

Guide pour l'étude des technologies conventionnelles de traitement des eaux usées d'origine domestique

12. Système d'aération – Préliminaire

Coordination et rédaction

Cette publication a été réalisée par la Direction des eaux usées municipales (DEUM) du ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP). Elle a été produite par la Direction des communications du MELCCFP.

Renseignements

Téléphone : 418 521-3830
1 800 561-1616 (sans frais)

Formulaire : www.environnement.gouv.qc.ca/formulaires/renseignements.asp
Internet : www.environnement.gouv.qc.ca

Pour obtenir un exemplaire du document :

Visitez notre site Web : www.environnement.gouv.qc.ca

Dépôt légal – 2023
Bibliothèque et Archives nationales du Québec

Tous droits réservés pour tous les pays.

© Gouvernement du Québec – 2023

Table des matières

Liste des tableaux	12-iv
Liste des figures	12-v
Remerciements	12-vi
12. Système d'aération	12-1
12.1 Conditions de conception	12-3
12.1.1 Demande en oxygène	12-3
12.1.2 Température	12-3
12.1.3 Redondance	12-3
12.1.4 Fonction de mélange	12-4
12.2 Dimensionnement	12-5
12.2.1 Facteurs influant sur le transfert d'oxygène	12-5
12.2.2 Détermination des besoins réels en oxygène (AOR)	12-9
12.2.3 Taux de transfert d'oxygène aux conditions du procédé (OTR_F)	12-10
12.2.4 Nombre d'appareils d'aération	12-15
12.2.5 Efficacité énergétique	12-15
12.3 Équipements d'aération	12-16
12.3.1 Aérateurs mécaniques	12-16
12.3.2 Aérateurs par diffusion d'air	12-19
12.3.3 Surpresseurs	12-24
12.4 Installation	12-30
12.5 Références bibliographiques	12-31

Liste des tableaux

Tableau 12.1.2-1 – Température typique des eaux usées selon le procédé de traitement	12-3
Tableau 12.2.1-1 – Concentrations minimales d’oxygène dissous (C_L) à viser dans l’eau selon le procédé de traitement.....	12-8
Tableau 12.2.1-2 – Facteurs de correction	12-9
Tableau 12.2.2-1 – AOR selon le procédé de traitement.....	12-10
Tableau 12.2.3-1 – Sigles utilisés dans les calculs d’aération selon les conditions retenues .	12-11
Tableau 12.2.3-2 – Concentration d’oxygène dissous à saturation en eau claire (salinité nulle) à une pression de 1 atm (niveau de la mer) en fonction de la température	12-14
Tableau 12.3.1-1 – Informations générales et données techniques de différents aérateurs mécaniques.....	12-18
Tableau 12.3.2-1 – Informations générales et données techniques de différents diffuseurs ..	12-23
Tableau 12.3.3-1 – Informations générales et données techniques de différents surpresseurs .	12-25
Tableau 12.3.3-2 – Vitesses dans les conduites de distribution.....	12-27
Tableau 12.3.3-3 – Valeur type de coefficient de conversion (C) pour différents accessoires de tuyauterie.....	12-28
Tableau 12.3.3-4 – Pertes de charge singulières typiques causées par les accessoires de surpresseur	12-29

Liste des figures

Figure 12.1.1-1 – Relation entre les unités psia, psig et atm _____	12-2
Figure 12.3.1-1 – Exemples d'aérateurs mécaniques _____	12-17
Figure 12.3.2-1 – Exemples d'appareils d'aération à diffusion d'air _____	12-20
Figure 12.3.2-2 – Exemples de disposition des diffuseurs _____	12-21
Figure 12.3.2-3 – Diffuseurs à jets _____	12-22
Figure 12.3.3-1 – Surpresseurs _____	12-24

PRÉLIMINAIRE

Remerciements

Équipe de rédaction de FNX-INNOV

Marc-André Desjardins, ing., Ph. D. – chargé de projet

Justine Duguet, ing., M. Sc. A. – chargée de projet adjointe et coordonnatrice

Et les autres ingénieurs du Service de traitement des eaux de FNX-INNOV.

Équipe de révision du MELCCFP

Héloïse Bastien, ing., M. Sc. A. – DEUM – chargée de projet

Bernard Lavallée, ing., Ph. D. – DEUM

Bernard Patry, ing., Ph. D. – DPEU

Experts consultés (par ordre alphabétique de nom de famille)

Marie-Christine Bélanger et les autres membres de l'équipe de Premier Tech

Yves Comeau, ing., Ph. D. – Polytechnique Montréal

Alain Roy, ing., M. Ing. et Dorothée Benoit, ing. – MAMH

PRÉLIMINAIRE

12. Système d'aération

Les procédés biologiques aérobies requièrent de l'aération pour subvenir aux besoins en oxygène de la biomasse. L'oxygène peut être fourni par aération naturelle ou par aération artificielle. L'aération naturelle repose sur les échanges entre l'air atmosphérique et la surface de l'eau ainsi que sur la photosynthèse si des plantes aquatiques sont présentes dans le procédé. Hormis les étangs non aérés et la plupart des marais artificiels, l'oxygénation des procédés biologiques à écoulement continu est réalisée par aération artificielle. Les procédés biologiques à alimentation intermittente comme les FIE et les FIR sont aérés naturellement par un effet d'alternance :

1. l'air prend place dans les vides laissés après la percolation de l'affluent au travers du milieu filtrant;
2. l'air est ensuite expulsé du filtre par la poussée de l'eau lorsqu'une nouvelle cuvée d'affluent est envoyée à sa surface.

Le présent chapitre porte sur l'aération artificielle. Elle est réalisée à l'aide de différentes combinaisons d'équipements qui composent un système d'aération. Il en existe deux types : les systèmes d'aération mécanique et les systèmes d'aération par diffusion d'air.

Leurs composantes assurent les fonctions suivantes :

- surpression de l'air ;
- transport et distribution de l'air ;
- transfert de l'oxygène à l'eau ;
- mélange de l'eau.

À noter que les pressions d'air sont exprimées avec différentes unités :

- psi (livre par pouce carré);

Il s'agit d'une unité américaine (impériale) utilisée par les manufacturiers qui peut se décomposer en plusieurs autres :

- psia : mesure de pression absolue;
- psig : mesure de pression par rapport à la pression atmosphérique.

La Figure 12.1.1-1 schématise les relations entre celles-ci.

- m CE (mètre de colonne d'eau);
- atm (atmosphère);
- Pa ($= \text{N/m}^2 = \text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$);
- bar.

Les conversions suivantes s'appliquent :

- 1,0 m CE = 1,422 psi = 9,807 kPa
- 1,0 atm = 0 psig = 14,7 psia = 101,3 kPa = 10,33 m CE

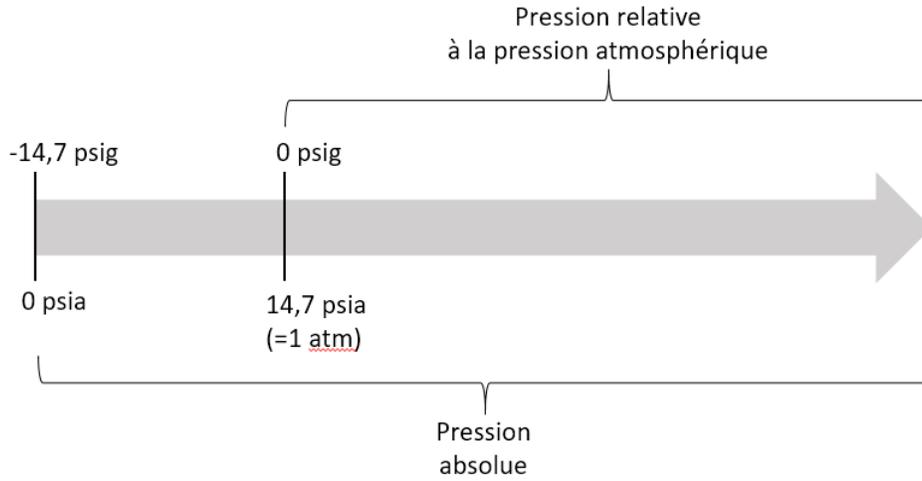


Figure 12.1.1-1 – Relation entre les unités psia, psig et atm

PRÉLIMINAIRE

12.1 Conditions de conception

12.1.1 Demande en oxygène

La demande en oxygène fluctue en fonction de l'activité de la biomasse qui dépend de la quantité de substrat présente dans l'affluent (débits et charges) mais aussi de la température (ralentissement à basse température).

Le système d'aération devrait être conçu de façon à pouvoir ajuster la quantité d'air fournie dans un réacteur en fonction des variations de la demande en oxygène. Il devrait couvrir les besoins en oxygène en période de pointe d'activité de la biomasse (charge maximale avec une température d'eau élevée) et être en mesure de fournir à la demande en oxygène minimale sans ou avec le minimum de perte d'énergie. Il faut viser l'optimisation énergétique et favoriser l'utilisation adéquate des plages d'exploitation des équipements d'aération. Par exemple, on peut prévoir la fermeture de certaines composantes lorsque la demande en oxygène est plus faible. Pour cela, il peut être nécessaire de sélectionner des unités de surpression de différentes capacités ou plusieurs petites unités pour pouvoir s'accommoder aux écarts entre les demandes minimale, moyenne et maximale. Cet aspect est particulièrement important pour les procédés où la température de l'eau peut atteindre de très basses valeurs (jusqu'à 0,5 °C en hiver) comme les étangs aérés, car l'activité biologique limitée réduit considérablement la demande en oxygène. L'optimisation énergétique apparaît toutefois plus difficile dans les petites installations.

