

# Autoépuration en eau courante : évaluation de l'oxygénation dans les cascades en marches d'escalier

## Self-purification in running water: experimental evaluation of the oxygenation capacity of stepped cascade

Hatem Khdhiri, Olivier Potier and Jean-Pierre Leclerc

Volume 27, Number 2, 2014

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1025563ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/1025563ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

1718-8598 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Khdhiri, H., Potier, O. & Leclerc, J.-P. (2014). Autoépuration en eau courante : évaluation de l'oxygénation dans les cascades en marches d'escalier. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 27(2), 127–136.  
<https://doi.org/10.7202/1025563ar>

Article abstract

In aquatic ecosystems, dissolved oxygen is consumed by the chemical and biological processes involved in natural self-purification (oxidation-reduction, degradation of organic matter,...) and by the respiration of the aquatic species. The self-purification can be enhanced by water aeration improvement and the dissolved oxygen level is thus an indicator of the water quality. Hydraulic structures such as cascades play the role of an aeration system by improving the dissolution of atmospheric oxygen in water. To estimate the aeration potential of these structures in low discharges corresponding to small natural streams, a study was realized on a laboratory cascade model equipped with a modular number of size-adjustable steps. Oxygen transfer in stepped cascades is strongly dependent on the interfacial exchange area per water volume, the multiphase flow structure and the turbulence in the fluid. From the hydrodynamic point of view, three flow regimes were identified for a flow rate lower than  $3 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ : two nappe regimes and one transition regime. The measured oxygen transfer efficiency varies between 15% and 40% depending on water flow rates, and the number and length of steps in the cascade. The results showed an improvement of the aeration with the flow rate (in the nappe flow) and with the number of steps. On the various studied systems of cascades, a linear relation between steps number and aeration efficiency was demonstrated. The addition of gravel on the step surfaces increases the cascade aeration capacity slightly, depending on the immersion level of the gravel. For a given total height, an increase in the cascade length disadvantages the oxygen transfer.

# AUTOÉPURATION EN EAU COURANTE : ÉVALUATION DE L'OXYGÉNATION DANS LES CASCADES EN MARCHES D'ESCALIER

*Self-purification in running water: experimental evaluation of the oxygenation capacity of stepped cascade*

---

HATEM KHDHIRI\*, OLIVIER POTIER ET JEAN-PIERRE LECLERC

Laboratoires Réaction et Génie des Procédés, 1 rue Grandville, 54000 Nancy, France

Reçu le 16 janvier 2013, accepté le 21 février 2014

---

## RÉSUMÉ

Dans les écosystèmes aquatiques, l'oxygène dissous est consommé par les processus chimiques et biologiques de l'autoépuration (oxydoréduction, dégradation de la matière organique,...) ainsi que par la respiration des espèces aquatiques. L'autoépuration sera donc favorisée par une amélioration de l'aération et le taux d'oxygène dissous constituera un indicateur de la qualité de l'eau. Les structures hydrauliques telles que les cascades jouent le rôle de système d'aération en favorisant l'absorption dans l'eau de l'oxygène atmosphérique. Afin d'évaluer le potentiel d'aération de ces ouvrages aux faibles débits, une étude a été réalisée sur une cascade de laboratoire représentative des petits cours d'eau et équipée de plusieurs marches modulables en nombre et en taille. Le transfert d'oxygène dans les cascades est fortement dépendant de l'aire de l'interface d'échange rapporté au volume d'eau, du type d'écoulement diphasique et de la turbulence dans le fluide. Du point de vue hydrodynamique, trois régimes d'écoulement ont été identifiés pour un débit inférieur à  $3 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ , deux régimes de type nappe et un régime de transition. L'efficacité du transfert d'oxygène mesurée varie de 15 % à 40 % en fonction du débit d'eau, du nombre et de la longueur des marches de la cascade. Les résultats ont montré une amélioration de l'aération avec le débit (en régime nappe) et avec le nombre de marches. Sur les différents systèmes de

cascades étudiés, une relation de linéarité entre le nombre de marches et l'efficacité d'aération a été constatée. L'ajout de graviers sur les marches provoque une légère amélioration de la capacité d'aération, dépendant du niveau d'immersion des graviers. À hauteur donnée, l'augmentation de la longueur des cascades défavorise le transfert d'oxygène.

**Mots clés :** *Oxygénation, cascade, aération, transfert d'oxygène, efficacité d'aération, rivière, eau courante*

## ABSTRACT

In aquatic ecosystems, dissolved oxygen is consumed by the chemical and biological processes involved in natural self-purification (oxidation-reduction, degradation of organic matter,...) and by the respiration of the aquatic species. The self-purification can be enhanced by water aeration improvement and the dissolved oxygen level is thus an indicator of the water quality. Hydraulic structures such as cascades play the role of an aeration system by improving the dissolution of atmospheric oxygen in water. To estimate the aeration potential of these structures in low discharges corresponding to small natural streams, a study was realized on a laboratory cascade model equipped with a modular number of size-adjustable steps.

Oxygen transfer in stepped cascades is strongly dependent on the interfacial exchange area per water volume, the multiphase flow structure and the turbulence in the fluid. From the hydrodynamic point of view, three flow regimes were identified for a flow rate lower than  $3 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ : two nappe regimes and one transition regime. The measured oxygen transfer efficiency varies between 15% and 40% depending on water flow rates, and the number and length of steps in the cascade. The results showed an improvement of the aeration with the flow rate (in the nappe flow) and with the number of steps. On the various studied systems of cascades, a linear relation between steps number and aeration efficiency was demonstrated. The addition of gravel on the step surfaces increases the cascade aeration capacity slightly, depending on the immersion level of the gravel. For a given total height, an increase in the cascade length disadvantages the oxygen transfer.

