

Modélisations de dimensionnement des stations d'épuration des eaux usées par lits bactériens

Mamisoa Lalaina RAZAFITSIATOSIKA

Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation

Equipe d'Accueil Doctorale : Ingénierie des Matériaux et des Matières Premières

Ecole Supérieure Polytechnique, Université d'Antananarivo

mtsiatosika@gmail.com

Marie Hanitriniaina RATSIMBA

Equipe d'Accueil Ingénierie des Matériaux et des Matières Premières

Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation

Ecole Supérieure Polytechnique, Université d'Antananarivo

marie.ratsimba@univ-antananarivo.mg

Rijalalaina RAKOTOSAONA

Equipe d'Accueil Ingénierie des Matériaux et des Matières Premières

Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation

Ecole Supérieure Polytechnique, Université d'Antananarivo

rijalalaina.rakotosaona@univ-antananarivo.mg

Auteur correspondant : Mamisoa Lalaina RAZAFITSIATOSIKA, mtsiatosika@gmail.com

Résumé

Les lits bactériens ont été l'un des premiers systèmes biologiques développés à la fin du XIXe siècle. Actuellement, les publications scientifiques récentes et les stations d'épuration par lits bactériens demeurent insuffisantes. À Madagascar, seules trois entreprises utilisent des stations d'épuration à lits bactériens : STAR Andraharo, Tropicknits et JB Analamahitsy. Les objectifs de notre étude sont de concevoir de nouveaux modèles à partir des modèles existants dans la littérature scientifique. La démarche à suivre consiste d'abord en une recherche et une synthèse bibliographiques, puis en la collecte des modèles existants de dimensionnement des lits bactériens, suivie de la conception de nouveaux modèles pour dimensionner ces lits. Enfin, ces nouveaux modèles seront comparés afin de retenir les meilleurs. Trois résultats ont été obtenus : les modèles de dimensionnement des lits bactériens existants, les concepts des modèles et les modèles retenus. Ces modèles retenus sont associés aux relations pertinentes. Les modèles de fonction exponentielle à base « e » sont largement utilisés par rapport aux autres. Ces modèles retenus seront intégrés dans le développement d'un logiciel de dimensionnement des stations d'épuration des eaux usées par lits bactériens.

Mots-clés :

Conception, dimensionnement, lits bactériens, logiciel, modèles, station d'épuration

Abstract

Bacterial beds were one of the first biological systems developed at the end of the 19th century. Currently, recent scientific publications and wastewater treatment plants using bacterial beds remain insufficient. In Madagascar, only three companies use wastewater treatment plants with bacterial beds: STAR Andraharo, Tropicknits, and JB Analamahitsy. The objectives of our study are to design new models based on existing models in the scientific literature. The approach consists first of conducting a literature review and synthesis, followed by the collection of existing models for dimensioning bacterial beds, and then the design of new models for dimensioning these beds. Finally, these new models will be compared to select the best ones. Three results were obtained: the existing bacterial bed dimensioning models, the concepts behind the models, and the models retained. These retained models are associated with relevant relationships. Exponential function models with base « e » are widely used compared to others. These retained models will be incorporated into the development of a design software for wastewater treatment plants using bacterial beds.

Keywords:

Bacterial beds, design, dimensioning, models, software, wastewater treatment plant.

1- Introduction

Historiquement, les lits bactériens ont été l'un des premiers systèmes biologiques développés à la fin du 19^e siècle pour traiter les eaux usées. Ce procédé consiste à faire supporter les micro-organismes épurateurs par des matériaux poreux comme la pouzzolane. Ces lits bactériens ont été parmi les premières techniques utilisées pour le traitement des eaux usées domestiques dans les agglomérations (Virloget, 2002), bien avant l'avènement des boues activées. L'eau à traiter est dispersée en tête de réacteur, et traverse le garnissage.

Aux États-Unis, le National Research Council a proposé un modèle empirique de dimensionnement des lits bactériens en 1946 (National Research Council, 1946). Cette recherche a ensuite été poursuivie par Velz en 1948 (Velz, 1948), Rankin en 1953 (Rankin, 1953), Fairall en 1956 (Fairall, 1956), K.L. Schulze en 1960 (Schulze, 1960), Eckenfelder en 1963 (Eckenfelder, 1963), Galler et Gotass des États-Unis en 1964 (Gallar and Gotaas, 1964), J. F. Roesler et Robert Smith en 1969 (Roesler and Smith, 1969), Triebel W/ATV, RFA en 1974 (Tchutchoua, 1990), Water Research Center en 1978 (Tchutchoua, 1990), J.A. Olieszkiewicz et S.A. Berquist en 1988 (Olieszkiewicz and Berquist, 1988), A. Morton et B. Auvermann en 2001 (Morton and Auvermann, 2001), ainsi que R.V. Marcos et al., en 2012 (Marcos et al., 2012).

En France, les lits bactériens représentaient environs les deux tiers des stations d'épuration en service en 1960 (Virloget, 2002). Cependant, ils ont progressivement été supplantés par des installations de boues

activées, d'abord en forte et moyenne charge, puis en faible charge ou aération prolongée. Ainsi, entre 1960 et 1970, ils ne représentaient plus qu'un tiers des installations construites (Virloget, 2002). En 1977, A.J. Drapeau et S. Jankovic ont publié une étude dans le Manuel de Microbiologie de l'Environnement, incluant des modélisations des lits bactériens (Drapeau et Jankovic, 1977). En 1984, L. Vandevenne (Vandevenne, 1984) a étudié les problèmes liés à la modélisation et au dimensionnement de l'épuration par lit bactérien aérobie. En 1986, C.S. Toure (Toure, 1986) a proposé des modèles de lits bactériens adaptés au climat sahélien. Entre 1989 et 1990, S.K. Tchutchoua (Tchutchoua, 1990) a exploité le modèle de C.S. Toure. Ces recherches ont ensuite été suivies et développées par J. Nicolas et J.L. Vasel en 1990 (Nicolas et Vasel, 1990), Y. Racault et F. Seguret en 2004 (Racault et Seguret, 2004), ainsi que C. Elomari et M. Zarrouk en 2020 (Elomari et Zarrouk, 2020).

Pour le cas de Madagascar, ces techniques de lits bactériens ne sont pas encore assez vulgarisées. Peu d'industries les appliquent pour traiter les eaux usées industrielles. Les communes qui les utilisent pour traiter les eaux usées urbaines sont encore des pionniers.

Dans le but d'optimiser ce procédé biologique, pour garantir une meilleure efficacité dans le traitement des eaux usées, l'objectif de notre étude est alors de concevoir de nouveaux modèles à partir des modèles existants dans la littérature scientifique. Cela contribuerait au développement de ces technologies de lits bactériens et permettrait d'enrichir les connaissances scientifiques dans ce domaine.

2- Méthodologie

La méthodologie repose sur les modélisations à partir de :

- Formules déduites par des expérimentations : ce sont les modélisations empiriques,
- Formules mathématiques et physiques : ce sont les modélisations analytiques.

La démarche à suivre consiste en une recherche et une synthèse bibliographiques dans un premier temps, puis en la collecte des modèles existants pour le dimensionnement des lits bactériens, suivie de la conception de nouveaux modèles. Enfin, ces nouveaux modèles seront comparés entre eux afin de retenir les meilleurs. Des données théoriques de dimensionnement du lit bactérien ont été utilisées (Tableau 2).

Nous avons collecté les modèles existants nécessaires dans les revues scientifiques des auteurs et des instituts. Ces modèles existants sont généralement basés sur des formules empiriques et analytiques. Le tableau 3 nous montre ces types de modèles avec les formules de modélisations.