12.1.2 Température

La température de l'air atmosphérique prélevé par les unités de surpression peut varier de 30 °C (été) à -30 °C (hiver).

La température de l'eau varie en fonction des saisons et selon le type de procédé de traitement. Le Tableau 12.1.2-1 présente les températures des eaux usées typiquement observées avec différents procédés. Dans le cas d'une station d'épuration existante, la compilation des données de suivi permet d'affiner la plage de températures à utiliser pour la conception si la température de l'eau est relevée régulièrement.

Tableau 12.1.2-1 – Température typique des eaux usées selon le procédé de traitement

	Hiver	Printemps	Été	Automne
Étangs aérés	0,5 °C	4 °C	16 °C (vérification à faire à 25 °C)	4 °C
Étangs aérés complètement mélangés	3 °C	5 °C	25 °C	5 °C
Procédés biologiques mécanisés	6 °C à 10 °C	s. o.	25 °C	s. o.

12.1.3 Redondance

L'aération est une fonction critique du système de traitement. Il faut pouvoir compter sur une unité de surpression à des fins de redondance pour pallier les pannes ou les bris et permettre l'entretien périodique du système sans interrompre le traitement.

Le système d'aération devrait être en mesure de répondre à la demande maximale même si la plus grosse unité de surpression est à l'arrêt (MOE, 2008).

12.1.4 Fonction de mélange

Les systèmes d'aération peuvent également avoir à assurer une fonction de mélange, par exemple pour maintenir les solides en suspension dans un réacteur. En plus de prévoir les besoins en oxygène, il faut alors vérifier si la capacité du système d'aération est suffisante pour assurer des conditions adéquates de mélange dans les bassins selon les besoins du procédé (voir section 4.4.7 ainsi que les chapitres relatifs aux procédés de traitement).

PRÉLIMINAIRE

12.2 Dimensionnement

Le dimensionnement du système d'aération consiste à déterminer le nombre d'appareils requis pour fournir l'oxygène dissous nécessaire au bon fonctionnement du procédé biologique. La conception repose sur des calculs de transfert d'oxygène et de demande en oxygène.

12.2.1 Facteurs influant sur le transfert d'oxygène

Le transfert d'oxygène est affecté par plusieurs facteurs :

- Les caractéristiques de l'eau à traiter et du site.
- Les caractéristiques physiques des installations.
- Les conditions d'exploitation des procédés.

Le taux de transfert massique d'oxygène peut être modélisé par l'équation générale suivante :

Équation 12.01 :
$$\text{OTR} = K_L a V (C_s - C_L)$$

où :

OTR : taux de transfert massique d'oxygène (*oxygen transfert rate*) (kg O₂/h);

K_{La} : coefficient de transfert volumétrique global (h⁻¹);

V : volume du bassin (m³);

C_s : concentration à saturation d'oxygène dissous (kg/m³);

C_L : concentration d'oxygène dissous dans le liquide (kg/m³).

12.2.1.1 Caractéristiques de l'eau à traiter et du site

Les principales caractéristiques de l'eau à traiter et du site qui influent sur le transfert d'oxygène sont :

- le coefficient de transfert volumétrique global (K_{La});
- la concentration à saturation d'oxygène dissous (C_s).

12.2.1.1.1 Coefficient de transfert volumétrique global (K_{La})

Le coefficient de transfert volumétrique global (K_{La}) d'un aérateur est évalué en eau claire dans des conditions standard (à 20 °C). Toutefois, les eaux usées ne sont pas des eaux claires. Elles contiennent notamment des solides dissous qui entraînent une résistance au transfert de l'oxygène à l'interface air-eau ainsi qu'une résistance à la diffusion de l'oxygène dans l'eau (HQ, 1996). Pour tenir compte de ces phénomènes, on utilise le facteur de correction α :

Équation 12.02 :
$$\alpha = \frac{K_{La} \text{ eau usée}}{K_{La} \text{ eau claire}}$$

Le facteur de correction α dépend également du type d'appareil d'aération et de la concentration de biomasse (M&EA, 2014). En effet, la valeur de la constante α diminue entre autres avec :

- une augmentation de la concentration de MES;
- une réduction du temps de rétention des boues (cas des boues activées);
- une réduction de la taille des bulles.

Des valeurs typiques de la constante α sont fournies au Tableau 12.2.1-2. La valeur de α devrait être vérifiée auprès du fabricant du système d'aération.

La température de l'eau influe par ailleurs sur d'autres caractéristiques comme la viscosité, la tension de surface et la diffusion, qui se répercutent sur le coefficient K_{La} :

Équation 12.03 :
$$K_{La(T)} = K_{La(20^\circ\text{C})} \theta^{(T-20)}$$

où :

$K_{La(T)}$ et $K_{La(20^\circ\text{C})}$: coefficient de transfert volumétrique global à la température T et à 20°C (h^{-1});
 θ : coefficient de température de l'eau (adimensionnel);
T : température de l'eau (°C).

La valeur normalement utilisée pour le facteur de correction θ du K_{La} en eaux usées est de 1,024 aussi bien pour les appareils d'aération mécanique que de diffusion d'air (Qasim et Zhu, 2018).

12.2.1.1.2 Concentration à saturation d'oxygène dissous (C_s)

La nature de l'eau influence la concentration à saturation d'oxygène dissous (C_s) (HQ, 1996). Pour en tenir compte, on utilise le facteur de correction β :

Équation 12.04 :
$$\beta = \frac{C_s \text{ eau usée}}{C_s \text{ eau claire}}$$

Dans le cas d'un système d'aération par diffusion d'air, la valeur du facteur de correction β se situe entre 0,8 et 1,0, pour une valeur typique de 0,95 (Qasim et Zhu, 2018). Avec un aérateur mécanique, on retient habituellement une valeur de 1,0 (Qasim et Zhu, 2018). Des valeurs typiques de la constante β sont fournies au Tableau 12.2.1-2. La valeur de β devrait être vérifiée auprès du fabricant du système d'aération.

La température de l'eau et la pression barométrique altèrent également la valeur de C_s (HQ, 1996). Plus la température de l'eau est basse, plus la concentration d'oxygène dissous à saturation (C_s) est élevée. Pour tenir compte de l'effet de la pression barométrique du site, on applique un facteur de correction Ω . Il peut être calculé à l'aide de l'équation suivante pour des bassins de moins de 6 mètres de profondeur (WEF, 1988) situés à une altitude inférieure à 600 m et pour une température de moins de 35 °C :

Équation 12.05 :
$$\Omega = \frac{P_b}{P_s} = \exp\left(\frac{-g M_{\text{air}} z}{RT}\right)$$

où :

Ω : facteur de correction selon la pression barométrique;
 P_b : pression barométrique du site (kPa);
 P_s : pression standard (au niveau de la mer) (101,3 kPa);
g : accélération gravitationnelle (9,81 m/s^2);
 M_{air} : masse molaire de l'air ($28,97 \cdot 10^{-3}$ kg/mol);
z : altitude du site (m);
R : constante des gaz parfaits (8,314 $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$);
T : température (K).

12.2.1.2 Caractéristiques physiques des installations

Les principales caractéristiques physiques des installations qui influent sur le transfert d'oxygène sont (HQ, 1996) :

- la géométrie des bassins ;
- le type d'appareils d'aération ;
- la disposition des appareils d'aération.

12.2.1.2.1 Géométrie des bassins

La profondeur d'immersion des diffuseurs d'air est le facteur ayant le plus grand effet sur l'efficacité du transfert d'oxygène. L'augmentation de la profondeur de relâche de l'air (DWD) augmente simultanément la pression partielle de l'oxygène et le temps de contact entre la phase liquide et la phase gazeuse (HQ, 1996). L'augmentation de la pression partielle accroît la concentration d'oxygène dissous à l'interface des bulles d'air, conformément à la loi de Henry, alors que l'augmentation du temps de contact assure le transfert d'une plus grande quantité d'oxygène en provenance des bulles d'air (HQ, 1996). Ainsi, le K_{La} augmente avec la profondeur de relâche des bulles. Dans le cas d'un système d'aération par diffusion d'air, on peut utiliser la formule suivante (Qasim et Zhu, 2018) :

Équation 12.06 :
$$\frac{(K_{La})_{DWD_1}}{(K_{La})_{DWD_2}} = \left(\frac{DWD_1}{DWD_2}\right)^n$$

où :

$K_{La_{DWD_1}}$ et $K_{La_{DWD_2}}$: coefficient de transfert volumétrique global à DWD_1 et DWD_2 (h^{-1});

DWD_1 et DWD_2 : profondeurs de relâche de l'air (m);

n : exposant (adimensionnel, valeur typique de 0,7 pour la plupart des systèmes).

La forme des bassins (rectangulaire, circulaire) peut, dans une moindre mesure, influencer sur le transfert d'oxygène, car elle peut avoir un effet sur l'hydraulique de mélange et modifier les performances des appareils d'aération (HQ, 1996).

12.2.1.2.2 Type d'appareils d'aération

Les appareils d'aération présentent des caractéristiques différentes. En général, plus les appareils génèrent des bulles de petites dimensions, plus ils présentent une efficacité de transfert élevée. La réduction de la dimension des bulles entraîne une augmentation de la surface d'échange pour un même volume d'air ainsi qu'une réduction de la vitesse ascensionnelle des bulles, ce qui offre un plus long temps de contact (HQ, 1996).