**Key words:** *oxygenation, stepped cascade, aeration, oxygen transfer, aeration efficiency, river, running water.*

## INTRODUCTION

L'autoépuration est un processus naturel d'élimination d'une pollution essentiellement organique dans un système aquatique (lacs, rivières, ruisseaux, etc.). Le bon fonctionnement de l'autoépuration nécessite aussi bien un bon fonctionnement biologique, qu'un bon équilibre entre l'apport d'oxygène et sa consommation dans le milieu. Cet équilibre n'est pas toujours assuré à cause d'une surconsommation locale d'oxygène due à une forte concentration de pollution ou à un manque d'apport initial d'oxygène. L'utilisation de systèmes d'aération naturels ou artificiels (cascades, chutes, ressauts hydrauliques, etc.) représente une bonne solution pour rétablir l'autoépuration et améliorer la qualité de l'eau. En effet, la quantité d'oxygène nécessaire au déroulement des processus d'autoépuration sur de longs tronçons d'une rivière à courant faible peut être transférée sur quelques mètres grâce aux structures hydrauliques telles que les cascades (BAYLAR *et al.*, 2010).

Les cascades sont donc des moyens efficaces d'aération grâce à la turbulence générée et aux grands débits d'air entraînés dans l'eau (TOOMBES et CHANSON, 2000). Les propriétés hydrauliques des chutes en cascades, et en particulier les caractéristiques des régimes d'écoulement (nappe, transition et fortement turbulent), ont été étudiées par plusieurs auteurs.

La première étude, souvent citée sur l'aération par les cascades, a été réalisée par GAMESON (1957). Depuis, plusieurs auteurs ont utilisé les structures de chute d'eau en cascades pour l'étude de transfert de gaz. Ainsi, AVERY et NOVAK (1978) et NAKASONE (1987) ont proposé des corrélations semi-empiriques qui ont été vérifiées sur des

prototypes. Plus tard, TOOMBES et CHANSON (2005) ont étudié l'oxygénation sur un canal d'eau avec des marches d'escaliers à des dimensions proches de celles à l'échelle réelle. BAYLAR *et al.* (2003, 2006, 2007) ont caractérisé l'oxygénation par des corrélations empiriques grâce à des mesures sur un pilote de laboratoire. Il existe d'autres approches qui ont été utilisées pour caractériser l'aération par les cascades. À titre d'exemple, BAYLAR *et al.* (2011) ont corrélié l'efficacité de l'aération avec différents paramètres grâce à un algorithme génétique.

L'objectif de ce travail est d'étudier le transfert d'oxygène dans les cascades essentiellement en régime d'écoulement nappe en testant l'effet de plusieurs paramètres sur l'efficacité du processus d'aération dans le but de l'améliorer dans les petits cours d'eau. L'objectif à long terme est de développer une corrélation semi-empirique, selon la méthodologie du génie des procédés pour l'étude des aérateurs industriels, valable sur une très large gamme de paramètres opératoires et géométriques. Le travail présenté dans cet article vise à décrire la méthodologie proposée et les premiers résultats obtenus sur un pilote de laboratoire.

## 1. TRANSFERT D'OXYGÈNE AIR-EAU

Le transfert d'oxygène dans l'eau est régi par deux phénomènes : la diffusion moléculaire et la turbulence. Dans notre cas, la vitesse de transfert de l'air vers l'eau est contrôlée par la résistance au transfert située du côté liquide. Localement, et sans réaction de consommation d'oxygène, la variation de la concentration en oxygène dissous en fonction du temps dans un élément de volume d'eau en mouvement sur la cascade est proportionnelle au déficit en oxygène dissous et à l'aire de l'interface d'échange entre l'air et l'eau :

$$\text{Flux transféré} = \frac{dC}{dt} = k_L a. (C_s - C) \quad (1)$$

$k_L$  est le coefficient de transfert local;

$a$  est l'aire interfaciale air-eau par unité de volume;

$C_s$  est la concentration de saturation en oxygène dissous dans l'eau; et

$C$  représente la concentration en l'oxygène dans l'eau.

L'intégration de la relation (1) entre l'amont et l'aval de la cascade d'eau conduit à la relation suivante :

$$\frac{C_D - C_U}{C_s - C_U} = 1 - \exp\left(-\int_U^D k_L a. dt\right) = E \quad (2)$$

$C_D$  et  $C_U$  représentent respectivement la concentration en oxygène à l'aval et à l'amont du système d'aération étudié;  $E$  est l'efficacité de l'oxygénation. Il s'agit d'un paramètre d'évaluation de l'aération. Ainsi, quand  $E = 1$ , le transfert est total et la concentration de sortie est égale à celle de saturation;  $E = 0$  signifie l'absence du transfert.

L'efficacité de transfert d'oxygène  $E$  est sensible à la température de l'eau. Elle est souvent calculée à une température de référence de 20 °C en utilisant l'équation de GULLIVER *et al.* (1990) :

$$E_{20} = 1 - (1 - E)^{1/f} \quad (3)$$

$E_{20}$  est l'efficacité d'oxygénation à 20 °C;  
 $E$  est l'efficacité d'aération à une température  $T$ ; et  
 $f$  est une fonction de la température selon la relation suivante :

$$f = 1 + 2,1 \cdot 10^{-2} (T - 20) + 8,26 \cdot 10^{-5} (T - 20)^2 \quad (4)$$

Les valeurs d'efficacité que nous avons mesurées à température ambiante par des mesures d'oxygène dissous à différentes températures ont été normalisées à 20 °C par la relation de GULLIVER.