Nous avons utilisé 33 modèles (Tableau 3) : 10 pour les modèles de fonction exponentielle de base «e», 4 pour les modèles de fonction exponentielle de base «10», 4 pour les modèles fractionnelles, 1 pour les modèles de Galler et Gotaas, 4 pour les modèles en fonction de rendement, 4 pour les modèles selon la charge volumique et la charge surfacique, et 6 pour les modèles du nombre d'Equivalent par Habitant. Les

modèles de fonction exponentielle de base « e » sont largement utilisés par rapport aux autres modèles, suivis des modèles du nombre d'Equivalent par Habitant. Les modèles de Galler et Gotaas sont les moins utilisés, car ils entraînent des surdimensionnements des bassins de lits bactériens par rapport aux autres modèles. Ces modèles de fonction exponentielle de base « e » nous permettent d'élaborer un nouveau modèle de fonction exponentielle de base « e ». Ces modèles incluent : ceux de Schulze, A. Morton et B. Auvermann, Marouane Merizak, Vandevenne, J. Nicolas et J.L. Vassel, le modèle Plug-Flow théorique, Kornegay et Andrew (1969), IRCHA, Bruce et Merkens (1973), DINEPA, ainsi que ceux de N. Bernet, Schulze-Germain, C.S. Toure, S.K. Tchutchoua et Velz.

Les modèles de fonction exponentielle de base « 10 » nous permettent de concevoir un nouveau modèle de fonction exponentielle de base « 10 ». Ces modèles sont: modèle de Velz (1948), modèle de R.V. Marcos et al., modèle de Roesler (1969), et modèles d'Olieszkiewicz et d'Eckenfelder (1975). Le modèle de Roesler est le mieux exploité pour l'élaboration de ce nouveau modèle car il est similaire au modèle de fonction exponentielle de base « e ».

Les modèles d'Eckenfelder, de Rankin, du Water Research Center et de la British Formula nous servent à la conception du modèle fractionnelle $\left(\frac{1}{n}\right)$. Les modèles d'Eckenfelder ont été exploités par A.J. Drapeau et S. Jankovic ainsi que par Marouane Merizak dans ses revues scientifiques. Les modèles de Rankin peuvent être utilisés pour un seul étage de lit bactérien et/ou deux étages de lit bactérien. Ces modèles peuvent être accompagnés des modèles du National Research Council (NRC) pour dimensionner les bassins des lits bactériens. Le modèle du Water Research Center est similaire au modèle de la British Formula, car cette dernière se présente comme une formule générale par rapport aux autres modèles. Si $k_{15^{\circ}\text{C}} = 0,0204$; $\theta = 1,111$; $m = 1,407$ et $n = 1,249$.

Les modèles de Galler et Gotaas proviennent des États-Unis en 1964. Ces modèles ont été exploités par P. Péringier et R.V. Marcos et al. Ils permettent d'élaborer le modèle fractionnelle.

Les modèles du National Research Council, de Fairall, des constructeurs pratiques et de Triebel W/ATV, RFA (1974), ainsi que ceux de Rincke, sont utilisés pour la conception des modèles en fonction de rendement (1- ρ). Les modèles du National Research Council sont largement utilisés par rapport aux autres. Ces modèles ont été exploités par A. J. Drapeau et S. Jankovic, P. Péringier, Edward C. Archer et R. Robinson, ainsi que par McGraw-Hill. Ils ont servi à élaborer de nouveaux modèles comme suit :

$$\rho = \frac{100}{1 + a \times \sqrt{\frac{P}{F \times V}}} \quad (1)$$

➤ Si $a = 0,0085$, on obtient ce modèle selon l'ouvrage d'A.J. Drapeau et S. Jankovic,

- $a = 0,443; P = C_{p1}; F \times V = V_1 \times F_1$, on obtient ce modèle selon l'ouvrage de P. Péringier
- $a = 0,0085; P = C_{p1}; F \times V = V_1 \times F_1$, on obtient ce modèle selon l'ouvrage d'Edward. C.

Archer et R. Robinson,

- $a = 0,0561; P = C_{p1}; F \times V = V_1 \times F_1$, on obtient ce modèle selon l'ouvrage de Mc. Graw Hill.

Le modèle de Fairall suit les modèles du National Research Council. Ce modèle est exploité par P. Péringier, ainsi que par A.J. Drapeau et S. Jankovic. P. Péringier utilise les unités en système métrique, tandis qu'A.J. Drapeau et S. Jankovic utilisent les unités anglo-saxonnes. Le modèle des constructeurs pratiques, ainsi que celui de Triebel W/ATV, RFA (1974) et Rincke, sont fonction de la charge organique volumique (C_V), c'est-à-dire que leurs rendements dépendent de cette charge organique volumique.

Nous avons exploité les modèles des constructeurs pratiques, DWA, National Research Council, Triebel W/ATV, RFA (1974) et Rincke, ainsi que ceux de Y. Racault et F. Seguret, et de F. Virloget pour concevoir les modèles basés sur la charge volumique et surfacique. Ces modèles permettent de déterminer le volume et la surface du lit bactérien. Les éléments importants dans ces modèles sont le débit brut (Q_o en m^3/j) de l'affluent (avant recyclage), la concentration initiale de substrat à l'entrée du lit en mg/l, la charge organique volumique appliquée ou nominale en $kgDBO_5/m^3V.j$, le taux de recyclage de l'effluent, et la charge hydraulique superficielle en m/j.

Les modèles suivants : Rhizopur, Azoé, Dimitri Xanthoulis, Seine et Marne 7, Sylvain Lemang, et l'Agence de l'eau Rhin-Meuse sont utilisés pour élaborer les modèles du nombre d'Equivalent par Habitant. Les éléments importants dans ces modèles sont le volume, la surface et le nombre d'Equivalent d'Habitant. Ces éléments nous permettent de calculer le volume ou la surface des lits bactériens par habitant.

3- Résultats et interprétations

3.1- Conception des nouveaux modèles

Selon les études menées par ces auteurs et ces instituts, nous avons élaboré de nouveaux modèles. Ces nouveaux modèles peuvent être présentés sous six (6) formes : modèles de fonction exponentielle de base « e » et « 10 », modèles fractionnelles, modèles en fonction de rendement, modèles selon la charge volumique et surfacique, et modèles d'Equivalent d'Habitant. Les éléments importants dans ces modèles sont le rapport de substrat final (S_t) sur le substrat entrant (S_o), la charge volumique, la charge surfacique, la charge hydraulique superficielle, le rendement, la surface, le volume et l'Equivalent d'habitant. Le tableau 4 présente les concepts des nouveaux modèles à partir des modèles existants.

3.2- Modèles retenus

Après conception des nouveaux modèles utilisés, nous avons comparé ces nouveaux modèles avec les résultats obtenus, afin de retenir les bons modèles et d'éliminer les modèles inutiles. Le tableau 5 présente les concepts d'un nouveau modèle et modèles retenus.

Nous avons retenu trois modèles : les modèles cinétiques de premier ordre, les modèles selon la charge volumique et la charge surfacique, et les modèles de nombre d'Equivalents par Habitant. Les modèles de Schulze et al., de Fairall, de Galler et Gotaas, et d'Eckenfelder ne sont pas retenus car ils sont les moins utilisés et conduisent à un surdimensionnement des bassins du lit bactérien. Les autres modèles sont retenus compte tenu de leurs précisions (*Modèle de Water Research Center, Modèles de Pratique des constructeurs, Modèles de fonction exponentielles, Modèles fractionnelles et Modèles en fonction de rendement*). Le tableau 6 montre les résultats de dimensionnements de lits bactérien de chaque modèle.