Avec le temps, les appareils d'aération submergés peuvent se colmater ou se détériorer et ainsi perdre de leur efficacité de transfert. Il est généralement nécessaire de nettoyer ou de remplacer périodiquement certaines composantes, telles que les membranes des diffuseurs. On utilise un facteur de correction F dans les calculs d'aération pour tenir compte de la perte graduelle d'efficacité de transfert (HQ, 1996), notamment dans les systèmes par diffusion d'air de type fines bulles.

12.2.1.2.3 Disposition des appareils d'aération

La disposition des appareils d'aération peut créer un régime hydraulique favorable au transfert d'oxygène. Une augmentation de la densité de diffuseurs (nombre de diffuseurs par unité de surface de plancher) accroît généralement l'efficacité de transfert du système d'aération, car l'air est distribué plus uniformément, et le mélange est plus efficace (HQ, 1996).

12.2.1.3 Conditions d'exploitation des procédés

Selon le procédé et ses objectifs de traitement (enlèvement de la matière organique, nitrification ou les deux), la concentration minimale d'oxygène dissous à maintenir dans l'eau (C_L) peut varier. Le Tableau 12.2.1-1 résume les valeurs de C_L présentées dans les chapitres relatifs aux procédés de traitement selon les conditions de débit (moyenne et de pointe).

Tableau 12.2.1-1 – Concentrations minimales d'oxygène dissous (C_L) à viser dans l'eau selon le procédé de traitement

Procédé	Objectif de traitement	Concentration minimale en O ₂ (mg/l)		Référence
		Conditions moyennes	Conditions de pointe	
Étang aéré	Enlèvement de la matière organique	2,0		Section 9.2.2.4
Étang aéré complètement mélangé	Enlèvement de la matière organique	2,0		Section 9.4.4.4
Boues activées	Enlèvement de la matière organique	2,0	0,5	Section 10.3.2
	Si nitrification	4,0	2,0	
Procédé AB	Étape A	1,0		Section 10.4.3
	Étape B	similaire à un procédé de boues activées avec nitrification		
Réacteur biologique à garnissage en suspension (RBGS) et Procédé hybride de boues activées à garnissage intégré (BAGI)	Enlèvement de la matière organique	2,0		Sections 11.3.3.2 et 11.4.3.2
	Si nitrification	4,0 à 6,0		
Réacteur biologique rotatif	Enlèvement de la matière organique ou nitrification	> 2,0		Section 11.5.3.7
Biofiltre	Enlèvement de la matière organique	2,0		Section 11.6.3.6
	Si nitrification	3,0 - 4,0		

12.2.1.4 Valeurs types des facteurs de correction

La valeur des facteurs α , β et F devraient être vérifiées auprès des fabricants des systèmes d'aération. Le Tableau 12.2.1-2 regroupe les valeurs des facteurs de correction indiquées dans la littérature.

Les valeurs du produit αF mesurées dans des stations municipales aux États-Unis s'étendent entre 0,1 et 0,7 pour une moyenne d'environ 0,4 dans le cas des boues activées à diffuseurs poreux. Dans le cas des réacteurs biologiques membranaires, la concentration élevée de MES dans la liqueur mixte altère le transfert d'oxygène en réduisant davantage la constante α (WEF, 2006). En ce qui concerne les étangs aérés, la valeur de α augmente graduellement de la première à la dernière cellule.

Tableau 12.2.1-2 – Facteurs de correction

Appareil	α		β	F
	Cas des boues activées	Cas d'un RBM		
Aérateur mécanique de surface	0,6 - 0,8		0,95 - 0,99	1,00
Aérateur mécanique submergé	0,6 - 0,8		0,95 - 0,99	1,00
Aérateur statique	0,6 - 0,8		0,95 - 0,99	1,00
Diffuseurs à grosses bulles	0,6 - 0,9		de 0,75 dans la première cellule à 0,90 dans la dernière cellule ^A	1,00
Diffuseurs à moyennes bulles			0,95 - 0,99	
Diffuseurs à fines bulles (membranes)	0,5 - 0,7 (p. ex. 0,53 pour TRB = 10 d 0,60 pour TRB = 20 d 0,65 pour TRB = 30 d)	0,47 pour MLSS = 8000 mg/l	de 0,60 dans la première cellule à 0,90 dans la dernière cellule ^A	0,80 - 0,99 _B
Diffuseurs à fines bulles (corps poreux)	0,4 - 0,6	0,35 pour MLSS = 12 000 mg/l	0,95 - 0,99	0,80 - 0,99 _B
Diffuseurs à jets	0,6 - 0,8		0,95 - 0,99	1,00

^A S'il y a plus de deux étangs (ou cellules) en série, on fixe une valeur intermédiaire pour les cellules centrales. Par exemple, la valeur sera de 0,825 pour un système à moyennes ou grosses bulles dans l'étang 2 s'il y a trois étangs. S'il y a 4 étangs, la valeur pour un système à moyennes ou grosses bulles sera respectivement de 0,80 et 0,85 pour les étangs 2 et 3. Il faut procéder de la même façon pour un système à fines bulles.

^B Variable selon la durée d'exploitation considérée

Sources : Hydro-Québec (1996), M&EA (2014), Qasim et Zhu (2018).

12.2.2 Détermination des besoins réels en oxygène (AOR)

Les besoins réels en oxygène dits AOR (*actual oxygen requirement*) correspondent à la demande en oxygène du procédé dans les conditions réelles d'exploitation. Dans le cas d'eaux usées d'origine domestique, ces besoins sont divisés en deux types : la demande carbonée (enlèvement de la matière organique) et la demande azotée (nitrification).

Selon les procédés, le calcul de l'AOR se fait à l'aide d'un ratio empirique ou à l'aide d'équations. Le Tableau 12.2.2-1 rappelle les AOR de différents procédés biologiques présentés dans le Guide. Le détail des calculs ou des valeurs empiriques est fourni dans les chapitres traitant de ces technologies de traitement.

Tableau 12.2.2-1 – AOR selon le procédé de traitement

Procédé	Type de demande	AOR	Section de référence
Étangs aérés	C	1,5 à 2,25 g d'O ₂ /g de DBO ₅ enlevée selon les conditions (hiver, printemps et été)	9.2.2.4.1
	N	4,57 g d'O ₂ /g de NTK appliqué	9.2.2.4.2
Boues activées	C	$AOR = Q (S_0 - S_e) - B (1 + f_d k_d \theta_C) \frac{Y (S_0 - S_e)}{(1 + k_d \theta_C)} \frac{Q}{1000}$	10.3.2
	N	$AOR = 4,57 Q (N_0 - N_e) - 2,86 (N_0 - N_e - NO_{3e}) - B f_v P_{X,AOB}$	
Biofiltration	C	$AOR_C = Q Y_{O_2} S_0$	11.6.3.6
	N	$AOR_N = 4,57 Q N_{0,nit}$	

12.2.3 Taux de transfert d'oxygène aux conditions du procédé (OTR_F)

12.2.3.1 Données techniques exprimées aux conditions standard

Peu importe les équipements considérés, le taux de transfert d'oxygène avec ceux-ci est basé sur des résultats d'essais de rendement en eau claire. Ces essais devraient respecter la procédure correspondant à des conditions de mélange complet comme elle a été définie par l'ASCE en 1984 et révisée en 1992 (*A Standard for the Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water*). Généralement, les résultats de ces essais sont consignés dans un rapport signé par un ingénieur.

Les données techniques des appareils d'aération transmises par les fournisseurs sont exprimées en fonction de conditions standard. La définition des conditions standard peut varier selon les fournisseurs. Elles correspondent typiquement aux suivantes : 20 °C, 1 atm et 36 % d'humidité (HQ, 1996). C'est la définition appliquée dans le présent guide.

Dans le cas des aérateurs mécaniques, les fournisseurs transmettent généralement le taux de transfert d'oxygène standard (SOTR, *standard oxygen transfert rate*), exprimé en kg O₂/h.

Avec les aérateurs par diffusion d'air, on transmet plutôt l'efficacité standard de transfert d'oxygène (SOTE, *standard oxygen transfert efficiency*) ainsi que le débit volumique d'air par unité aux conditions standard. Le SOTR peut alors être calculé à l'aide de la formule suivante :

Équation 12.07 :
$$SOTR = Q_{a,S} \rho_{a,S} w_{O_2} SOTE$$

où :

SOTR : taux de transfert d'oxygène standard (kgO₂/h);
 Q_{a,S} : débit d'air aux conditions standard (m³/h);
 ρ_{a,S} : densité de l'air aux conditions standard (1,20 kg/m³);
 w_{O₂} : fraction massique de l'oxygène dans l'air (0,232 kg O₂/kg air);
 SOTE : efficacité standard de transfert d'oxygène (décimales).

Plusieurs unités de débit d'air sont fréquemment utilisées :

- Nm³/h : se rapporte aux conditions normales (0 °C, 1 atm, 0 % d'humidité) ;
- SCFM (*standard cubic feet per minute*) : suggère des conditions standard (typiquement 20 °C, 1 atm et 36 % d'humidité).

Ainsi, Jenkins (2014) propose la relation suivante pour convertir les débits d'air aux conditions normales à des conditions standard :

Équation 12.08 : $Q_{a,S} = Q_{a,N} * 0,6386$

où :

$Q_{a,S}$: débit d'air aux conditions standard (20 °C, 1 atm et 36 % d'humidité) (SCFM);

$Q_{a,N}$: débit d'air aux conditions normales (Nm³/h).

Pour des conditions d'humidité semblable, la conversion du débit d'air entre deux conditions distinctes peut se faire à l'aide de la formule suivante, basée sur la loi des gaz parfaits :

Équation 12.09 : $\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$

où :

P : pression du gaz (Pa);

V : volume du gaz (m³);

T : température du gaz (°K).