La majorité des études existantes (BAYLAR *et al.*, 2006, 2007; TOOMBES et CHANSON, 2005) n'intègrent pas la totalité des paramètres significatifs. De plus, les débits d'eau étudiés sont assez élevés et ne correspondent pas aux débits dans les petites rivières. Nous nous sommes donc focalisés sur des débits plus faibles avec un spectre de modularité du pilote plus important bien que les résultats présentés ici soient ciblés sur une structure donnée.

## 2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Pour évaluer l'aération dans les cascades, un pilote en marches d'escalier a été construit. Ce pilote, représenté par la figure 1, est géométriquement modulable. Il offre la possibilité de varier les hauteurs et longueurs des marches et leur nombre.

La procédure expérimentale consiste à appauvrir l'eau en oxygène en ajoutant du sulfite de sodium et du di-chlorure de cobalt comme catalyseur dans un bac agité d'un mètre cube de volume.

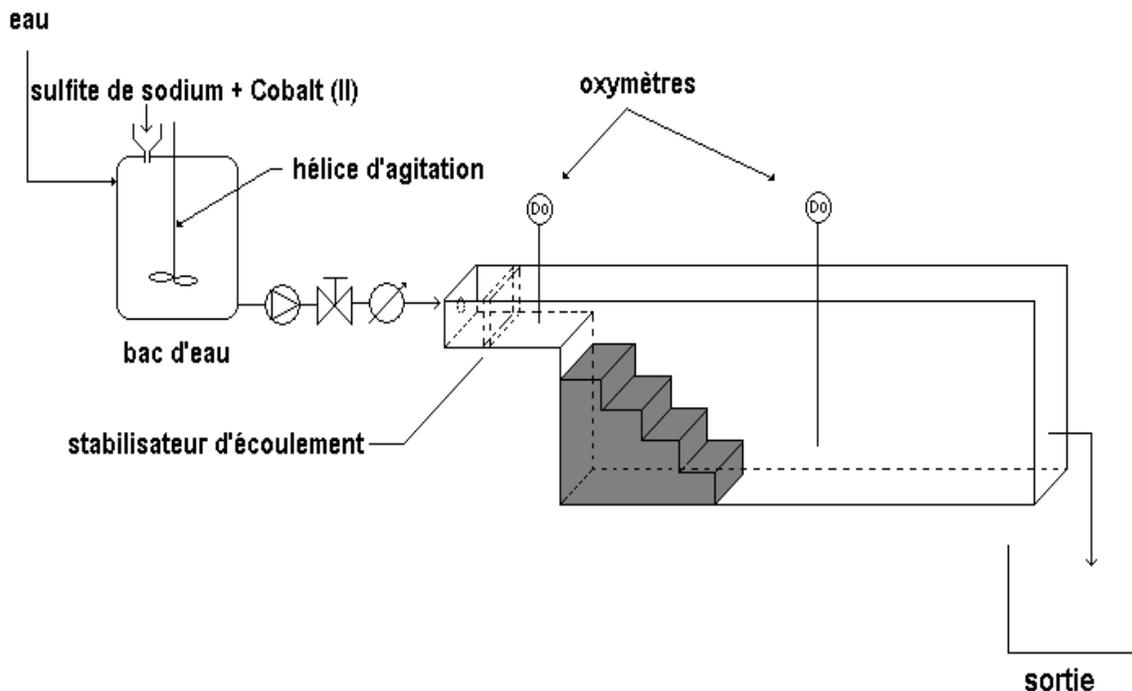
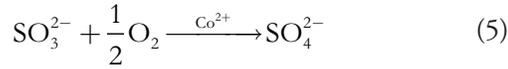


Figure 1. Schéma du montage expérimental.  
*Experimental setup.*

L'oxygène dissous dans l'eau est consommé selon la réaction suivante :



L'eau est partiellement désoxygénée. Les expériences ont été menées avec des taux d'oxygène à l'amont variant entre  $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  et  $2,5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . Ensuite, l'eau s'écoule sur la cascade où le taux d'oxygène dissous est contrôlé à l'amont et à l'aval par des oxymètres METTLER TOLEDO SG9 munis d'une électrode de mesure optique « Inlab Optiox ». Les concentrations d'oxygène relevées à l'amont et à l'aval de la cascade, ainsi que la concentration de saturation donnée par les oxymètres permettront le calcul de l'efficacité E.

Dans la présente étude, les systèmes étudiés sont :

- des cascades de 3, 4 et 5 marches simples, dont les dimensions (longueur et hauteur désormais notées l et h respectivement) sont de 10 cm;
- des cascades de 3, 4 et 5 marches simples,  $h = 10 \text{ cm}$  et  $l = 14 \text{ cm}$ ;
- une cascade de 5 marches simples,  $h = 10 \text{ cm}$  et  $l = 5,5 \text{ cm}$ .

Ces cascades ont ensuite été modifiées par ajout de graviers.

Les marches ont été fabriquées à partir de polystyrène. Les graviers ont été éventuellement collés sur les marches en utilisant du silicone, pas d'espace laissé entre les graviers. Trois tailles de graviers ont été utilisées : 2 cm, 3,5 cm et 5 cm avec des densités surfaciques respectivement de 2 300, 830 et 400 cailloux $\cdot\text{m}^{-2}$ .

Les expériences ont été menées à des températures d'eau allant de  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  à  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Les relations 3 et 4 ont permis de calculer l'efficacité d'aération à une température référence de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , ce qui a permis de faire l'ensemble des comparaisons représentées dans cette étude.

### 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

#### 3.1 Mécanismes d'aération dans une cascade d'eau

La figure 2 représente les trois régimes d'écoulement dans une cascade d'eau. Le tableau 1 présente les caractéristiques de ces trois régimes d'écoulement.