4- Discussion

4.1- Concepts des nouveaux modèles

4.1.1- Modèles de fonction exponentielle de base « e »

Si l'on observe les études réalisées par les auteurs et les instituts mentionnés ci-dessus concernant les modèles de fonction exponentielle de base « e », nous pouvons concevoir un nouveau modèle comme suit :

$$\frac{S_t}{S_o} = e^{-k_T \times A_s^b \times \frac{H^\alpha}{C_{hs}^n}} \quad (2)$$

Avec la valeur b varie de 0 à 1 ($0 \leq b \leq 1$). La valeur α est comprise entre 0 à 1 ($0 < \alpha \leq 1$). La valeur n désigne le coefficient de remplissage qui varie de 0 à 1 ($0 < n < 1$). Ce nouveau modèle est vérifié en comparant avec les modèles de fonction exponentielle de base « e » dans les revues scientifiques des auteurs et instituts mentionnés ci-dessus. À titre d'exemple :

➤ Si $b = 0$; $\alpha = 1$ et $n = 0,5$, on obtient les modèles de Schulze (Schulze, 1960), d'A. Morton et B. Auvermann (Morton and Auvermann, 2001), et de Marouane Merizak (Merizak, 2020) :

$$\frac{S_t}{S_o} = e^{\frac{-k_T \times H}{\sqrt{\frac{Q}{A}}}} \quad \text{avec } C_{hs} = \frac{Q}{A} \quad (3)$$

➤ Si $b = 1$; $\alpha = 1$ et $n = 1$, on obtient les modèles de Vandevenne (Vandevenne, 1984), de J.Nicolas et J.L.Vasel (Nicolas et Vasel, 1990), de Plug-Flow théorique (Péringier, 1997), Kornegay et Andrew, d'IRCHA (IRCHA , 1982), de Bruce et Merkens (Merizak, 2020) et al. :

$$\frac{S_t}{S_o} = e^{\frac{-k_T \times A_s \times H}{C_{hs}}} \quad (4)$$

➤ Si $b = 1$ et $\alpha = 1$, on obtient les modèles de DINEPA (DINEPA, 2012), de Nicolas Bernet (Bernet, 2012), d'A.Morton et B.Auvermann (Morton and Auvermann, 2001), et de Schulze-Germain (Schulze, 1960):

$$\text{➤ } \frac{S_t}{S_o} = e^{-k_T \times A_s \frac{H}{C_{hs}^n}} \quad (5)$$

➤ Si $b = 1$; la valeur (α) varie de 0,753 (quartz) et de 0,757 (latérite) et la valeur (n) varie de 0,727 (quartz) et de 0,711 (latérite). On obtient les modèles de C.S. Toure (Toure, 1986) et de S.K. Tchutchoua (Tchutchoua, 1990) :

$$\frac{S_t}{S_o} = e^{-k_T \times \frac{A_s \times H^\alpha}{C_{hs}^n}} \quad (6)$$

➤ Si $b = 1$; $\alpha = 1$ et l'inverse de la fonction exponentielle, on obtient le modèle de Velz (Velz, 1948):

$$\frac{S_t}{S_o} = \frac{1}{e^{\frac{k_T \times A_s \times H}{C_{hs}^n}}} \quad (7)$$

4.1.2- Modèles de fonction exponentielle de base « 10 »

Nous avons conçu ces modèles à partir des arguments suivants :

➤ À partir de modèles existants : ceux de Velz (Velz, 1948), de R.V. Marcos et al., (Marcos et al., 2012), de Roesler (Roesler and Smith, 1969), et d'Olieszkiewicz et d'Eckenfelder (Olieszkiewicz and Berquist, 1988). Nous avons choisi le modèle de Roesler suivant :

$$\frac{S_t}{S_o} = 10^{-k_T \times A_s \frac{H}{C_{hs}^n}} \text{ avec } n = 0.91 - \frac{21.48}{A_s} \quad (8)$$

Ce nouveau modèle est vérifié en comparant avec les modèles de fonction exponentielle de base « 10 » dans les revues scientifiques des auteurs et instituts mentionnés dans le tableau 3. A titre exemple :

❖ Si $\frac{L_D}{L} = \frac{S_t}{S_o}$; $K' = k_T \times A_s$; $D = H$ et $n = 0$, on obtient le modèle de Velz (Velz, 1948). On remarque que la notation D désigne la profondeur ou la hauteur du lit bactérien en pieds.

❖ Si $\frac{L_D}{L} = \frac{S_t}{S_o}$; $K' = k_T \times A_s$; $\frac{D}{0,3048} = H$ et $n = 0$, on obtient le modèle de R.V.Marcos et al., (Marcos et al., 2012). On remarque que la notation H désigne la profondeur ou la hauteur du lit bactérien en mètres. Une foot (pied) est égale à 0,3048 mètre.

❖ Si $\frac{S_t}{S_x} = \frac{S_t}{S_o}$; $K = k_T \times A_s$ et $C_{va} = \frac{C_{hs} \times S_a}{H}$ avec $S_a = 1 \text{ mg/l}$ et $C_{hv} = C_{va}$, on obtient les modèles d'Olieszkiewicz et d'Eckenfelder (Olieszkiewicz and Berquist, 1988).

➤ À partir de la comparaison des logarithmes népériens : la différence entre le logarithme népérien et le logarithme de base « 10 » est de 2,303. En effet, nous avons conçu le nouveau modèle de fonction exponentielle de base « 10 » comme suit :

$$\frac{S_t}{S_o} = \frac{10^{-k_T \times A_s \frac{H}{C_{hs}^n}}}{10^{2.303}} = 10^{-k_T \times A_s \frac{H}{C_{hs}^n - 2.303}} \quad (9)$$

4.1.3- Modèles fractionnelles $\left(\frac{1}{n}\right)$

D'après les modèles d'Eckenfelder (Eckenfelder, 1961), de Rankin (Rankin, 1953), du Water Research Center (Péringier, 1997) et de la British Formula (Morton and Auvermann, 2001), nous avons conçu le nouveau modèle suivant :

$$\frac{S_t}{S_o} = \frac{1}{n} \quad (10)$$

Ce modèle varie selon la valeur de n dans les revues scientifiques.

➤ Pour le modèle d'Eckenfelder :

❖ Si $n = ,01 + 0,025 \left(\frac{D^{0,67}}{C_{hs}^{0,5}}\right)$, on obtient ce modèle selon l'ouvrage d'A.J.Drapeau et S.Jankovic (Drapeau et Jankovic, 1977),

❖ Si $n = 1 + \frac{C \times H^{(1-m)}}{(C_{hs}/A)^n}$, on obtient ce modèle selon l'ouvrage de Marouane Merizak (Merizak, 2020)

➤ Pour le modèle de Rankin (Rankin, 1953) :

❖ Si $n = 3 + 2r$, on obtient ce modèle dans le seul étage du lit bactérien.

❖ Si $n = 2 + 2r$, on obtient ce modèle dans les deux étages du lit bactérien.

➤ Si $n = 1 + 0,0204 \times 1,111^{(T-15)} \times \frac{A_s^{1,407}}{C_{hv}^{1,249}}$, on obtient le modèle Water Research Center (Péringier, 1997),

➤ si $n = 1 + k_{15^\circ C} \theta^{T-15} \times \frac{A_s^m}{C_{hv}^n}$, on obtient le modèle de British Formula (Morton and Auvermann, 2001).

4.1.4- Modèle en fonction de rendement

Ce modèle est élaboré à partir de ceux du National Research Council (National Research Council, 1946), de Fairall (Fairall, 1956), de la Pratique des constructeurs (Péringier, 1997), ainsi que de Triebel W/ATV, RFA (1974) et Rincke (Tchutchoua, 1990 ; Péringier, 1997). Il se présente sous la forme suivante :

$$\frac{S_t}{S_o} = 1 - \rho \quad (11)$$

Le rendement ρ varie selon les auteurs des revues scientifiques. A titre exemple :

➤ Pour le modèle de National Research Council (National Research Council, 1946) :

❖ si $\rho = \frac{100}{1+0,0085\sqrt{\frac{P}{F \times V}}}$, on obtient ce modèle selon l'ouvrage d'A.J.Drapeau et S. Jankovic (Drapeau et

Jankovic, 1977),

❖ Si $\rho = \frac{100}{1+0,443\sqrt{\frac{C_{p1}}{V_1 \times F_1}}}$, on obtient ce modèle selon l'ouvrage de P. Péringier (Péringier, 1997)

❖ Si $\rho = \frac{1}{1+0,0085\sqrt{\frac{C_{p1}}{V_1 \times F_1}}}$, on obtient ce modèle selon l'ouvrage d'Edward. C. Archer et R. Robinson

(Henrich et Marggraff, 2020),

❖ si $\rho = \frac{100}{1+0,0561\sqrt{\frac{C_{p1}}{V_1 \times F_1}}}$, on obtient ce modèle selon l'ouvrage de MC. Graw Hill Education (Graw

Hill Education, 2021).