12.2.3.2 Conversion des conditions standard aux conditions réelles

L'AOR étant établi aux conditions réelles du procédé, il est nécessaire de réaliser des conversions pour assurer la cohérence entre les valeurs utilisées et les conditions d'application. Le présent guide propose l'approche consistant à convertir les taux de transfert d'oxygène initialement établis aux conditions standard en valeurs exprimées aux conditions réelles (OTR_F, *field oxygen transfert rate*). Il est aussi possible d'utiliser l'approche inverse consistant à convertir les besoins réels en oxygène (établis pour les conditions réelles) en besoins en oxygène aux conditions standard (SOR, *standard oxygen requirement*). Le Tableau 12.2.3-1 présente les sigles utilisés dans les calculs d'aération selon les conditions retenues.

Tableau 12.2.3-1 – Sigles utilisés dans les calculs d'aération selon les conditions retenues

	Conditions réelles	Conditions standard
Taux de transfert	OTR _F	SOTR
Besoin en oxygène	AOR	SOR

Il faut noter la relation suivante entre les termes :

Équation 12.10 : $\frac{OTR_F}{SOTR} = \frac{AOR}{SOR}$

12.2.3.3 Calcul de l'OTR_F pour les aérateurs mécaniques

Dans le cas des aérateurs mécaniques, l'OTR_F est calculé selon l'équation suivante :

$$\text{Équation 12.11 : } \quad \text{OTR}_F = \alpha \text{ SOTR } \theta^{(T-20)} \frac{\beta \Omega C_{S,T} - C_L}{C_{S,20}}$$

où :

OTR_F : taux de transfert d'oxygène aux conditions réelles (kg O₂/h);

α : facteur de correction selon la nature de l'eau et le type d'équipement (adimensionnel);

SOTR : taux de transfert d'oxygène aux conditions standard (kg O₂/h);

θ : coefficient de température de l'eau (adimensionnel) (on utilise normalement la valeur de 1,024);

T : température de l'eau (°C);

β : facteur de correction de la concentration d'oxygène dissous à saturation selon la nature de l'eau (adimensionnel);

Ω : facteur de correction selon la pression barométrique du site (adimensionnel);

C_{S,T} : concentration d'oxygène dissous à saturation en eau claire à une température T donnée et à une pression de 1 atm (mg O₂/l);

C_L : concentration d'oxygène dissous à maintenir dans le liquide (mg O₂/l);

C_{S,20} : concentration d'oxygène dissous à saturation en eau claire à 20 °C et à une pression de 1 atm (9,092 mg O₂/l).

12.2.3.4 Calcul de l'OTR_F pour les aérateurs submergés

Dans le cas des aérateurs submergés, l'OTR_F est calculé selon l'équation suivante :

$$\text{Équation 12.12 : } \quad \text{OTR}_F = \alpha F \text{ SOTR } \theta^{(T-20)} \frac{\beta C_{S,W} - C_L}{C_{S,S}}$$

où :

OTR_F : taux de transfert d'oxygène aux conditions réelles (kg O₂/h);

α : facteur de correction selon la nature de l'eau et le type d'équipement;

F : facteur de correction selon la perte d'efficacité (adimensionnel) ;

SOTR : taux de transfert d'oxygène aux conditions standard (kg O₂/h);

θ : coefficient de température de l'eau (adimensionnel) (on utilise normalement la valeur de 1,024);

T : température de l'eau (°C);

β : facteur de correction de la concentration d'oxygène dissous à saturation selon la nature de l'eau (adimensionnel);

C_{S,W} : concentration de l'oxygène dissous à saturation dans l'eau de procédé, corrigée selon la température, la pression barométrique et la profondeur (mg O₂/l);

C_L : concentration d'oxygène dissous à maintenir dans le liquide (mg O₂/l);

C_{S,S} : concentration d'oxygène dissous à saturation en eau claire aux conditions standard, corrigée selon la profondeur (mg O₂/l).

Les concentrations $C_{S,W}$ et $C_{S,S}$ se calculent à l'aide des équations suivantes :

Équation 12.13 :
$$C_{S,W} = \frac{C_{S,T}(P_b + 9,78 \text{ DWD } f_p)}{P_s}$$

Équation 12.14 :
$$C_{S,S} = \frac{C_{S,20}(P_s + 9,78 \text{ DWD } f_p)}{P_s}$$

où :

$C_{S,W}$: concentration d'oxygène dissous à saturation dans l'eau de procédé, corrigée selon la température, la pression barométrique et la profondeur (mg O₂/l);

$C_{S,S}$: concentration d'oxygène dissous à saturation en eau claire aux conditions standard, corrigée selon la profondeur (mg O₂/l);

$C_{S,T}$: concentration d'oxygène dissous à saturation en eau claire à une température T donnée et à une pression de 1 atm (mg O₂/l);

$C_{S,20}$: concentration d'oxygène dissous à saturation en eau claire à 20 °C et à une pression de 1 atm (9,092 mg O₂/l);

P_b : pression barométrique (kPa);

P_s : pression standard (101,3 kPa);

DWD : profondeur de relâche de l'air (m);

f_p : facteur de profondeur effective (fourni par le manufacturier, généralement $0,2 < f_p < 0,4$).

Le Tableau 12.2.3-2 présente les valeurs de $C_{S,T}$ pour différentes températures.

Tableau 12.2.3-2 – Concentration d’oxygène dissous à saturation en eau claire (salinité nulle) à une pression de 1 atm (niveau de la mer) en fonction de la température

Température (°C)	C _{S,T} (mg O ₂ /l)
0	14,621
1	14,216
2	13,829
3	13,460
4	13,107
5	12,770
6	12,447
7	12,139
8	11,843
9	11,559
10	11,288
11	11,027
12	10,777
13	10,537
14	10,306
15	10,084
16	9,870
17	9,665
18	9,467
19	9,276
20	9,092
21	8,915
22	8,743
23	8,578
24	8,418
25	8,263
26	8,113
27	7,968
28	7,827
29	7,691
30	7,559
31	7,430
32	7,305
33	7,183
34	7,065
35	6,950
36	6,837
37	6,727
38	6,620
39	6,515
40	6,412

12.2.4 Nombre d'appareils d'aération

Le nombre d'appareils d'aération requis se calcule à l'aide de l'équation suivante :

Équation 12.15 : Nombre d'appareils d'aération = $\frac{\text{AOR totale}}{\text{OTR}_F \text{ unitaire}}$

Le débit d'air total requis aux conditions standard pour les systèmes par diffusion d'air est obtenu en utilisant l'équation suivante :

Équation 12.16 : $Q_{a,S} \text{ total} = \text{Nombre d'appareils d'aération} * Q_{a,S} \text{ unitaire}$

12.2.5 Efficacité énergétique

L'efficacité énergétique d'un appareil d'aération aux conditions standard (SAE, *standard aeration efficiency*) correspond à la masse d'oxygène transférée par unité de temps et de puissance. Elle peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

Équation 12.17 : $SAE = \frac{SOTR}{P_a}$

où :

SAE : efficacité énergétique d'un appareil d'aération aux conditions standard (kg O₂.kW⁻¹.h⁻¹);

SOTR : taux de transfert d'oxygène standard (kg O₂/h);

P_a : puissance à l'arbre (kW) (voir les formules 12.18 ou 12.27 selon les cas).

12.3 Équipements d'aération

Les équipements d'aération comprennent aussi bien les appareils installés dans les bassins que les surpresseurs qui les alimentent en air le cas échéant.

12.3.1 Aérateurs mécaniques

12.3.1.1 Généralités

Les aérateurs mécaniques sont regroupés en deux types selon leur position dans le bassin : de surface ou submergés. Des exemples d'aérateurs mécaniques sont montrés à la Figure 12.3.1-1. Généralement, les manufacturiers fournissent les valeurs d'efficacité énergétique aux conditions standard (SAE) de ces équipements.

Les aérateurs mécaniques de surface projettent de fines gouttelettes d'eau au-dessus de la surface des bassins soit par pompage, soit par déplacement mécanique de l'eau du bassin. De cette façon, la surface d'échange et le temps de contact entre l'eau et l'air atmosphérique sont augmentés, ce qui favorise le transfert d'oxygène (HQ, 1996). Les aérateurs mécaniques de surface peuvent être à axe vertical ou horizontal. Dans le premier cas, les pales sont rattachées à un arbre vertical, et le moteur est installé sur une plateforme flottante ou fixe. Les aérateurs mécaniques de surface à axe horizontal, quant à eux, sont composés d'un cylindre ou d'un tambour successivement exposé à l'air et submergé qui permet l'aération et le mouvement de l'eau (comme les brosses utilisées dans les fossés d'oxydation). Ce type d'aérateurs génère beaucoup d'aérosols. Afin d'être protégés contre ceux-ci, les opérateurs devraient se munir de tous les équipements de protection requis (masque, visière, survêtements, etc.) lorsqu'ils travaillent à proximité. On doit aussi établir des rayons de protection accrus pour protéger la population environnante.