Dans le cadre de notre étude, seuls les régimes d'écoulement nappe et transitoire ont été étudiés. Les observations

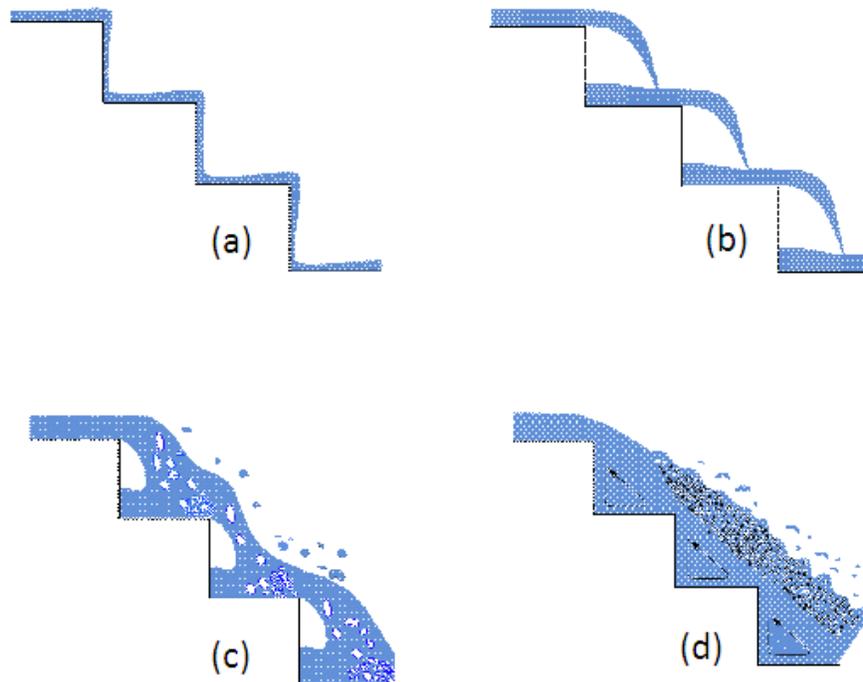


Figure 2. Régimes d'écoulement en cascade : (a) régime nappe 1, (b) régime nappe 2, (c) régime transitoire, (d) régime turbulent.

*Flow regimes in cascade (a) nappe 1 regime, (b) nappe 2 regime (c) transition regime, (d) skimming flow.*

**Tableau 1.** Caractéristiques des régimes d'écoulement en cascade.  
**Table 1.** Flow regime characteristics on the stepped cascade.

Régime d'écoulement	Caractéristiques
<b>Nappe</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* L'écoulement est une série de petites chutes consécutives (Figure 2a, 2b)</li> <li>* À faible débit et/ou grandes longueurs de marches (BAYLAR <i>et al.</i>, 2006)</li> </ul>
<b>Transitoire</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Transition entre les régimes nappe et turbulent (OHTSU et YASUDA, 1997)</li> <li>* Intermittence et instabilité de l'écoulement (Figure 2c)</li> <li>* Coexistence des deux régimes d'écoulement sur différents endroits de la cascade</li> </ul>
<b>Fortement turbulent</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Caractérisé par la formation des zones de recirculation maintenues dans les coins des marches grâce aux contraintes de cisaillement (Figure 2d) (BAYLAR <i>et al.</i>, 2007)</li> <li>* À fort débit et/ou petites longueurs de marches</li> </ul>

expérimentales ont montré qu'au sein du régime nappe, deux « sous-régimes » sont identifiables :

- Régime nappe 1 : à faibles débits d'eau, un film d'eau adhérent à la totalité de la surface de la cascade;
- Régime nappe 2 : le film d'eau décolle des contremarches donnant naissance à des jets d'eau.
- Régime de transition : la longueur des sauts des jets d'eau approche la longueur des marches et l'écoulement devient intermittent et instable.

En régime nappe 1, l'aération se fait grâce à la surface libre d'échange entre l'air et l'eau.

Le passage du régime nappe 1 au régime nappe 2 s'accompagne par l'ajout d'effets supplémentaires d'aération :

- Aération par la face inférieure du jet;
- Aération par entraînement d'air et formation des bulles d'air à l'impact du jet;
- Aération par les gouttelettes d'eau formées suite à l'impact du jet sur la marche (zone de spray comme le montre la figure 3);
- Aération par entraînement de l'air en aval de l'impact grâce au ressaut hydraulique, qui prend lieu après l'impact du jet.

En régime de transition, le volume d'eau sur la cascade, la taille des inclusions gazeuses et l'intensité de turbulence augmentent considérablement comme le montre la figure 2c.

Le transfert d'oxygène dépend essentiellement de l'intensité de turbulence, l'aire interfaciale air-eau, de la température et du temps de séjour des inclusions d'air dans l'eau. Il peut arriver que les températures de l'eau en amont et en aval de la

cascade ne soient pas les mêmes. Les calculs ont été faits avec la moyenne de température entre l'entrée et la sortie de la cascade.

L'effet de la température est implicitement intégré dans le calcul de l'efficacité de transfert  $E$  puisqu'on utilise directement la concentration d'oxygène dissous qui varie selon la température de l'eau.

### 3. 2 Effet du débit d'eau sur l'aération

La figure 4 illustre l'effet du débit d'eau sur l'aération. La courbe  $E = f(q)$  ( $q$  étant le débit d'eau exprimé en  $L \cdot s^{-1}$ ), montre trois phases d'aération. D'abord, l'efficacité de transfert décroît avec le débit quand il est à  $0,23 L \cdot s^{-1}$ . Ensuite, quand le débit est compris entre  $0,23 L \cdot s^{-1}$  et  $0,8 L \cdot s^{-1}$ , l'efficacité d'aération  $E$  croît avec le débit. Finalement, à un débit supérieur à  $0,8 L \cdot s^{-1}$ , l'efficacité d'aération diminue brusquement pour atteindre un palier.