➤ Pour le modèle de Fairall (Fairall, 1956) :

❖ si $\rho = 5.62 \frac{V}{C_{hs}} (1+r)^{-0.444}$, on obtient ce modèle de l'ouvrage de P. Péringier (Péringier, 1997)

❖ Si $\rho = 1 - 1,1 \times \left(\frac{V}{Q}\right)^{-0,32}$, on obtient ce modèle de l'ouvrage d'A.J.Drapeau et S.Jankovic

(Drapeau et Jankovic, 1977).

➤ Si $\rho = \frac{K}{C_V}$, on obtient le modèle de Pratique des constructeurs (Péringier, 1997).

➤ Si $\rho = 0.93 - 0.17 \times C_V$, on obtient le modèle de Triebel W/ATV, RFA (1974) et Rincke (Tchutchoua, 1990).

4.1.5- Modèles selon la charge volumique et la charge surfacique

Nous avons conçu les modèles selon la charge volumique et surfacique à partir des modèles suivants : Pratique des constructeurs (Péringier, 1997), DWA (DWA, 2019), National Research Council (National Research Council, 1946), Triebel W/ATV, RFA (1974) et Rincke (Péringier, 1997), Y. Racault et F. Seguret (Racault et Seguret, 2004), F. Virloget (Virloget, 2002), etc. Les formules associées à ces modèles sont présentées comme suit :

$$V = \frac{Q_o \cdot S_o}{C_V} \text{ et } A = \frac{Q_o (1+r)}{C_{hs}} \quad (12)$$

Pour le volume, nous avons retenu ce modèle car il regroupe plusieurs modèles existants :

Pratique des constructeurs (Péringier, 1997), National Research Council (National Research Council, 1946) et Triebel W/ATV, RFA (1974) et Rincke (Péringier, 1997) : Ces modèles nous donnent la formule suivante, que nous retenons pour la conception.

➤ DWA (DWA, 2019), qui se présente comme suit :

$$V = \frac{L_o}{C_V} \text{ avec } L_o = Q_o \cdot S_o \quad (13)$$

- Y. Racault et F. Seguret (Racault et Seguret, 2004) : le modèle proposé est le suivant :

$$V = \frac{24 \times Q_h \times C_{DBO,1}}{C_V} \text{ avec } Q_o = 24 \times Q_h \text{ et } S_o = C_{DBO,1} \quad (14)$$

- F. Virloget (Virloget, 2002), qui se présente comme-suit :

$$V = \frac{A_e}{A_s} = \frac{L_o}{A_s \times C_s} \text{ avec } L_o = Q_o \cdot S_o \text{ et } C_V = A_s \times C_s \quad (15)$$

Dans ces modèles, le volume varie en fonction de la charge organique volumique appliquée. Si on conserve les mêmes valeurs pour le débit brut et la concentration de substrat initial à l'entrée du lit bactérien, nous obtenons les résultats suivants :

- Si $C_V = \frac{K \times S_o}{S_o - S_t}$ et $K = \frac{k_T \times A_s}{\text{jour}}$, on obtient le modèle Pratique des constructeurs (Péringier, 1997),

➤ Si $C_V = \left(\frac{1-\rho}{0,443\rho} \right)^2 \times f$ avec $f = \frac{1+r}{(0,1r+1)^2}$, on obtient le modèle de National Research Council (National Research Council, 1946),

➤ Si $C_V = \frac{0,93-\rho}{0,17}$ avec $\rho = 1 - \frac{S_t}{S_o}$, on obtient le modèle de Triebel W/ATV,RFA et Rincke (Péringier, 1997)

Pour la surface, nous avons retenu ce modèle car il regroupe plusieurs autres modèles existants :

➤ Y. Racault et F. Seguret (Racault et Seguret, 2004) et F. Virloget (Virloget, 2002) qui fournissent une approche similaire pour la détermination de la surface,

- DWA (DWA, 2019), qui se présente selon le modèle suivant :

$$A_T \leq \frac{Q_{h,max} \times (1 + RV)}{C_{hs}} \text{ avec } Q_{h,max} = Q_o \text{ et } RV = r \quad (16)$$

Avec RV : Rapport ou taux de reflux et $Q_{h,max}$: Débit horaire maximal d'évacuation des eaux usées en m³/h.

4.1.6- Modèles de nombre d'Equivalent par Habitant

Nous avons conçu les modèles de nombre d'Equivalent par Habitant (EH) à partir des modèles suivants : Rhizopur (Prost-Boucle et Molle, 2013), Azoé (Prost-Boucle et Molle, 2013), Dimitri Xanthoulis (Xanthoulis, 2004), Seine et Marne 7 (Seine et Marne 7, 2014), Sylvain Lemang (Lemang, 2001), Agence de l'eau Rhin-Meuse (Agence de l'eau Rhin-Meuse, 2007), etc. Les formules de types de ces modèles sont présentées comme suit :

$$V_{/EH} = \frac{V}{n_{EH}} \text{ et } A_{/EH} = \frac{A}{n_{EH}} \quad (17)$$

Le volume Equivalent par Habitant varie de 0.04 à 0.15m³/EH, et la surface par Habitant est comprise entre 0.01 à 5m²/EH. A titre exemple :

- Si le volume par habitant varie de 0.043 à 0.075m³/EH, on obtient le modèle d'Azoe (Prost-Boucle et Molle, 2013),
- Si le volume par habitant varie de 0.04 à 0.15m³/EH, on obtient le modèle de Rhizopur (Prost-Boucle et Molle, 2013),
- Si la surface par habitant est de 0.01m²/EH (plastique) et de 0.016m²/EH (traditionnel), on obtient le modèle de Sylvain Lemang (Lemang, 2001).
- Si la surface par habitant varie de 2 à 3m²/EH, on obtient le modèle de Dimitri Xanthoulis (Xanthoulis, 2004),
- Si la surface par habitant varie de 1 à 5m²/EH, on obtient le modèle de Seine et Marne 7 (Seine et Marne 7, 2014) et de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse (Agence de l'eau Rhin-Meuse, 2007).

4.2- Modèles élaborés et retenues

Tout d'abord, nous avons élaboré les modèles cinétiques de premier ordre à partir de quatre nouveaux types de modèles, tels que : les modèles de fonction exponentielle de base « e » et de base « 10 », les modèles fractionnelles, et les modèles en fonction de rendement (1-ρ). Ces modèles cinétiques nous permettent d'exprimer le rapport entre le substrat final (St) et le substrat entrant (So) comme suit :

$$\frac{S_t}{S_o} = p \quad (18)$$

Le terme p varie selon les cas suivants :

- Si $p = e^{-k_T \times A_s \frac{H^\alpha}{C_{hs}^n}}$, on obtient de modèles de fonction exponentielle de base « e »,
- Si $p = 10^{-k_T \times A_s \frac{H}{C_{hs}^n}}$, on obtient des modèles de fonction exponentielle de base « 10 »,
- Si $p = \frac{1}{n}$, on obtient les modèles fractionnelles,
- Si $p = 1 - \rho$, on obtient les modèles en fonction de rendement.