Les aérateurs de surface devraient être installés de façon stable afin qu'ils ne se renversent pas. Il faut s'assurer qu'ils sont accessibles pour leur entretien en toute sécurité et qu'ils peuvent être sortis des bassins pour effectuer leur maintenance ou des réparations majeures. Il n'est pas recommandé d'installer ces équipements dans des bassins sur lesquels se forme un couvert de glace car, en hiver, ils deviendront inaccessibles et gèleront en cas de bris ou de panne. Ils devraient être munis de câbles chauffants pour permettre leur remise en marche à la suite d'une panne de courant prolongée en hiver. Dans le cas des aérateurs à hélice, il est recommandé d'utiliser des moteurs de 5,6 kW (7,5 hp) ou plus compte tenu des problèmes qui surviennent plus fréquemment avec les petites unités. Lorsque les besoins d'oxygénation sont bien inférieurs à la capacité des moteurs de 5,6 kW, on peut envisager l'installation d'une plus petite hélice. L'efficacité énergétique est réduite, mais la consommation électrique l'est aussi.

Les aérateurs mécaniques submergés comportent un impulseur (turbine ou autre) et une alimentation en air. L'air peut être aspiré de l'atmosphère ou bien insufflé par des surpresseurs (alimentation forcée). L'air est ensuite fractionné en petites bulles par le courant induit dans l'impulseur, puis entraîné dans l'eau. Ces aérateurs peuvent être flottants ou ancrés dans le fond des bassins (HQ, 1996).

Lorsque des aérateurs mécaniques sont installés dans des étangs, il faut prévoir au moins deux appareils par cellule de façon à éviter un arrêt complet de l'aération en cas de panne. On devrait prévoir un système de dégrillage adéquat en amont des étangs si ces appareils d'aération sont prévus dans le premier étang.

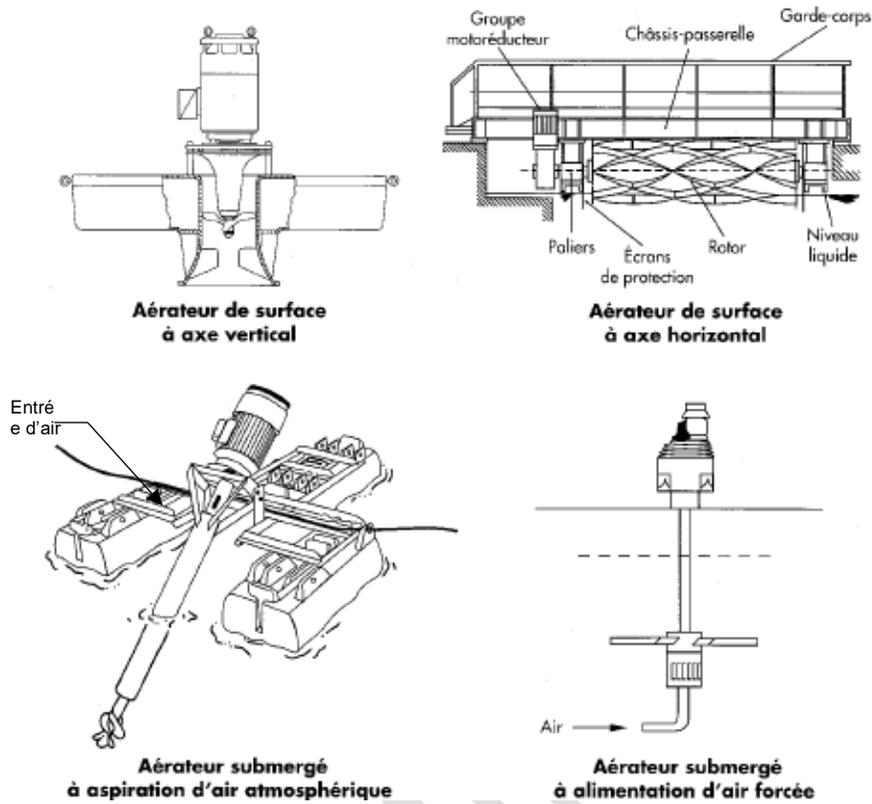


Figure 12.3.1-1 – Exemples d'aérateurs mécaniques

Tirée de HQ (1996)

Le Tableau 12.3.1-1 regroupe des informations générales sur différents types d'aérateurs mécaniques dont des valeurs types de SAE et de puissance. Les valeurs exactes devraient être obtenues auprès des manufacturiers.

Tableau 12.3.1-1 – Informations générales et données techniques de différents aérateurs mécaniques

Tiré de Qasim et Zhu (2018)

Type d'aérateur mécanique		Particularités	Avantages	Inconvénients	Puissance (kW)	SAE * (kg O ₂ .kW ⁻¹ .h ⁻¹)	Application
À axe vertical	Aérateur de surface à faible vitesse	Vitesse entre 20 et 100 rpm	Bon mélange, flexibilité d'installation selon la taille et la forme du bassin	Coût d'achat élevé, risque de gel en hiver, besoin d'entretien important du réducteur de vitesse	0,75 - 100	1,5 - 2,8	Fossé d'oxydation et étangs aérés
	Aérateur de surface à vitesse rapide	Vitesse entre 300 et 1 200 rpm	Coût d'achat faible, approprié pour des niveaux d'eau variables	Risque de gel en hiver, accessibilité difficile pour l'entretien, mélange potentiellement inadéquat	0,75 - 100	1,1 - 1,4	Étangs aérés
	Aérateur submergé ou à turbine (alimentation forcée)	Débit d'air entre 4 et 8 L/s	SOTE élevée, approprié pour les bassins profonds, opération flexible, pas de risque de gel, bon mélange	Coût d'achat élevé, requiert un réducteur de vitesse et un surpresseur, consommation énergétique importante	0,75 - 100	1,1 - 2,1	Bassin complètement mélangé, digesteur aérobie, réservoir de stockage des boues
À axe horizontal	Aérateur de surface ou à brosse	-	Coût d'achat modéré, bonne accessibilité pour l'entretien	Installation limitée selon la géométrie du bassin, requiert un réducteur de vitesse, faible efficacité	0,1 - 0,75	1 - 2	Fossé d'oxydation
	Aérateur à disques immergés	Profondeur d'immersion entre 1/8 ^e et 3/8 ^e du diamètre des disques. Espacement des disques et profondeur d'immersion dépendants des besoins en oxygène			0,1 - 0,75	1,2 - 2,4	Fossé d'oxydation

* La valeur de la SAE dépend de l'efficacité du surpresseur

12.3.1.2 Puissance

L'information sur la puissance à l'arbre des aérateurs mécaniques est généralement obtenue des manufacturiers. Sinon, la puissance requise par une turbine peut être calculée à l'aide de l'équation suivante :

Équation 12.18 : $P_{a,turbine} = 0,7457 \text{ cste } (3,281 d_i)^n r_i^m$

où :

$P_{a,turbine}$: puissance de l'arbre de la turbine (kW);
0,7457 : facteur de conversion du hp au kW;
cste : constante (valeur typique de 0,02);
3,281 : facteur de conversion du mètre au pied;
 d_i : diamètre du rotor (m);
 r_i : vitesse de rotation du rotor (rps);
 n, m : exposants (typiquement $4,8 < n < 5,3$ et $2,0 < m < 2,5$).

La puissance totale absorbée par les aérateurs se calcule à l'aide de la formule suivante (HQ, 1996) :

Équation 12.19 : $P_{a,tot} = N * P_{a,aérateur}$

où :

$P_{a,tot}$: puissance totale absorbée (kW);
N : nombre d'aérateurs (adimensionnel);
 $P_{a,aérateur}$: puissance à l'arbre de chaque aérateur (kW).

Dans le cas où les aérateurs mécaniques présentent une alimentation forcée, il est nécessaire de prendre également en compte la puissance absorbée par les surpresseurs (HQ, 1996) (voir section 12.3.3.3).

Pour plus de détails sur la consommation énergétique des aérateurs mécaniques, le concepteur est invité à se référer au guide d'Hydro-Québec (1996).

12.3.2 Aérateurs par diffusion d'air

Le principe de l'aération par diffusion consiste en l'injection d'air sous pression sous la surface de l'eau (WEF, 1988).

Ce type d'aérateur produit des bulles lors du passage de l'air surpressé au travers des diffuseurs. Les diffuseurs sont classés en fonction de la taille des bulles :

- fines bulles : < 5 mm ;
- moyennes bulles : 5 à 10 mm ;
- grosses bulles : > 10 mm.

Les diffuseurs fines bulles sont constitués de matériaux poreux (p. ex. céramique) ou de membranes perforées (EPDM, PVC ou polyuréthane). Les diffuseurs en matériaux poreux ont tendance à se colmater et requièrent un nettoyage chimique périodique. Les diffuseurs à membrane, quant à eux, sont moins sujets au colmatage mais ont une durée de vie limitée. En effet, des pertes d'efficacité surviennent avec le temps en raison des hautes températures de l'air surpressé et des produits chimiques auxquels ils sont exposés (HQ, 1996). Ils devraient être remplacés après une certaine durée d'exploitation (généralement après 5 à 10 ans).

Les diffuseurs à moyennes et à grosses bulles sont généralement munis d'orifices. Ils ont moins tendance à se colmater et demandent moins d'entretien que les diffuseurs fines bulles. Ils sont cependant moins efficaces énergétiquement. Ils sont fabriqués avec différents matériaux, dont l'acier inoxydable et le plastique (HQ, 1996).

Un dégrillage fin est nécessaire en amont des diffuseurs à fines bulles contrairement aux diffuseurs à moyennes et à grosses bulles.

La Figure 12.3.2-1 montre plusieurs types d'appareils d'aération par diffusion d'air.

