gaz instable obtenu par l'action ionisante sur l'oxygène d'un champ électrique dérivant d'une ddp élevée.

En pratique, l'ozone s'obtient industriellement en faisant passer un courant d'air dont la teneur en oxygène peut être variable, entre deux électrodes portées à une ddp de 10 à 20 000 V.

La concentration usuelle du gaz ainsi préparé est en moyenne de 10 à 20 g/m^3 .

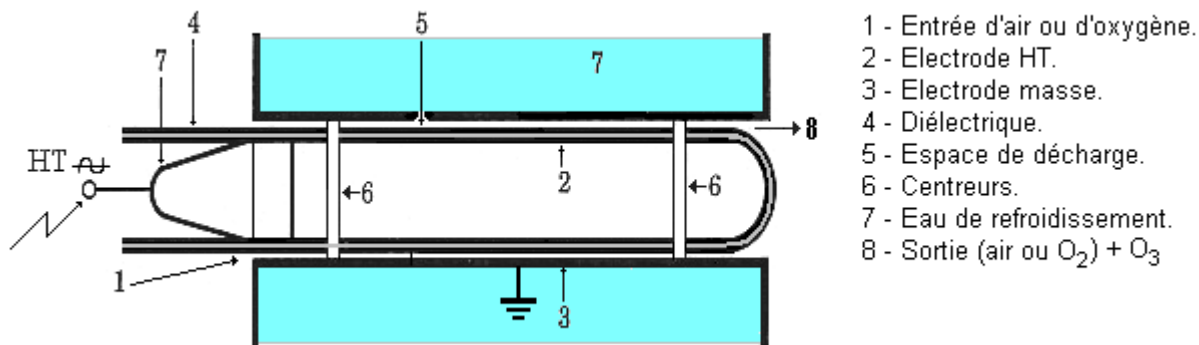


Fig. 61. Schéma d'un ozoneur élémentaire.

II.5.2.5.2. Intérêt et limites de l'utilisation de l'ozone en désinfection

Les propriétés oxydantes de l'ozone en font un désinfectant plus puissant que tous les autres, quoique que son mode d'action sur les micro-organismes n'ait pas été totalement élucidé.

Un taux résiduel de $0,4 g/m^3$, durant 4 minutes, assure une action bactéricide convenable.

La solubilité de l'ozone ($570 mg/L$), est 12 fois plus faible que celle du chlore.

D'autre part, O_3 ne possède pas de pouvoir rémanent car il se décompose très rapidement. On associe souvent un poste de chloration à l'ozonation, en vue de faire face à une éventuelle contamination en aval de la station.

Le procédé de désinfection par l'ozone est onéreux : il nécessite une grosse dépense en énergie électrique laquelle est, par ailleurs, fortement dissipée sous forme de chaleur qui exige un refroidissement énergétique.

II.5.2.6. RAYONNEMENTS IONISANTS

Il s'agit là d'une technique d'avant garde, laquelle, si elle est déjà utilisée pour la conservation des aliments, n'en est qu'en phase d'étude dans un nombre limité d'installations de traitement d'eaux.

Les exigences technologiques d'une part, et les coûts élevés d'autre part, rendent ce procédé exceptionnel, quant à sa mise en œuvre.

La source radioactive est en général le cobalt 60.

Il faut remarquer que la désinfection précède la neutralisation ou la mise à l'équilibre calcocarbonique, pour au moins deux raisons :

- le pouvoir germicide d'un désinfectant est fonction du pH, comme il a été indiqué plus haut. Meilleur à pH de l'ordre de 6 à 7, le pouvoir germicide peut être gêné par une neutralisation.
- d'autre part, l'apport de désinfectant composé de calcium est susceptible de modifier, un tant soit peu, les données calcocarboniques de l'eau clarifiée.

Séquence III : **PROCEDES PARTICULIERS DE TRAITEMENT**

- **Objectif**

A l'issue de cette séquence, l'étudiant devra être capable de choisir parmi les traitements particuliers, ceux qui seront nécessaires et les mieux adaptés à une eau présentant des caractéristiques données.

- **Contenu de la séquence**

Chapitre I: Mise à l'équilibre calcocarbonique.

Chapitre II : Adoucissement par précipitation.

Chapitre III : Échanges ioniques.

Chapitre IV : Adsorption sur charbon actif.

Chapitre V : Élimination du fer et du manganèse.

Chapitre VI : Élimination des composés azotés.

Chapitre VII : Traitements divers.