Ensuite, ces modèles cinétiques sont associés aux relations des modèles de charge volumique et surfacique. Les modèles de fonction exponentielle permettent de calculer la charge hydraulique, si la hauteur du lit bactérien est fixée. Les modèles de charge volumique et surfacique permettent de calculer la surface totale du lit bactérien. Les modèles avec un rendement réduit sont utilisés pour calculer la charge organique volumique. Ces modèles de charge volumique et surfacique permettent ainsi de calculer le volume total du lit bactérien.

Enfin, la surface et le volume totaux du lit bactérien nous permettent de calculer la surface et le volume de lit bactérien par nombre d'habitants dans les modèles de nombre d'Equivalents par Habitant. Le nombre d'Equivalents est la donnée de base. Ces modèles retenus sont utilisés dans le développement d'un logiciel de dimensionnement des stations d'épuration des eaux usées par lits bactériens.

5- Conclusion

Pour conclure, cet article présente les différentes modélisations de dimensionnement des lits bactériens existantes, en précisant les auteurs et les instituts qui les ont développées, ainsi que les conceptions des nouveaux modèles retenus. Les modèles sélectionnés sont les modèles cinétiques, les modèles de charge volumique et surfacique, ainsi que les modèles d'Equivalents d'Habitant. Les modèles cinétiques sont basés sur des formules empiriques de type $\frac{S_t}{S_o} = p$, qui représentent le rapport de la concentration du substrat effluent par rapport à l'affluent. Ce terme varie selon les auteurs, les instituts et leurs modèles. Il permet de démontrer une relation exponentielle en fonction de différentes bases (comme la base « e » ou la base « 10 »), et inclut des facteurs tels que le nombre d'habitants $\left(\frac{1}{n}\right)$ et le rendement $(1 - \rho)$, entre autres. Ces modèles cinétiques sont associés aux modèles de charge volumique et surfacique. Les modèles exponentiels permettent de calculer la charge hydraulique, tandis que les modèles de charge surfacique permettent de déterminer la surface totale du lit bactérien. Les modèles à rendement réduit servent à calculer la charge organique volumique. En utilisant ces modèles de charge volumique, on peut ainsi calculer le volume total du lit bactérien. Une fois que l'on connaît la surface et le volume totaux du lit bactérien, il est possible de calculer la surface et le volume de lit bactérien par nombre d'habitants, selon les modèles d'Equivalents par Habitant. Le nombre d'Equivalents est la donnée de base dans ces modèles. Ces approches sont désormais intégrées dans le développement d'un logiciel de dimensionnement pour les stations d'épuration des eaux usées utilisant des lits bactériens.

6- Remerciements

À l'issue de cet article, nous remercions toutes les personnes ayant contribué à sa réalisation, en particulier les co-auteurs. Nous exprimons également notre gratitude à l'*International Journal of Engineering, Sciences and Technologies* (IJEST) pour avoir accepté de publier ce travail.

7- Références bibliographiques

Référence d'article

[1] Eckenfelder, W. W. (1961). Trickling filtration design and performance. *In Journal of the Sanitary Engineering Division, American Society of Civil Engineers*, 87, 2860.

- [2] Gallar, W.S., & Gotaas, H.B. (1964). Optimization Analysis for Biological Filter Design. *In Journal of the Sanitary Engineering Division, American Society of Civil Engineers*, 92(SA1),163.
- [3] Henrich, C.D., & Marggraff, M. (2020). Energy-efficient Wastewater Reuse-The Renaissance of Trickling Filter Technology (12p.). Germany.
- [4] Marcos, R.V et al. (2012). Wastewater Treatment in Trickling Filters using luffa cyllindrica as biofilm supporting medium. *In Journal of Urban and Environmental Engineering*, 6(2), 57–66. Brazil.
- [5] McGraw-Hill Education. (2021). Design of a trickling filter using the NRC equations. *In Access Engineering*. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781259586859/toc-chapter>
- [6] Morton, A., & Auvermann, B. (2001). Comparison of Plastic Trickling Filter Media for the Treatment of Swine Lagoon Effluent. *In The Society for engineering in agricultural, food, and biological systems*. Paper Number: 01-2286: 10. California-USA: An ASAE Meeting Presentation.
- [7] Nicolas, J., & Vasel, J.L. (1990). Modélisation des échanges thermiques et de la circulation d'air dans un lit bactérien. *In Revue des sciences de l'eau/Journal of waster science*. 3 (3): 303-344. Québec: INRS-Eau.
- [8] Rankin, R. J. (1953). Performance of biofiltration plants by three methods. *In Journal of the Sanitary Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 79(336): 1–15.
- [9] Schulze, K.L. (1960). Load and Efficiency of Trickling Filters. *In Journal of the Water Pollution Control Fed.*, 32(3): 245-261.
- [10] Velz, J. (1948). A basic law for the performance of biological beds. *In Sewage Works Journal*, 20(4), 607–617.

Référence de mémoire et de thèse

- [11] Elomari, C., & Zarrouk, M. (2020). Transformation d'une station d'épuration type lagunage aéré en lits bactériens ou boues activées : Cas de la station de Tamesna (Mémoire de fin d'études, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II). Université de Lorraine.
- [12] Lemang, S. (2001). Guide Technique pour l'assainissement des communes rurales (Rapport de stage, D.E.S.S. Génie des procédés de traitements des eaux). Université des sciences et Technologies de Lille.
- [13] Merizak, M. (2020). Elaboration d'un logiciel de dimensionnement des lits bactériens au Maroc (Mémoire de fin d'étude). Université de Maroc.
- [14] Péringer, P. (1997). Contribution à l'optimalisation d'un système à biomasse fixée de traitement d'eaux résiduaires urbaines appliqué à des effluents industriels contenant des composés récalcitrants (Thèse de doctorat, École polytechnique fédérale de Lausanne [EPFL]). Lausanne, Suisse : EPFL.

- [15] Tchutchoua, S.K. (1990). Contribution à l'étude des performances de la filière lit bactérien bassin de maturation dans la STEP E.I.E.R (Mémoire de fin d'études). Université des Sciences et Technologies de Lille.
- [16] Toure, C.S. (1986). Elimination de la pollution carbonée dans deux réacteurs à biomasse fixée sur support de latérite et quartz en conditions climatiques tropicales et sahéniennes (Thèse de doctorant). Université de Lausanne.
- [17] Xanthoulis, D. (2004). Systèmes d'épuration de petites tailles. ASBL Epuvaleur, Université de Gembloux.

Ouvrage d'auteur(s)

- [18] Bernet, N. (2012). Lit bactérien. In *Traitement biologique des eaux usées* (pp. 41–45). Narbonne, France : INRA - Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement.
- [19] Drapeau, A. J., & Jankovic, S. (1977). Manuel de microbiologie de l'environnement (pp. 158–172). Genève, Suisse : Organisation mondiale de la Santé (OMS).
- [20] Eckenfelder, W.W. (1963). Trickling Filtration Design and Performance. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 128(III), 371.
- [21] Fairall, J.M. (1956). Correlation of Trickling Filter Data. *Sewage and Industrial Wastes*, 28(8): 1069.
- [22] Olieszkiewicz, J. A., & Berquist, S. A. (1988). Low temperature nitrogen removal in sequencing batch reactors. *Water Research*, 22(9) : 1163-1171.
- [23] Prost-Boucle, S., & Molle, P. (2013). Rapport final, office national de l'eau et des milieux aquatiques. Synthèse sur le procédé Azoé (Rapport de 44pages). Lyon, France : EPNAC, Onema-Irstea.
- [24] Racault, Y., & Séguret, F. (2004). Éléments de conception et de dimensionnement des lits bactériens (Document de stage CNFPT, 18 p.). Toulouse, France : Cemagref Bordeaux, UR Qualité des Eaux.
- [25] Roesler, J. F., & Smith, R. (1969). A mathematical model for a trickling filter (Treatment Optimization Research Program).
- [26] Vandevenne, L. (1984). Problèmes liés à la modélisation et au dimensionnement de l'épuration par lit bactérien aérobie. *37th International Congress Cebedeau*, 21–49.
- [27] Virloget, F. (2002). Les lits bactériens. In *Traitement des eaux usées urbaines* (pp. 219–236). Lyon, France : Lyonnaise des eaux, Cirsee-Enges.