Ces variations d'efficacité s'expliquent par les variations de débits étudiés, et donc les trois régimes d'écoulement cités plus haut :

- Quand le débit est inférieur à  $0,23 L \cdot s^{-1}$ , un film d'eau coulant adhère à la totalité de la surface de cascade. Dans ce cas, la configuration diphasique air-eau est dite stratifiée et le transfert d'oxygène s'opère à travers l'unique surface séparant l'air de l'eau. L'augmentation du débit implique une diminution de la surface spécifique d'échange. Par conséquent, l'oxygénation devient moins efficace quand le débit augmente;
- Pour un débit compris entre  $0,23 L \cdot s^{-1}$  et  $0,8 L \cdot s^{-1}$ , l'eau s'écoule sous forme de petites chutes consécutives. Différents

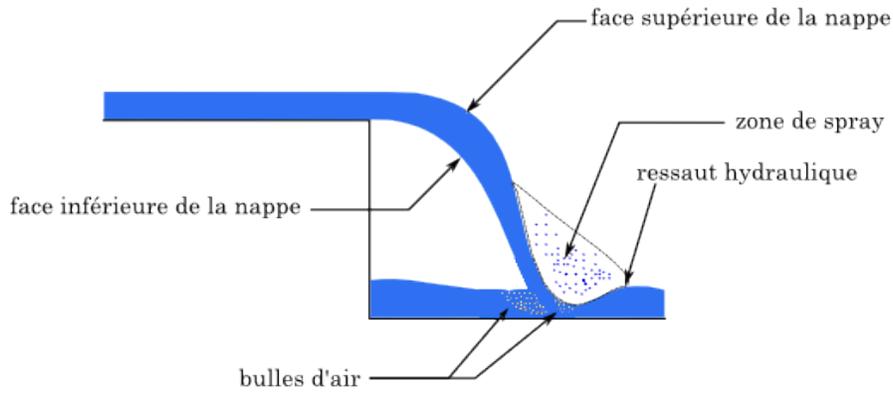


Figure 3. Zones d'aération dans le régime nappe 2.  
*Aeration zones in nappe 2 flow.*

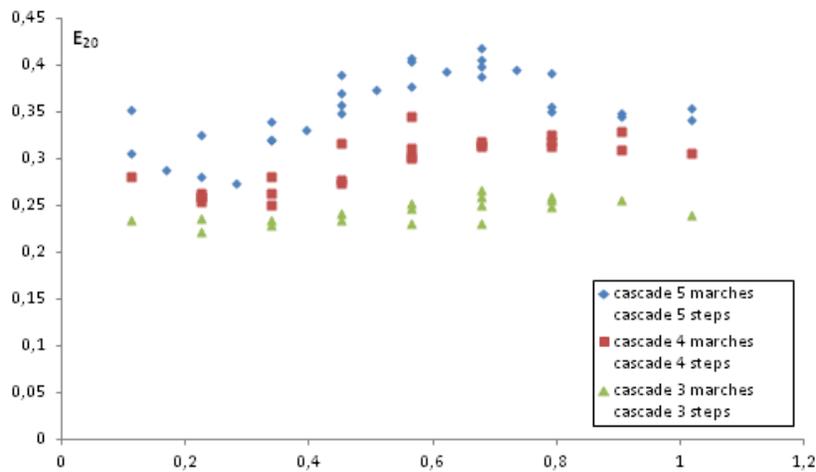


Figure 4. Effet du débit sur l'efficacité d'aération.  
*Effect of flow rate on the aeration efficiency.*

mécanismes d'aération interviennent : au niveau des interfaces supérieures et inférieures du jet d'eau et au niveau de leurs impacts (bulles d'air et gouttelettes d'eau). Dans ce cas, l'aération croît avec l'augmentation de l'interface d'échange par rapport au régime nappe 1;

- Après une chute rapide, l'efficacité  $E$  se stabilise aux alentours d'une valeur de 0,34 avec de légères fluctuations.

### 3.3 Effet du nombre de marches

L'efficacité globale d'aération en cascade peut être exprimée en fonction des efficacités individuelles des marches (GAMESON, 1957) :

$$E = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - E_i) \quad (6)$$

$E_i$  est l'efficacité de la  $i^{\text{ème}}$  marche;  
 $n$  étant le nombre de marches.

La relation 6 décrit une augmentation de l'efficacité d'oxygénation en fonction du nombre de marches. Si les efficacités d'aération individuelles  $E_i$  varient légèrement d'une marche à une autre, l'efficacité est une fonction linéaire du nombre de marches.

Trois cascades de 3, 4 et 5 marches ont été testées ( $h = l = 10$  cm). La figure 5 représente l'évolution des efficacités d'aération en fonction du débit sur ces trois cascades. À un débit donné, l'efficacité varie linéairement avec le nombre de marches.

Cette tendance a été confirmée sur le système de marches ( $h = 10$  cm et  $l = 14$  cm).