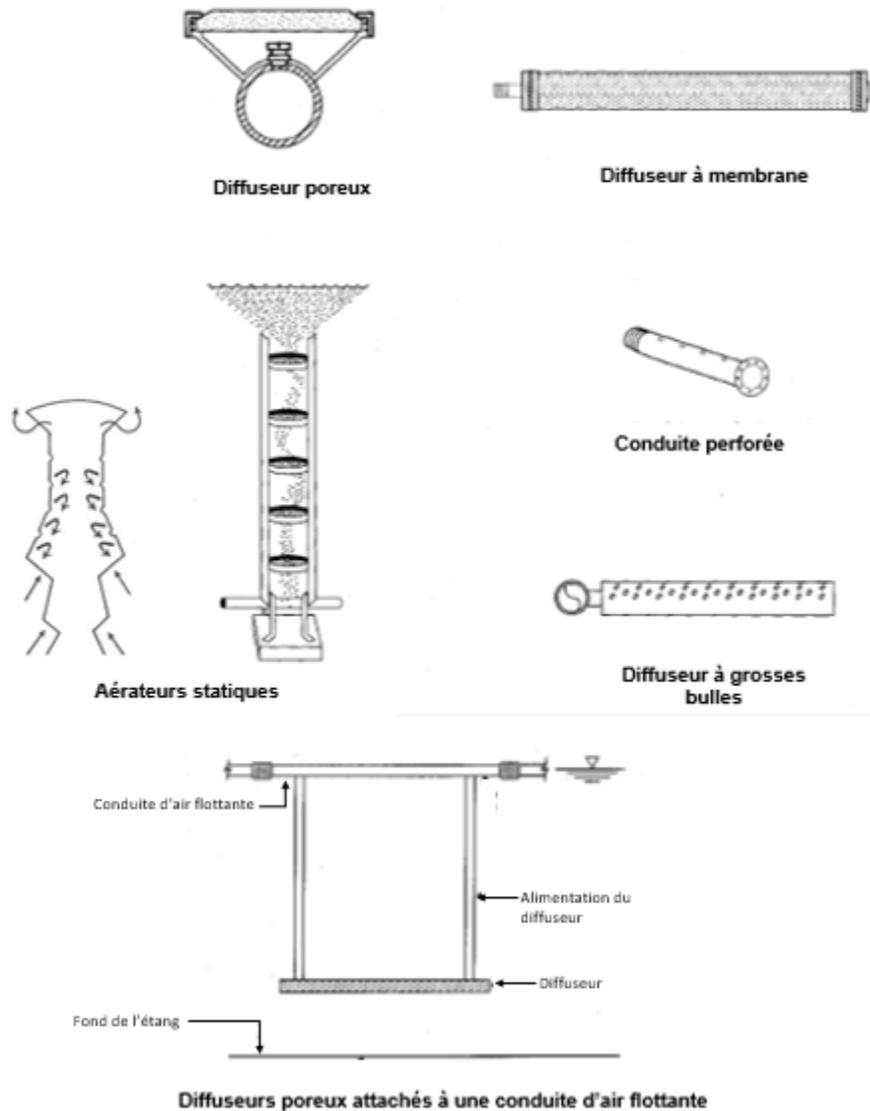


Figure 12.3.2-1 – Exemples d'appareils d'aération à diffusion d'air

Adaptée de HQ (1996)

Comme il est mentionné à la section 12.2.1.2.3, la disposition des diffuseurs peut avoir un effet sur les performances du système d'aération. La Figure 12.3.2-2 présente différentes façons de placer les diffuseurs dans les bassins.

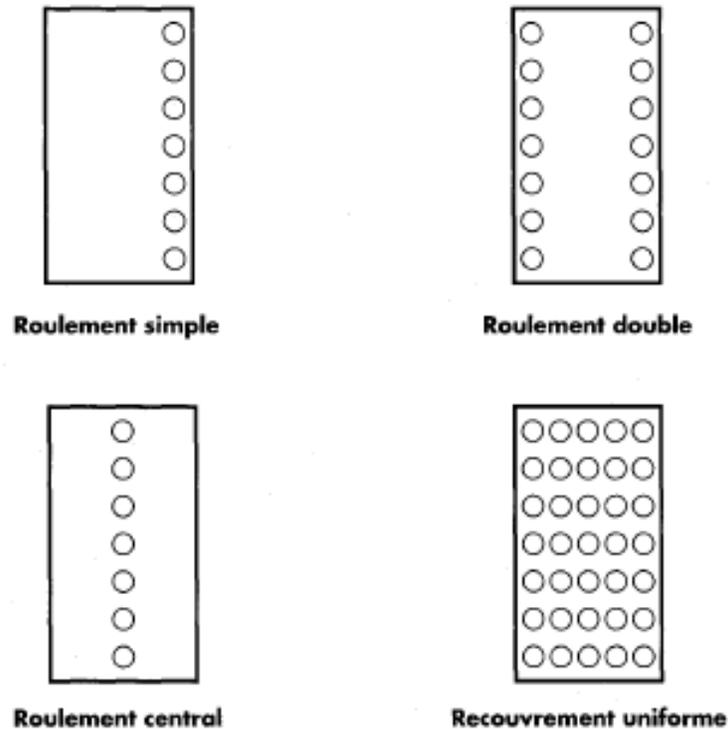


Figure 12.3.2-2 – Exemples de disposition des diffuseurs

Tirée de HQ (1996)

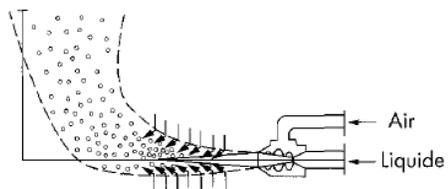
Les diffuseurs à jet sont un type de diffuseurs à part. Ils peuvent produire des microbulles (<1,5 mm), de fines bulles ou encore de moyennes bulles. À l'aide d'une pompe, une partie de l'eau du bassin est recirculée à travers un jet primaire, généralement de forme conique. Une conduite d'aération est raccordée au conduit de jet primaire. L'augmentation de la vitesse d'écoulement induit un effet d'aspiration (effet Venturi) qui incorpore de l'air à l'eau (HQ, 1996). Le mélange air-eau ainsi créé est ensuite projeté dans le bassin à travers un ou plusieurs jets secondaires (buses), ce qui produit un panache de bulles s'élevant en direction de la surface (HQ, 1996). Si la pompe est submergée, elle devrait être adaptée au type d'installation et aux conditions d'exploitation prévues.

Les diffuseurs à mono-jet peuvent être flottants ou ancrés dans le fond du bassin. Ils aspirent généralement l'air atmosphérique et sont alors qualifiés d'auto-aspirants.

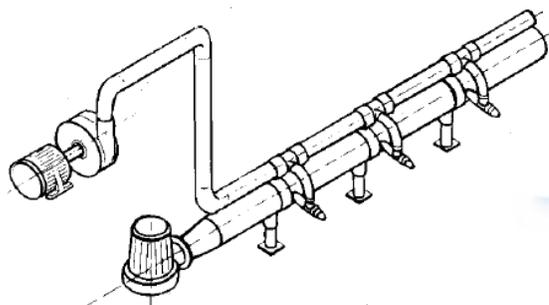
Les diffuseurs multijet sont alimentés en air par des surpresseurs. Les rampes de jets sont généralement fabriquées en fibre de verre ou en polyuréthane (HQ, 1996; WEF et ASCE, 2018).

Les aérateurs à jet sont particulièrement bien adaptés aux installations demandant un bon mélange. La puissance de pompage et l'orientation des jets engendrent des mouvements horizontaux, tandis que la remontée de l'air injecté ajoute des mouvements ascendants, ce qui favorise des courants de mélange dans le bassin.

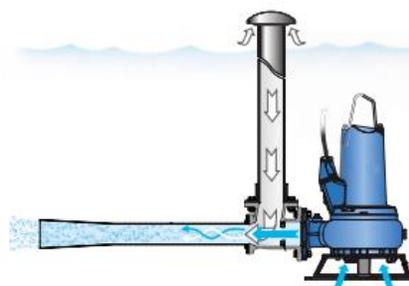
La Figure 12.3.2-3 représente différents types de diffuseurs à jets.



Principe de fonctionnement



Rampe submergée multijet



Monojet autoaspirant (flottant, fixe ou sur barres guides) avec pompe submergée

Figure 12.3.2-3 – Diffuseurs à jets
Adaptée de HQ (1996)

Le Tableau 12.3.2-1 regroupe des données techniques types de différents diffuseurs. On devrait obtenir les valeurs exactes auprès des manufacturiers.

Tableau 12.3.2-1 – Informations générales et données techniques de différents diffuseurs

Type de diffuseurs	Avantages	Inconvénients	Données techniques	Type de recouvrement	Débit d'air/ diffuseur (Nm ³ /h)	SOTE ^a (%)	SAE ^b (kg O ₂ .kW ⁻¹ .h ⁻¹)	Application
Diffuseurs en céramique (disques - fines bulles)	OTR et SAE élevés, appropriés pour un recouvrement uniforme, exploitation flexible.	Coût d'achat élevé, requiert un filtre à air, pertes de charge importantes, besoin d'entretien important, possibles problèmes de colmatage.	Diamètre : 180 - 230 mm	Uniforme	0,5 - 12	25 - 35	2,5 - 6	Boues activées, étangs aérés
Diffuseurs à membrane (disques - fines bulles)			Diamètre : 180 - 300 mm Expansion vers le haut lorsque l'air est insufflé : 6 - 64 mm	Uniforme	0,8 - 21	27 - 35	2,5 - 6	
Diffuseurs à membrane (tube - fines bulles)			Diamètre : 65 - 90 mm Longueur : 500 - 1 000 mm	Uniforme Roulement simple	1,8 - 6,6 3,6 - 10,2	22 - 29 15 - 19	- -	
Diffuseurs à grosses bulles (disques)	Faible coût d'achat, bonne fiabilité, appropriés pour le mélange et le frottement de l'air et des particules en suspension, requièrent peu d'entretien, pas de risques de colmatage.	OTR, SOTE et SAE faibles	Diamètre : 75 - 150 mm	Roulement simple	4,8 - 9,5	7 - 14	1,2 - 2,5	Boues activées, RBGS, dessableur aéré, bassin d'égalisation, réservoir de stockage de boues, canal de mélange, digesteur aérobie
Conduites perforées	Facteur α élevé	Faible efficacité de transfert	Longueur : 300 - 600 mm	-	8 - 80	5 - 15	1,3 - 1,9	
Aérateurs à jets	OTR élevé, SOTE moyenne à élevée, coût initial modéré, appropriés pour les bassins profonds, bon mélange.	Requièrent surpresseur et pompe de recirculation, risque de colmatage des embouts de diffusion.	-	Central	85 - 475	10 - 25	1,2 - 3,5	Boues activées, bassin d'égalisation, réservoir de stockage de boues
Aérateurs statiques	Faible coût d'achat, SOTE moyenne, requièrent peu d'entretien.	Mélange faible	-	-	-	10 - 12	1,4 - 1,7	Étangs aérés

^a Pour une immersion d'environ 4,5 m.