Ouvrages d'instituts

- [28] Agence de l'eau Rhin-Meuse. (2007). Procédés d'épuration des petites collectivités du bassin Rhin-Meuse : Éléments de comparaison techniques et économiques (173 p.). France : Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables.
- [29] DINEPA. (2012). Procédés de traitement des eaux usées adaptés aux petites communautés moins de 5000 personnes raccordées au réseau public d'assainissement (Fascicule Technique, Code 2.3.1 FAT1, pp.69-75). Haïti : République de Haïti.
- [30] DWA. (2019). Principes d'utilisation des petites installations de traitement des eaux usées (Fiche de travail DWA-A 221, pp.39-40). Allemagne : Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfal.
- [31] IRCHA. (1982). Etude sur la mise en œuvre des nouveaux garnissages pour les lits bactériens en traitement traditionnel des eaux usées domestiques (Document n°8925/L27/pub-LA/fc-A.9124, 45p). France: Agence Financière de Bassin Rhin-Meuse.
- [32] National Research Council. (1946). Subcommittee Report, Sewage Treatment at Military Installations. *Sewage Works Journal*, 18 : 791, U.S.A : NRC.
- [33] Seine et Marne 7. (2014). Lit bactérien. *Assainissement collectif, Fiche technique 2* : 1-2.

8- Tableaux

Tableau 1 : Notation et nomenclature

Lettres latines		
Notation	Désignations	Unités
A	: Surface totale du lit bactérien	m^2
C	: Coefficients d'Eckenfelder	$[-]$
D	: Profondeur du lit bactérien	<i>feet</i>
EH	: Equivalent d'Habitant	<i>hab.</i>
F	: Facteur de recirculation	$[-]$
H	: Hauteur du lit bactérien	m
K	: Coefficient de traitabilité qui dépend de la nature des eaux traitées	$k_T \times A_s/j$
L	: DBO ₅ restante mais assimilable dans l'affluent au lit bactérien	mg/l
P	: Livres de DBO ₅ d'eau d'égout décantée appliquées par jour	<i>Livres DBO₅/j</i>
Q	: Débit apparent de l'affluent	m^3/j ou $mgaj/j$
RV	: Rapport de reflux ou taux de reflux	$[-]$
T	: Température des Eaux usées	$^{\circ}C$
TRH	: Temps de Résidence Hydraulique	j
V	: Volume total utile du lit bactérien en m^3	m^3 ou <i>acrefoot</i>
K'	: Constante	$[-]$
C_{va}	: Charge hydraulique apparent	$kgDBO/m^3V/j$
$A_{/EH}$: Surface par habitant	m^2/EH
A_T	: Surface théorique du lit bactérien	m^2
A_e	: Surface effective du support ou Surface développée nécessaire	m^2
A_s	: Surface spécifique mouillée du garnissage	m^2/m^3
C_{hs}	: Charge hydraulique superficielle	m/j
C_{hv}	: Charge hydraulique volumique	$m^3/m^3V/j$
$C_{DBO,1}$: Concentration en DBO soluble et particulaire de l'effluent à traiter	mg/l
C_V	: Charge organique volumique appliquée ou nominale	$kgDBO_5/m^3V.j$
C_{p1}	: Charge polluante à un seul étage	kg/j
C_s	: Charge surfacique	$g/m^2.j$

F_1	: Facteur adimensionnel de recirculation à un seul étage	[–]
L_D	: DBO ₅ restante mais assimilable à la profondeur D	mg/l
L_o	: Charge polluante (DBO ₅) journalière à l'arrivée de l'étage biologique	kg/j
$Q_{h,max}$: Débit horaire maximal d'évacuation des eaux usées	m ³ /h ou l/s
Q_{mj}	: Débit moyen journalier, temps sec	m ³ /j
Q_o	: Débit brut de l'affluent (avant recyclage)	m ³ /j
S_a	: DBO de l'effluent du lit, y compris la recirculation (entrée)	mg/l
S_o	: Concentration de substrat initial à l'entrée du lit bactérien	mg/l
S_t	: Concentration en substrat final (DBO _{5t}) à la sortie du lit bactérien	mg/l
St_1	: Concentration de DBO ₅ à un seul étage de lit bactérien	mg/l
St_2	: Concentration de DBO ₅ à deux étages de lit bactérien	mg/l
S_x	: DBO ₅ de l'effluent du lit en temps x	mg/l
$V_{/EH}$: Volume par habitant	m ³ /EH
V_1	: Volume du lit bactérien à un seul étage	m ³
$k_{15^\circ C}$: Taux de réaction à 15°C	m/j
k_{20}	: Coefficient cinétique d'épuration à 20°C	[–]
k_T	: Coefficient cinétique corrigée	m/j
n_{EH}	: Nombre par habitant	[–]
a	: Filter radius de Modèles de Galler et Gotaas	m
f	: Facteur de pondération ou de recirculation	[–]
n	: Nombre entier de modèle un sur nombre	[–]
p	: Rapport de $\frac{S_t}{S_o}$	[–]
r	: Taux de recirculation	[–]
Lettres grecques		
α	: Valeur d'exposant sur la hauteur	[–]
ε	: Taux de vide	[–]
θ	: Facteur ou coefficient de correction de température	[–]
ρ	: Rendement d'épuration normalisé	[–]
Exposants utilisés		
b	: Exposant sur la surface spécifique	[–]

m, n	: Coefficients recommandé d'Eckenfelder ou British Formula	[–]
n	: Nombre de particules ou constante ou Coefficient de remplissage	[–]

Tableau 2 : Données théoriques utiles en modélisation

Désignations	Notations	Valeurs	Unités
Concentration de substrat initial à l'entrée du lit bactérien	S_o	618,812	mg/l
Concentration en substrat final à la sortie du lit bactérien	S_t	129,95 ou 123,76	mg/l
[DBO ₅] de l'effluent du lit, y compris la recirculation	S_a	374,38	mg/l
Coefficient cinétique corrigée	k_T	0,0178	m/j
Surface spécifique mouillée du garnissage	A_s	125	m ² /m ³
Hauteur du lit bactérien	H	0,32	m
Exposant sur la surface spécifique	b	$0 \leq b \leq 1$	[–]
Valeur d'exposant sur la hauteur	α	$0 < \alpha \leq 1$	[–]
Coefficient de remplissage	n	$0 < n < 1$	[–]
Débit moyen journalier, temps sec	Q_{mj}	0,02828	m ³ /j
Taux de vide	ε	0,9	[–]
Coefficients d'Eckenfelder	C	1,2	[–]
Coefficients recommandé d'Eckenfelder	$1 - m$	0,67	[–]
Taux de recirculation	r	1	[–]
Rendement d'épuration normalisé	ρ	0,79 ou 0,80	[–]
Facteur de recirculation	F	1,65	[–]
Charge polluante	C_p	0,0175	kg/j
Température des Eaux usées	T	13	°C
Coefficients recommandé Water Research Center	m	1,407	[–]
Coefficients recommandé Water Research Center	n	1,249	[–]
Coefficient de traitabilité	K	2,225	k _T × A _s /j