### 3.4 Effet des graviers sur le transfert d'oxygène

L'ajout de graviers sur les marches permet d'augmenter l'intensité de turbulence et de s'approcher du milieu naturel. À

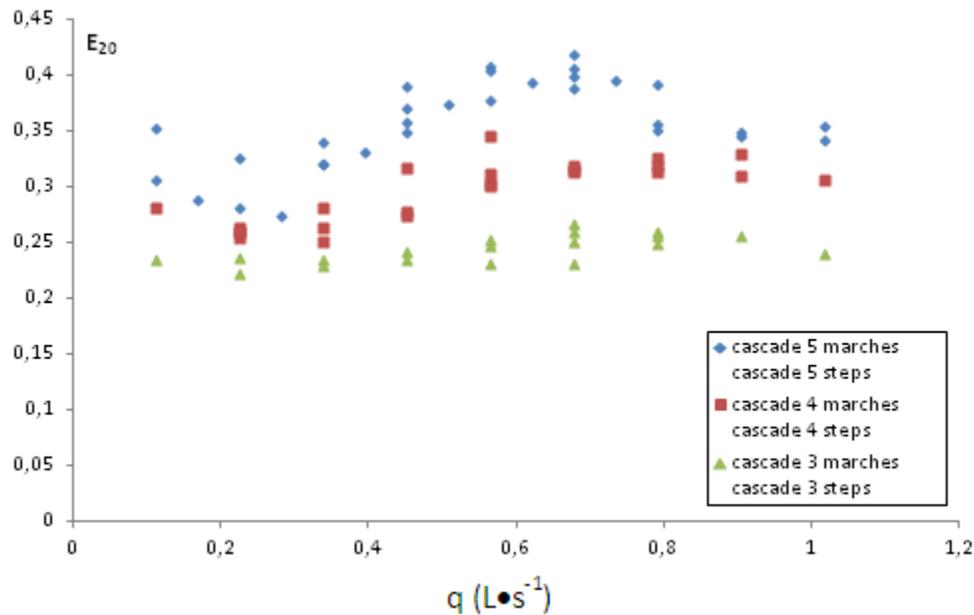


Figure 5. Effet du nombre de marches de la cascade.  
Effect of the number of cascade steps.

l'échelle du laboratoire, les expériences ont été menées sur une cascade de 5 marches ( $h = l = 10$  cm) sur lesquelles des graviers ont été déposés. Deux méthodes ont été utilisées pour éviter un entraînement des graviers par le courant d'eau :

- En plaçant des rebords d'une hauteur de 3 cm comme le montre la figure 6;
- ou
- En collant les graviers sur les marches comme représenté par la figure 7.

Les rebords contribuent à l'augmentation du volume d'eau sur la cascade. Dans ce cas, l'effet des graviers en tant que promoteur de turbulence se « ressent » beaucoup moins que dans le cas où les graviers sont collés sur les marches. L'augmentation du volume d'eau sur la cascade d'eau résulte en une diminution du rapport entre l'aire interfaciale d'échange entre l'air et l'eau et le volume d'eau, ce qui cause une atténuation de la capacité d'oxygénation particulièrement remarquable en régime nappe comme le montre la figure 8. Dans ce cas, la variation de la taille des graviers n'a pas d'effet significatif sur le transfert d'oxygène dans la cascade. La comparaison entre la cascade avec gravillons et obstacles et la cascade avec obstacles et sans gravillons ne décèle pas une différence significative en ce qui a trait au transfert d'oxygène.

Par rapport à une cascade à marches simples, sur la figure 9, une légère amélioration du transfert d'oxygène a été constatée dans la cascade avec des graviers collés pour des débits compris entre  $0,1 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  et  $0,6 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  et entre  $1 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  et  $2 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ . Dans ce

cas, les graviers augmentent la turbulence de l'écoulement sur les marches et améliorent le transfert d'oxygène.

Ces résultats nous mènent à conclure que la rétention des graviers sur les marches par des obstacles conduit à la formation d'un volume d'eau stagnant au-dessus des graviers, ce qui annule leurs effets sur l'hydrodynamique de l'écoulement.

Le niveau d'immersion des graviers est un paramètre important dans l'aération. L'augmentation du volume d'eau total sur la cascade sans augmentation d'entraînement d'air conduit à la diminution de l'aire interfaciale par unité de volume entre les milieux gazeux et liquide, ce qui limite le transfert d'oxygène.

### 3.5 Effet de la longueur de la cascade

Pour étudier l'effet de la longueur des marches de la cascade sur le transfert, trois cascades de 5 marches, dont les longueurs sont de 5,5 cm, 10 cm et 14 cm ont été comparées en matière d'efficacité d'aération  $E$ . Pour les trois cascades étudiées, la hauteur des marches est de 10 cm.

Les courbes d'efficacité d'aération à  $20^\circ\text{C}$  en fonction du débit d'eau ont été dressées pour les trois cascades comme représentées sur la figure 10. Les résultats montrent une amélioration du transfert d'oxygène avec la diminution de la longueur de la cascade en régime nappe.

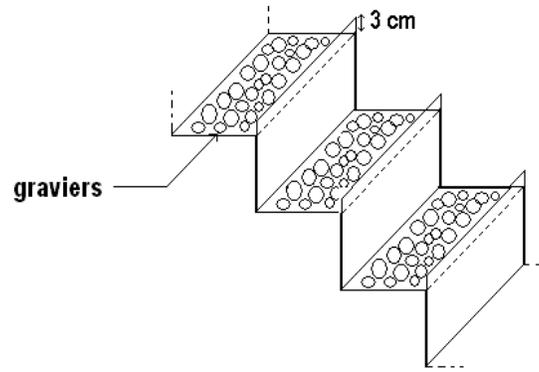


Figure 6. Schéma de la cascade avec des graviers retenus par des rebords.  
*Scheme of the cascade with gravel retained by sills.*

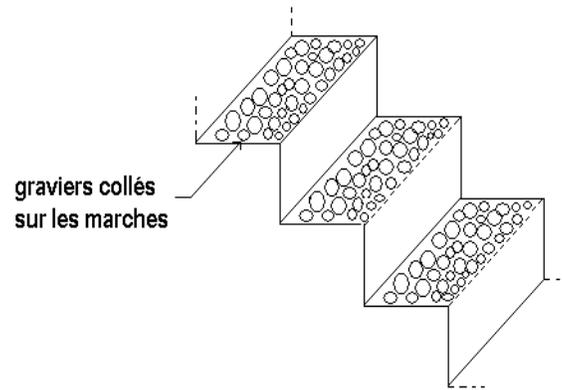


Figure 7. Schéma de la cascade avec des graviers collés.  
*Scheme of cascade with fixed gravel.*