^b La valeur de la SAE dépend de l'efficacité du surpresseur.

Sources : Qasim et Zhu (2018); M&EA (2014); WEF (2018).

12.3.3 Surpresseurs

12.3.3.1 Généralités

Les surpresseurs peuvent être à déplacement positif (généralement à lobes droits) ou centrifuge. Ils comprennent divers accessoires, comme des filtres à air, des silencieux et autres.

Les surpresseurs à déplacement positif déplacent un volume d'air fixe qui est fonction de la vitesse de rotation. Une vanne de relâche est prévue sur la conduite de refoulement pour éviter l'éclatement de celle-ci en cas de blocage.

Les surpresseurs centrifuges sont divisés en trois catégories : multiétagés, monoétagés ou turbo. Les surpresseurs multiétagés peuvent fournir une plus grande pression que les monoétagés. Les surpresseurs turbo ont une haute efficacité et peuvent fournir de grands débits à de hautes pressions selon les modèles sélectionnés.

La Figure 12.3.3-1 présente les principaux types de surpresseurs.

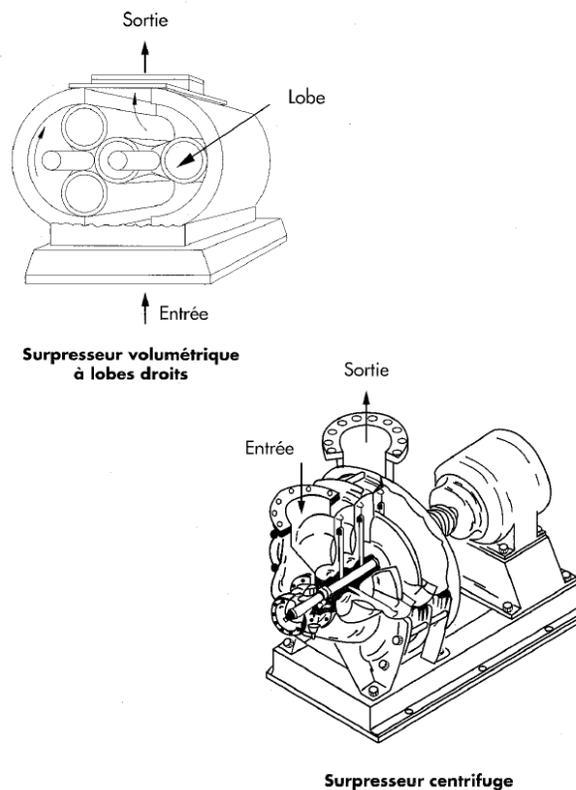


Figure 12.3.3-1 – Surpresseurs

Tirée de HQ (1996)

Le Tableau 12.3.3-1 regroupe les descriptions et données techniques générales des différents types de surpresseurs. Les valeurs exactes de capacité et autres devraient être vérifiées auprès des manufacturiers.

Tableau 12.3.3-1 – Informations générales et données techniques de différents surpresseurs

Adapté de Qasim et Zhu (2018)

Type de surpresseur	Description générale	Avantages	Inconvénients	Capacité (m ³ /min)	Pression absolue au refoulement (kPa)	Efficacité nominale (%)	Marge de réglage nominal (% du débit)
À déplacement positif	Fournit un volume d'air constant, peu importe la pression. Peut être modulé en changeant la vitesse de rotation soit par : <ul style="list-style-type: none"> un moteur à entraînement à fréquence variable (VFD) ; soit par différents rapports de diamètre de poulies d'entraînement. 	Grande gamme de pressions de décharge disponible, bonne marge de réglage, contrôle simple.	Peu efficace énergétiquement, requiert un silencieux et possiblement un VFD, besoin d'un entretien intensif.	< 425	> 155	45 - 65	50
Centrifuge multiétagée	Fournit une large gamme de débits à haute pression de décharge grâce à une série d'impulseurs fonctionnant à faible vitesse (3600 - 4000 rpm).	Bonne efficacité, contrôle simple	Peu efficace à de faibles marges de réglage, requiert un suivi de la température et de la vibration du roulement, besoin de lubrification.	> 35 - 700	108 - 275	50 - 70	50 - 60
Centrifuge monoétagée	Fournit une large gamme de débits pour une large gamme de pressions de décharge grâce à un seul impulseur fonctionnant à haute vitesse (10 000 - 14 000 rpm).	Efficace à de faibles marges de réglage, installation facile, bonne protection face aux surcharges.	Besoin d'un entretien élevé, système de contrôle complexe, requiert un caisson antibruit, nécessite un suivi de la consommation d'énergie, lubrification requise.	> 425	150 - 170	70 - 80	50 - 65
Turbo haute vitesse	Fournit une gamme modérée de débits pour une gamme modérée de pressions de décharge. Impulseur simple ou double fonctionnant à très haute vitesse (40 000 - 75 000 rpm).	Grande efficacité à faible débit, efficace à faible marge de réglage, faible empreinte au sol, installation facile, peu d'entretien, de bruit et de vibration, VFD intégré, lubrification et refroidissement à l'air non requis.	Requiert des filtres pour éviter des surcharges de puissance, manque d'expérience opérationnelle à long terme (technologie récente).	< 567	200 - 240	70 - 80	50

La sélection des surpresseurs devrait être effectuée de façon à fournir le débit d'air requis à la pression imposée par les pertes de charge qui surviennent dans le réseau de distribution. Comme pour un système de pompage, le concepteur devrait déterminer le point d'opération du surpresseur en fonction de la pression d'aspiration et de la pression de refoulement. Si les soufflantes qui alimentent les bassins d'aération fournissent également de l'air pour d'autres équipements de la station (bassins de boues ou autres), on devrait déterminer les besoins additionnels.

Une redondance devrait être prévue pour les surpresseurs, et le système devrait être capable de fournir le débit d'air maximal malgré l'arrêt de la plus grosse unité. Il est recommandé de prévoir plusieurs surpresseurs de différentes capacités pour répondre facilement aux variations de demande en oxygène et réduire les pertes énergétiques.

12.3.3.2 Pertes de charge sur le réseau de distribution d'air

Pour choisir convenablement les surpresseurs, il est nécessaire de déterminer la pression au refoulement qui correspond à la perte de charge totale dans le réseau de distribution en plus de la pression barométrique, comme présenté dans la formule suivante :

Équation 12.20 :
$$P_r = P_b + h_{stat} + h_L + h_s$$

où :

P_r : pression absolue au refoulement du surpresseur (atm);

P_b : pression barométrique ambiante (atm);

h_{stat} : pertes de charge statiques (atm);

h_L : pertes de charge linéaires (atm);

h_s : pertes de charge singulières (atm).

En général, il est considéré qu'une bonne distribution de l'air est maintenue dans le bassin lorsque les pertes de charge dans la tuyauterie entre le diffuseur le plus éloigné et le dernier point de contrôle du débit (typiquement, la vanne de contrôle située sur la conduite de descente) représentent moins de 10 % de la perte de charge au travers des diffuseurs (US EPA, 1989). La perte de charge totale dans les conduites est généralement de 50 à 200 mm CE (Qasim et Zhu, 2018).

12.3.3.2.1 Pertes de charge statiques

Les pertes de charge statiques proviennent de la hauteur d'eau au-dessus des diffuseurs. Il s'agit normalement de la plus importante perte de charge dans le réseau de distribution d'air. Les pertes de charge dans les diffuseurs, les conduites et les accessoires de tuyauterie représentent généralement 20 % à 40 % de la perte de charge statique (Qasim et Zhu, 2018).

12.3.3.2.2 Pertes de charge linéaires

Les pertes de charge linéaires sont dues au frottement de l'air dans les conduites et dépendent de la vitesse d'écoulement. Il est recommandé de sélectionner le diamètre des conduites de distribution en fonction des gammes de vitesses présentées au Tableau 12.3.3-2. La vitesse visée dans la conduite d'aération principale devrait en revanche être deux fois plus faible que les gammes recommandées au Tableau 12.3.3-2 (Jenkins, 2014). L'important est de maintenir la vitesse dans la gamme au débit d'air maximal. On devrait aussi calculer la vitesse au débit minimal dans le but de vérifier qu'elle est adéquate pour les équipements de mesure et les vannes de contrôle (Jenkins, 2014).