Tableau 3 : Types de modèles correspondant aux formules de modélisations

Types des Modèles	Formules des modélisations
I. Modèles de fonction exponentielle	
1. Modèle de Schulze (Schulze, 1960)	$\frac{S_t}{S_o} = e^{\frac{-k_T \times H}{\sqrt{\frac{Q}{A}}}} \text{ avec } C_{hs} = \frac{Q}{A} \quad (19)$
2. Modèles d'A.Morton et B.Auvermann (Morton and Auvermann, 2001), et de Marouane Merizak (Merizak, 2020)	$\frac{S_t}{S_a} = e^{\frac{-k_T \times H}{\sqrt{C_{hs}}}} = e^{\frac{-k_T \times H \times A_s^0}{C_{hs}^{0,5}}} \quad (20)$
3. Modèles de Vandevenne (Vandevenne, 1984), de J.Nicolas et J.L.Vasel et al. (Nicolas et Vasel, 1990)	$\frac{S_t}{S_o} = e^{\frac{-k_T \times A_s \times H}{C_{hs}}} \quad (21)$
4. Modèle Plug-Flow théorique, Kornegay et Andrew (Péringier, 1997)	$\frac{S_t}{S_o} = e^{-\frac{k_T \times A_s \times TRH}{\varepsilon}} = e^{\frac{-k_T \times A_s \times H}{C_{hs}}} \text{ avec } \frac{H}{C_{hs}} = \frac{TRH}{\varepsilon} \quad (22)$
5. Modèle d'IRCHA (IRCHA, 1982)	$\frac{S_t}{S_o} = e^{\frac{-k_T}{C_s}} = e^{-k_T \times \frac{A_s}{C_{hv}}} = e^{\frac{-k_T \times A_s \times H}{C_{hs}}} \text{ avec } C_{hv} = \frac{C_{hs}}{H} \quad (23)$
6. Modèles de Bruce et Merkens (Merizak, 2020)	$\frac{S_t}{S_o} = e^{\frac{-k_{15^\circ C} \times \theta^{(T-15)} \times A_s}{\frac{Q}{V}}} = e^{\frac{-k_T \times A_s \times H}{C_{hs}}} \text{ avec } \frac{Q}{V} = \frac{C_{hs}}{H} \quad (24)$
7. Modèles de DINEPA (DINEPA, 2012) et de Nicolas Bernet (Bernet, 2012)	$\frac{S_t}{S_o} = e^{-k_T \times A_s \times \frac{H}{C_{hs}^n}} \quad (7)$
8. Modèles d'A.Morton et B.Auvermann (Morton and Auvermann, 2001), et de Schulze-Germain (Schulze, 1960)	$\frac{S_t}{S_a} = e^{\frac{-k_{20} \times H}{C_{hs}^n}} = e^{\frac{-k_T \times A_s \times H}{C_{hs}^n}} \text{ avec } k_{20} = k_T \times A_s \quad (25)$
9. Modèles de C.S. Toure (Toure, 1986) et de S.K.Tchutchoua (Tchutchoua, 1990)	<p>❖ Garnissage de latérite (ou brique):</p> $\frac{S_t}{S_o} = e^{-0,0083 \times 1,04^{(T-29)} \times \frac{A_s \times H^{0,757}}{C_{hs}^{0,711}}} \quad (26)$ <p>❖ Garnissage de quartz :</p>

	$\frac{S_t}{S_o} = e^{-0,00911 \times 1,053^{(T-20)} \times \frac{A_s \times H^{0,753}}{C_{hs}^{0,727}}} \quad (27)$
10. Modèle de Velz (Velz, 1948)	$\frac{S_t}{S_o} = \frac{1}{e^{\frac{k_{20} \times A_s \times H \times \theta^{T-20}}{C_{hs}^n}}} \quad (28)$
11. Modèle de Velz (Velz, 1948)	$\frac{L_D}{L} = 10^{-K'D} \text{ avec } K' = k_T \times A_s \quad (29)$
12. Modèle de R.V.Marcos et al., (Marcos et al., 2012)	$\frac{L_D}{L} = 10^{-\frac{K' \times D}{0,3048}} \text{ avec } K' = k_T \times A_s \text{ et } H = \frac{D}{0,3048} \quad (30)$
13. Modèle de Roesler (Roesler and Smith, 1969)	$\frac{S_t}{S_o} = 10^{-k_T \times A_s \frac{H}{C_{hs}^n}} \text{ avec } n = 0,91 - \frac{21,48}{A_s} \quad (31)$
14. Modèles d'Olieszkiewicz et d'Eckenfelder (1975) (Olieszkiewicz and Berquist, 1988)	$\frac{S_t}{S_x} = 10^{-\frac{K}{C_{va}}} \text{ avec } K = k_T \times A_s, C_{va} = \frac{C_{hs} \times S_a}{H} \quad (32)$
II. Modèles fractionnels	
15. Modèle d'Eckenfelder (Eckenfelder, 1961)	<p>❖ A.J.Drapeau et S.Jankovic (Drapeau et Jankovic, 1977) :</p> $\frac{S_t}{S_o} = \frac{1}{0,01 + 0,025 \left(\frac{D^{0,67}}{C_{hs}^{0,5}} \right)} \quad (33)$ <p>❖ Marouane Merizak (Merizak, 2020) :</p> $\frac{S_t}{S_a} = \frac{1}{1 + \frac{C \times H^{(1-m)}}{(C_{hs}/A)^n}} \quad (34)$
16. Modèle de Rankin (Rankin, 1953)	<p>❖ Un seul étage de lit bactérien :</p> $\frac{S_t}{S_o} = \frac{1}{(3 + 2r)} \quad (35)$ <p>❖ Deux étages de lit bactérien :</p> $\frac{St_1}{S_o} = 0,5 \text{ et } \frac{St_2}{St_1} = \frac{1}{2 + 2r} \quad (19)$
17. Modèle Water Research Center (WRC,1978) (Péringier, 1997)	$\frac{S_t}{S_o} = \frac{1}{1 + 0,0204 \times 1,111^{(T-15)} \times \frac{A_s^{1,407}}{C_{hv}^{1,249}}} \quad (36)$
18. Modèle de British Formula (Morton and Auvermann, 2001)	$\frac{S_t}{S_o} = \frac{1}{1 + k_{15^\circ C} \theta^{T-15} \times \frac{A_s^m}{C_{hv}^n}} \quad (37)$

III. Modèles de Galler et Gotaas

19. Modèles de Galler et Gotaas, USA (Gallar and Gotaas, 1964)

P. Péringier (Péringier, 1997):

$$S_t = \frac{0.468 \cdot S_a^{1.19} \cdot C_{hs}^{0.13} (1+r)^{0.28}}{\left(1 + \frac{H}{0.3}\right)^{0.67} T^{0.15}} \quad (38)$$

❖ R.V. Marcos et al., (Marcos et al., 2012):

$$S_t = \frac{0,1577K(QS_o + rS_t)^{1.19}}{(Q+r)^{0.78} \left(1 + \frac{H}{0.3048}\right)^{0.67} a^{0.25}} \quad (39)$$

IV. Modèles en fonction de rendement

20. Modèle de National Research Council (National Research Council, 1946)

❖ A.J. Drapeau et S. Jankovic (Drapeau et Jankovic, 1977):

$$\rho = \frac{100}{1 + 0,0085 \sqrt{\frac{P}{F \times V}}} \text{ avec } F = \frac{1+r}{[1 + (1-f)r]^2} \quad (40)$$

P.Péringier (Péringier, 1997):

$$\rho = 1 - \frac{S_t}{S_o} = \frac{100}{1 + 0,443 \times \sqrt{\frac{C_{p1}}{V_1 \times F_1}}} \quad (41)$$

❖ Edward. C. Archer et R. Robinson (Henrich et Marggraff, 2020) :

$$\rho = 1 - \frac{S_t}{S_o} = \frac{1}{1 + 0,0085 \times \sqrt{\frac{C_{p1}}{V_1 \times F_1}}} \quad (42)$$

❖ MC. Graw Hill Education (Graw Hill Education, 2021) :

$$\rho = 1 - \frac{S_t}{S_o} = \frac{100}{1 + 0,0561 \times \sqrt{\frac{C_{p1}}{V_1 \times F_1}}} \quad (43)$$