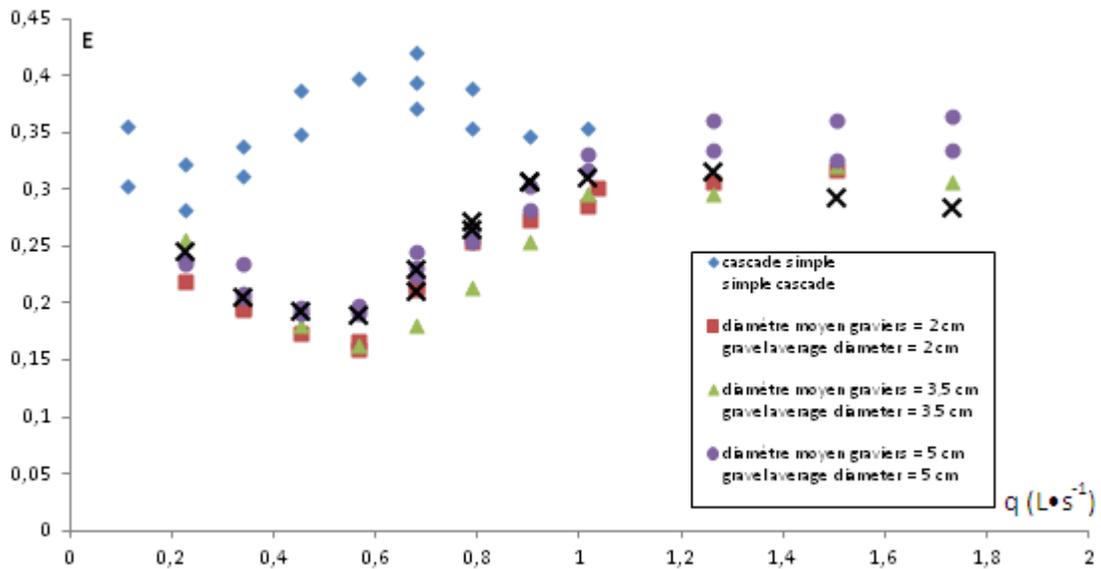


Figure 8. Effet des graviers retenus par des rebords sur l'aération.  
*Effect of gravel retained by sills on the aeration.*

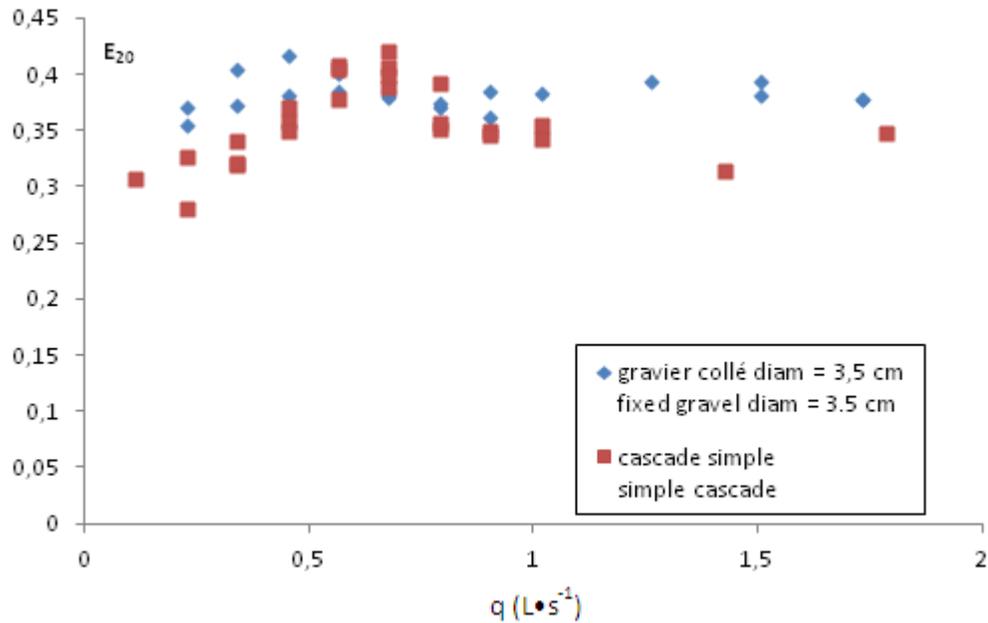


Figure 9. Effet des graviers collés sur l'aération.  
*Effect of fixed gravel on the aeration.*