Tableau 12.3.3-2 – Vitesses dans les conduites de distribution

Tiré de Qasim et Zhu (2018)

Diamètre de la conduite (mm)	Vitesse aux conditions standard* (m/min)
25 - 75	350 - 550
100 - 250	500 - 900
300 - 600	800 - 1 200
750 - 1 500	1 050 - 2 000

* 1 atm et 20 °C

La vitesse de l'air est calculée en fonction du diamètre intérieur de la conduite :

Équation 12.21 :
$$v = \frac{4 Q_a}{\pi d^2}$$

où :

v : vitesse de l'air dans la conduite (m/min);

Q_a : débit d'air volumique (m³/min);

d : diamètre intérieur de la conduite (m).

Dans le cas d'une conduite droite en acier, la perte de charge linéaire peut se calculer par itération à l'aide de l'équation 12.22 (Qasim et Zhu, 2018). On émet une hypothèse quant à la valeur de la pression au refoulement (P_r) pour effectuer les calculs de perte de charge. Puis on calcule P_r à l'aide de l'équation 12.20. Si l'hypothèse est validée, l'itération s'arrête. Le lecteur est invité à se référer à l'exemple détaillé 10.73 de Qasim et Zhu (2018).

Équation 12.22 :
$$h_L = g 10^{-8} \left(\frac{f T_r Q_r^2}{P_r d^5} \right) L$$

Équation 12.23 :
$$Q_r = \frac{1 \text{ atm}}{P_r} \frac{T_r}{293 \text{ K}} Q_{a,s}$$

Équation 12.24 :
$$T_r = T_0 \left(\frac{P_r}{P_b} \right)^{0,283}$$

où :

h_L : perte de charge linéaire (mm CE);

g : accélération gravitationnelle (9,81 m/s²);

f : facteur de friction (adimensionnel);

T_r : température de l'air au refoulement du surpresseur (K);

Q_r : débit d'air aux conditions de pression et de température au refoulement du surpresseur (m³/min);

P_r : pression absolue au refoulement du surpresseur (atm);

d : diamètre intérieur de la conduite (m);

L : longueur de la conduite (m);

Q_{a,s} : débit d'air exprimé aux conditions standard (20 °C et 1 atm);

T₀ : température de l'air ambiant (K);

P_b : pression barométrique ambiante (atm).

On utilise généralement la température maximale de l'air en été pour établir T₀ (Qasim et Zhu, 2018).

Le facteur de friction (f) peut être déterminé à l'aide du diagramme de Moody (voir section 4.1.2.1). Il est recommandé d'augmenter la valeur de f de 10 % pour tenir compte du vieillissement des conduites (Qasim et Zhu, 2018). Plus simplement, dans le cas de conduites en acier, la valeur de f peut être calculée à l'aide de la formule suivante (M&EA, 2014) :

Équation 12.25 :
$$f = \frac{0,029 d^{0,027}}{Q_r^{0,148}}$$

où :

f : facteur de friction (adimensionnel);

d : diamètre intérieur de la conduite (m);

Q_r : débit d'air aux conditions de pression et de température au refoulement du surpresseur (m³/min).

12.3.3.2.3 Pertes de charge singulières

Les pertes de charge singulières sont attribuables aux accessoires de tuyauterie (tés, coudes, vannes, etc.), aux accessoires des surpresseurs (silencieux, filtres à air, etc.) et aux diffuseurs.

Accessoires de tuyauterie

On peut utiliser l'équation 12.26 pour calculer la longueur de conduite équivalente aux pertes de charge attribuables aux accessoires de tuyauterie. Ensuite, l'équation 12.22 peut être employée pour déterminer les pertes de charge linéaires correspondantes.

Équation 12.26 :
$$L_{\text{éq}} = 55,4 C d^{1,2}$$

où :

$L_{\text{éq}}$: longueur de conduite équivalente (m);

C : coefficient de conversion des accessoires de tuyauterie en longueur équivalente (adimensionnel);

d : diamètre de l'accessoire de tuyauterie (m).

Le Tableau 12.3.3-3 présente des valeurs de C pour différents accessoires.

Tableau 12.3.3-3 – Valeur type de coefficient de conversion (C) pour différents accessoires de tuyauterie

Tiré de Qasim et Zhu (2018)

Accessoire	Coefficient de conversion
Coude à long rayon ou course de té standard	0,33
Coude à moyen rayon ou course de té réduite de 25 %	0,42
Coude de rayon standard ou course de té réduite de 50 %	0,67
Té	1,33
Vanne terminale (<i>angle valve</i>)	0,90
Vanne à guillotine (<i>gate valve</i>)	0,25
Vanne à soupape (<i>globe valve</i>)	2,00

Accessoires des surpresseurs

Le Tableau 12.3.3-4 présente les pertes de charge singulières typiques dues aux accessoires accompagnant les surpresseurs. On devrait obtenir les valeurs exactes auprès des manufacturiers.

Tableau 12.3.3-4 – Pertes de charge singulières typiques causées par les accessoires de surpresseur

Tiré de Qasim et Zhu (2018)

Accessoire	Perte de charge singulière (mm CE)
Filtre à air	13 - 75
Silencieux	
Surpresseur centrifuge	13 - 38
Surpresseur à déplacement positif	150 - 200
Clapet antiretour	20 - 200

Diffuseurs

On devrait se renseigner sur les pertes de charge au travers des diffuseurs auprès des manufacturiers. La perte de charge au travers des diffuseurs fines bulles est généralement comprise entre 250 et 500 mm CE (Qasim et Zhu, 2018).

12.3.3.3 Puissance

La puissance à l'arbre requise par un surpresseur peut être calculée à l'aide de l'équation suivante en supposant des conditions adiabatiques (Qasim et Zhu, 2018) :

Équation 12.27 :
$$P_{a,\text{surpresseur}} = \frac{(Q_{a,S}/60) \rho_{a,S} R T_{\text{air}}}{M_{\text{air}} (k-1)/k (\eta_b/100\%)} \left[\left(\frac{P_r}{P_e} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

où :

- $P_{a,\text{surpresseur}}$: puissance à l'arbre du surpresseur (kW);
- $Q_{a,S}$: débit d'air aux conditions standard (20 °C et 1 atm) (m³/min);
- $\rho_{a,S}$: densité de l'air aux conditions standard (1,20 kg/m³);
- R : constante des gaz parfaits (8,314 J.mol⁻¹.°K⁻¹);
- T_{air} : température de l'air entrant au surpresseur (K);
- M_{air} : masse molaire de l'air sec (28,97 kg/kmol);
- k : ratio des chaleurs spécifiques de l'air (adimensionnel, $k = 1,395$ et $[k-1]/k = 0,283$);
- η_b : efficacité de l'ensemble surpresseur-moteur (généralement 70 % - 90 %);
- P_r : pression absolue au refoulement du surpresseur (atm);
- P_e : pression absolue à l'entrée du surpresseur (atm).

D'autres méthodes de calcul de la puissance à l'arbre du surpresseur sont présentées par Hydro-Québec (1996) et Jenkins (2014). Pour plus de détails sur la consommation énergétique des surpresseurs, le concepteur est invité à se référer au guide d'Hydro-Québec (1996).

12.4 Installation

En raison de la compression de l'air, la température est élevée dans les conduites d'aération. La WEF (1988) mentionne qu'une température de 60 °C à 80 °C est courante dans les conduites de refoulement des bassins d'aération de 5 m de profondeur. Il est nécessaire de se doter d'une tuyauterie et d'accessoires (supports, vannes, joints, etc.) qui supportent bien ces températures élevées (US EPA, 1989). D'un point de vue santé et sécurité, il faut prévoir une protection pour les opérateurs (p. ex. isolation des conduites).

De nombreux détails d'installation des systèmes d'aération sont disponibles dans :

- *Aeration – Manual of practice FD-13*, de la WEF, publié en 1988.
- *Design Manual – Fine Pore Aeration Systems*, de la US EPA, publié en 1989.
- *Aeration Control System Design – A Practical Guide to Energy and Process Optimization*, de Thomas Jenkins, publié en 2014.

PRÉLIMINAIRE

12.5 Références bibliographiques

HYDRO-QUÉBEC (1996). *Guide technique – Programme d'optimisation énergétique des systèmes – Systèmes d'aération municipaux pour le traitement des eaux usées*, [s. l.], [s. é.], 164 p.

JENKINS, T. E. (2014). *Aeration Control System Design – A Practical Guide to Energy and Process Optimization*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, inc., 491 p.

METCALF & EDDY-AECOM (M&EA) (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery*, 5^e éd., New York, NY, McGraw-Hill Education, 2018 p.

ONTARIO MINISTRY OF THE ENVIRONMENT (MOE) (2008). *Design guidelines for sewage works*, [s. l.], [s. é.], 476 p.

QASIM, S. R., et G. ZHU (2018). *Wastewater treatment and reuse – Theory and design examples*, Boca Raton, FL, CRC Press, volume 1 – *Principles and basic treatment*, 1161 p.

US EPA (1989). *Design Manual – Fine Pore Aeration Systems*, EPA/625/1-89/023.

WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF) (2006). *Membrane systems for wastewater treatment*, New York, NY, WEF Press McGraw-Hill, 284 p.

WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION (WPCF) et AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE) (1988). *Aeration*. WPCF – Manual of practice No. FD-13. ASCE – Manuals and reports on engineering Practice, No. 68, 167 p.

WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF) et AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE) (2018). *Design of Water resource recovery facilities*, WEF Manual of Practice, No. 8, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 76, 6^e éd., New York, NY, McGraw-Hill Education, 2 240 p.



**Environnement,
Lutte contre
les changements
climatiques,
Faune et Parcs**

Québec 