21. Modèle de Fairall (Fairall, 1956)

P. Péringier (Péringier, 1997):

$$\frac{S_t}{S_o} = 1 - \rho = 1 - 5.62 \frac{V}{C_{hs}} (1+r)^{-0.444} \quad (44)$$

❖ A.J. Drapeau et S. Jankovic (Drapeau et Jankovic, 1977):

$$\frac{S_t}{S_o} = 1 - \rho = 1,1 \times \left(\frac{V}{Q}\right)^{-0,32} = 1,1 \times \left(\frac{1}{C_{hv}}\right)^{-0,32} \quad (45)$$

22. Modèle Pratique des constructeurs (Péringier, 1997)	$\rho = \frac{K}{C_V} \text{ avec } K = \frac{k_T \times A_s}{\text{jour}} \text{ et } V = \frac{Q_o \cdot S_o}{C_V} \quad (46)$
23. Modèle de Triebel W/ATV,RFA(1974) et Rincke (Péringier, 1997)	$\rho = 1 - \frac{S_t}{S_o} = 0.93 - 0.17 \times C_V \text{ et } V = \frac{Q_o \cdot S_o}{C_V} \quad (47)$
V. Modèles selon les charges volumique et surfacique	
24. Modèle de DWA (DWA, 2019)	$V = \frac{L_o}{C_V} \text{ avec } L_o = Q_o \cdot S_o \text{ et } A_T \leq \frac{Q_{h,max} \times (1+RV)}{C_{hs}} \quad (48)$
25. Modèle National Research Council (National Research Council, 1946)	$V = \frac{Q_o \times S_o}{C_V}; C_V = \left(\frac{1 - \rho}{0,443\rho} \right)^2 \times f; f = \frac{1 + r}{(0.1r + 1)^2} \quad (49)$
26. Modèle d' Y. Racault et F. Seguret (Racault et Seguret, 2004)	$A = \frac{Q_o (1 + r)}{C_{hs}} \text{ et } V = \frac{24 \times Q_o \times C_{DBO,1}}{C_V} \quad (50)$
27. Modèle F.Virloget (Virloget, 2002)	$A = \frac{Q_o (1 + r)}{C_{hs}} \text{ et } V = \frac{A_e}{A_s} \text{ avec } A_e = \frac{L_o}{C_s} \quad (51)$
VI. Modèles d'Equivalent d'Habitant	
28. Modèle de Rhizopur (Prost-Boucle et P. Molle, 2013)	$V_{/EH} = \frac{V}{n_{EH}} \quad (0,04 \text{ à } 0,15m^3/EH) \text{ et } A_{/EH} = \frac{A}{n_{EH}} \quad (52)$
29. Modèle d'Azoé (Prost-Boucle et P. Molle, 2013)	$V_{/EH} = \frac{V}{n_{EH}} \quad (0,043 \text{ à } 0,075m^3/EH) \text{ et } A_{/EH} = \frac{A}{n_{EH}} \quad (53)$
30. Modèle de Dimitri Xanthoulis (Xanthoulis, 2004)	$V_{/EH} = \frac{V}{n_{EH}} \text{ et } A_{/EH} = \frac{A}{n_{EH}} \quad (2 \text{ à } 3m^2/EH) \quad (54)$
31. Modèle de Seine et Marne 7 (Seine et Marne 7, 2014)	$A_{/EH} = \frac{A}{n_{EH}} \quad (1 \text{ à } 5m^2/EH) \quad (39)$
32. Modèle de Sylvain Lemang (Lemang, 2001)	$V_{/EH} = \frac{V}{n_{EH}} \text{ et } A_{/EH} = \frac{A}{n_{EH}} \quad (0.016m^2/EH: \text{ traditionnel}) \quad (55)$
33. Modèle de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse (Agence de l'eau Rhin-Meuse, 2007)	$A_{/EH} = \frac{A}{n_{EH}} \quad (1 \text{ à } 5m^2/EH_{50}) \quad (56)$

Tableau 4 : Concepts des nouveaux modèles à partir des modèles existants

Types des Modèles	Formules des modélisations	Données calculées
1. Modèles de fonction exponentielle de base « e »	$\frac{S_t}{S_o} = e^{-k_T \times A_s \frac{H^\alpha}{C_{hs}^n}} \quad (57)$	Charge hydraulique C_{hs}

2. Modèles de fonction exponentielle de base «10»	$\frac{S_t}{S_o} = \frac{10^{-k_T \times A_s \frac{H}{C_{hs}^n}}}{10^{2.303}} \quad (58)$	Charge hydraulique C_{hs}
3. Modèles fractionnelles $\left(\frac{1}{n}\right)$	$\frac{S_t}{S_o} = \frac{1}{n} \quad (60)$	Charge hydraulique C_{hs} et volumique C_{hv}
4. Modèles en fonction de rendement	$\frac{S_t}{S_o} = 1 - \rho \quad (61)$	Charge volumique C_V
5. Modèles selon la charge volumique et la charge surfacique	$V = \frac{Q_o \cdot S_o}{C_V} \text{ et } A = \frac{Q_o (1 + r)}{C_{hs}} \quad (62)$	Volume et Surface du lit bactérien
6. Modèles de nombre d'Equivalent par Habitant	$V_{/EH} = \frac{V}{n_{EH}} \text{ et } A_{/EH} = \frac{A}{n_{EH}} \quad (63)$	Volume et Surface du lit par Equivalent d'Habitant

Tableau 5: Concepts de nouveau modèle et modèles retenus

Types des Modèles	Formules des modélisations	Données calculées
1. Modèles cinétiques de première ordre	$\frac{S_t}{S_o} = p \quad (64)$	Charge hydraulique C_{hs} et volumique C_{hv} , C_V .
2. Modèles selon la charge volumique et la charge surfacique	$V = \frac{Q_o \cdot S_o}{C_V} \text{ et } A = \frac{Q_o (1 + r)}{C_{hs}} \quad (65)$	Volume et Surface du lit bactérien
3. Modèles de nombre d'Equivalent par Habitant	$V_{/EH} = \frac{V}{n_{EH}} \text{ et } A_{/EH} = \frac{A}{n_{EH}} \quad (66)$	Volume et Surface du lit par Equivalent d'Habitant

Tableau 6 : Résultats de dimensionnements des lits bactériens de chaque modèles

Modèles	$C_{hs}(m/j)$	$C_{hv}(m^3/m^3/j)$	$C_V(kg/m^3 \cdot j)$	$A(m^2)$	$V(m^3)$	$TRH(j)$
Modèles de fonction exponentielles						
1.Schulze et al.	1,33x10 ⁻⁵	4,20x10 ⁻⁵	2,58x10 ⁻⁵	2123	679,362	21620,44
2.Vandevenne et al.	0,456	1,426	0,882	0,062	0,020	0,631
3.DINEPA et al.	0,345	1,079	0,668	0,082	0,026	0,834
4.C.S.Toure et al (Quartz)	0,500	1,564	0,968	0,057	0,018	0,576
5.C.S.Toure et al (Latérite)	0,490	1,530	0,947	0,058	0,018	0,589
6.Velz	0,345	1,079	0,668	0,082	0,026	0,834
7.Fonction de base "10"	0,345	1,079	0,668	0,082	0,026	0,834
Modèles fractionnels						

8.Eckenfelder	0,088	0,276	0,171	0,320	0,102	3,258
9.Rankin	0,482	1,507	0,933	0,057	0,019	0,597
10.Water Research Center	1,014	3,167	1,960	0,028	0,009	0,284
Modèles en fonction de rendement						
11.National Research Council	0,308	0,962	0,595	0,092	0,029	0,936
12.Modèle de Fairall	0,002	0,006	0,004	15,623	4,999	159,098
13.Pratique des constructeurs	1,456	4,551	2,816	0,019	0,006	0,198
14.Triebel	0,426	1,331	0,824	0,066	0,021	0,676
15.Galler et Gotaas	0,062	0,1924	0,119	0,460	0,147	4,679