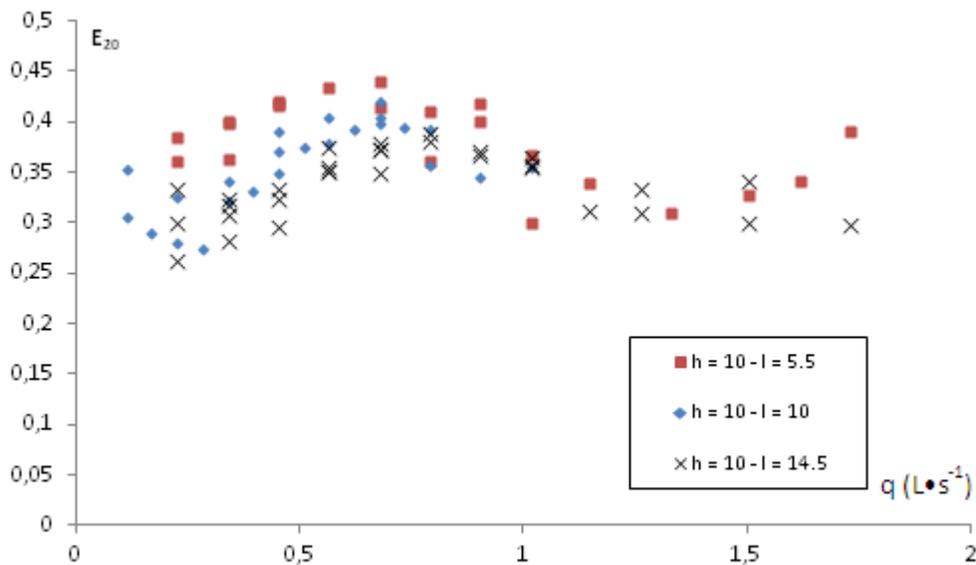


Figure 10. Effet de la longueur de la cascade.  
*Effect of the cascade length.*

Au-delà de  $1 L \cdot s^{-1}$ , la cascade avec des marches de longueurs de 5,5 cm n'est plus représentative d'une cascade à 5 marches puisque le saut de la chute d'eau à la première marche atteint une longueur de deux marches (soit 11 cm).

Bien que le parcours de l'eau sur la cascade avec une longueur de marche de 14 cm est le plus long parmi les trois cas étudiés, l'efficacité est la moins importante sur le régime nappe.

#### 4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'efficacité d'aération d'une cascade en marches d'escalier a été étudiée pour augmenter l'aération en rivière dans le cadre des projets de renaturation. Le comportement de l'aération varie avec le débit et est lié à la configuration diphasique dans les trois régimes d'écoulements rencontrés (nappe 1, nappe 2 et transitoire). Dans les cascades sans rebords, les résultats

expérimentaux ont révélé que le régime nappe est le plus intéressant en matière d'oxygénation. En outre, une relation de proportionnalité entre le nombre de marches et l'efficacité d'aération E a été montrée. L'effet des graviers sur l'aération est une fonction de leur niveau d'immersion dans l'eau. Quand les graviers sont retenus par des rebords, le volume d'eau sur les marches augmente alors que le transfert d'oxygène reste globalement le même puisque la surface d'échange n'augmente pas. Il s'ensuit une plus faible augmentation ou une diminution de la concentration d'oxygène par rapport à une cascade simple aux mêmes dimensions. La fixation des graviers sur les marches permet de baisser le niveau d'immersion des graviers et d'améliorer le transfert d'oxygène grâce à l'intensification de la turbulence. Dans une démarche de réoxygénation des cours d'eau, l'utilisation des cascades sera d'autant plus efficace que l'écoulement tend vers un régime nappe, c'est-à-dire une cascade avec des longueurs de marches supérieures à leurs hauteurs. En milieu naturel, ces cascades peuvent être construites à partir de matériaux naturels (à titre d'exemple, par assemblage de cailloux). Leur installation en pente permettrait d'éviter les nuisances reliées à la rétention des espèces aquatiques par un tel seuil. L'ajout de gravier sur les marches permet d'augmenter l'aération, l'effet de changement des hauteurs des marches ainsi que le volume d'eau sur la cascade. Des simulations de mécanique des fluides numérique permettront d'accéder à une mesure locale de l'aire interfaciale. Une modélisation générale de l'aération sur les cascades permettra de fournir des éléments de dimensionnement utiles dans la restauration des petits cours d'eau en permettant une re-aération en continu, ce qui favorisera l'autoépuration. Cette approche peut être aussi utilisée à l'entrée des ZRV (zone de rejet végétalisée) et à la sortie des STEP.

- BAYLAR A., E. EMIROGLU et T. BAGATUR (2006). An experimental investigation of aeration performance in stepped spillways. *Water Environ. J.*, 20, 35-42.
- BAYLAR A. et M.E. EMIROGLU (2003). Study of aeration efficiency at stepped channels. Dans : *Proceedings of the ICE (Institution of Civil Engineers) - Water and Maritime Engineering*, 156, 257-263.
- GAMESON A.L.H. (1957). Weirs and aeration of rivers. *J. Inst. Water Eng.*, 11, 477-490.
- GULLIVER J.S., J.R. THENE et A.J. RINDELS (1990). Indexing gas transfer in self aerated flow. *J. Environ. Eng., ASCE*, 116, 503-523.
- NAKASONE H. (1987). Study of aeration at weirs and cascades. *J. Environ. Eng., ASCE*, 11, 64-81.
- OHTSU I. et Y. YASUDA (1997). Characteristics of flow conditions of stepped channels. Dans : *Proc. 27<sup>th</sup> IAHR Congress*, San Francisco, USA, 583-588.
- TOOMBES L. et H. CHANSON (2005). Air water mass transfer on a stepped waterway. *J. Environ. Eng., ASCE*, 131, 1377-1386.
- TOOMBES L. et H. CHANSON (2000). Air water flow and gas transfer at aeration cascades: a comparative study of smooth and stepped chutes. *Hydraul. Step. Spillway*, 1, 77-84.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AVERY S.T. et P. NOVAK (1978). Oxygen transfer at hydraulic structures. *J. Hydraul. Div., ASCE*, 104, 1521-1540.
- BAYLAR A., M. UNSAL et F. OZKAN (2011). GEP modeling of oxygen transfer efficiency prediction in aeration cascade. *KSCE, J. Civ. Eng.*, 15, 799-804.
- BAYLAR A., M. UNSAL et F. OZKAN (2010). Hydraulic structures in water aeration processes. *Water Air Soil Pollut.*, 210, 87-100.
- BAYLAR A., T. BAGATUR et E. EMIROGLU (2007). Prediction of oxygen content of nappe, transition and skimming flow regimes in stepped-channel chutes. *J. Environ. Eng. Sci.*, 6, 201-208.