



Projet «STORM: Assainissement par temps de pluie»

Rejets urbains de temps de pluie et température des cours d'eau

Luca Rossi, Renata Hari

Auteurs

Luca Rossi

EAWAG, 8600 Dübendorf
Tél. +41-44-823 53 78
Fax +41-44-823 53 89
luca.rossi@eawag.ch

Renata Hari

EAWAG, 8600 Dübendorf
Tel. +41-44-823 55 16
renata.hari@eawag.ch

Une augmentation soudaine des températures en été dans un cours d'eau par des rejets pluviaux en milieu urbain peut être dommageable pour les organismes aquatiques. Est-ce réellement un problème pour notre environnement? Quel est l'ordre de grandeur de cette augmentation de température en début d'événement de pluie? Ces questions seront discutées dans cet article. Une démarche simple pour l'estimation des températures est présentée. Des valeurs limites de températures spécifiques par temps de pluie sont également définies. Plusieurs exemples en Suisse sont illustrés, ceci pour différentes surfaces imperméables.

Introduction

La température est un des paramètres essentiels régissant les équilibres chimiques et le développement de la flore et de la faune dans nos cours d'eau. La température affecte ainsi la concentration en oxygène (cette concentration diminue lorsque la température augmente), la vitesse de photosynthèse pour les plantes aquatiques ou la sensibilité des organismes aux substances toxiques, parasites et maladies [1, 2, 3, 4]. La température est également un paramètre important pour l'estimation de la toxicité ammoniacale [5, 6], décrite entre autres dans un précédent article sur le projet STORM [7].

Mots clés

Température, différence de température, poissons, truites, eaux de ruissellement, déversoirs d'orage, surfaces urbaines

Cet article est le septième d'une série de onze concernant le projet «STORM – Assainissement par temps de pluie» réalisé par l'EAWAG avec le soutien de l'OFEFP.

Temperaturveränderungen im Gewässer bei Regenwetter

Zu Beginn eines Regenereignisses kann in einem Gewässer durch Kanalisationseinleitungen eine plötzliche Temperaturerhöhung stattfinden, die für viele im Wasser lebenden Organismen schädlich sein könnte. Doch wie gross sind solche Temperaturerhöhungen? Und sind sie wirklich problematisch? Diese Fragen werden im folgenden Artikel diskutiert. Es wird eine einfache Temperaturberechnung vorgestellt und spezifische Regenwettergrenzwerte für Temperaturänderungen definiert. Beides wird anhand von Beispielen aus der Schweiz mit unterschiedlichen Arten von befestigten Oberflächen getestet und bestätigt.

Influence of urban stormwater on the temperature of receiving water

A sudden temperature increase due to urban stormwater discharges in receiving waters can be detrimental for aquatic organisms. Is this a real problem for our environment? How important is the initial temperature increase during a rain event? These questions will be discussed in this article. In addition to the definition of limiting values, a simple approach for runoff temperature estimation is presented. Various examples in Switzerland for different impervious surfaces are illustrated.

Les causes de changement de températures dans les cours d'eau sont nombreuses, elles sont dues au climat (variations journalières et saisonnières [8]), à la présence ou l'absence de couverture ombragée le long des rives, à la morphologie du cours d'eau (p.ex. rétention derrière une digue), le rejet d'eau de refroidissement, l'alimentation d'un cours d'eau par une nappe souterraine ou les rejets pluviaux urbains [9, 10, 11].

Les rejets urbains par temps de pluie peuvent conduire ainsi à un problème de température pour le milieu récepteur. De par l'imperméabilisation progressive des sols ($1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ en Suisse) et le développement des agglomérations, les eaux de ruissellement atteignent rapidement les cours d'eau et peuvent générer en été une augmentation de température en début d'averse. En effet, les surfaces imperméables en asphalte ou les toitures atteignent des températures importantes ($>60 \text{ °C}$) alors que les températures sont déjà critiques dans les cours d'eau avec un débit moindre. Le problème des effets d'une augmentation de température par ce type de rejet a été soulevée dans le canton d'Argovie, où les pêcheurs suspectent la température des rejets urbains de temps de pluie de perturber le développement de certaines espèces de poissons. La question liée à la température des rejets pluviaux sera donc traitée dans cet article. Des valeurs limites spécifiques par temps de pluie sont proposées et une démarche simple de calcul est illustrée. Cette démarche est validée par les résultats de trois études menées en Suisse sur différents types de surfaces imperméables.

Définition de critère pour la température

L'Ordonnance sur le déversement des eaux (OEaux 2003) fixe une différence de température maximale dans les cours d'eau après rejet de 3 °C ou $1,5 \text{ °C}$ pour les tronçons à truites. La température maximale est fixée à 25 °C (OEaux annexe 2, art. 12: 4). En outre, l'annexe 3.2 art. 2 précise que la température maximale pour le déversement d'eaux de refroidissement dans les eaux ne doit pas dépasser 30 °C en été. Des dépassements minimes, de courtes durées, peuvent être autorisés. Les valeurs législatives se basent sur des critères à long terme de changement de température ($>1 \text{ an}$), critères qui ne s'appliquent pas pour des changements de courte durée comme c'est le cas pour les événements de pluie. Les valeurs limites proposées ici, spécifiquement dédiées au temps de pluie, se basent sur les espèces les plus sensibles dans nos rivières, en l'occurrence les salmonidés. De manière générale, la température maximale ou minimale tolérée par les organismes aquatiques dépend de nombreux facteurs [12, 13]:

► La *température d'acclimatation* (température à laquelle les espèces de poissons ont l'habitude de vivre). En général, les poissons habitués à vivre dans des eaux à températures relativement élevées sont moins sensibles à une augmentation de température;

► La *durée d'exposition* à une température différente: la durée d'une augmentation de température en début d'un événe-

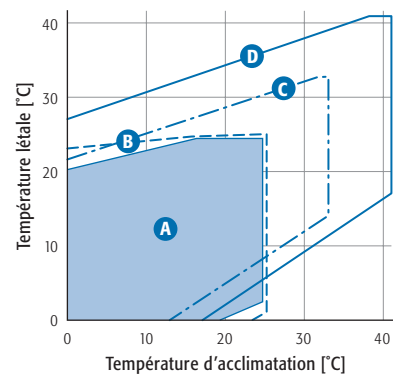


Figure 1: Espace de température acceptable pour différentes espèces de poisson. A: truite de rivière, B: amblé de fontaine, C: gardon; D: dorade chinoise (= goldfish) en fonction de la température d'acclimatation. Les différentes espèces de poissons peuvent survivre à long terme sans dommages jusqu'aux valeurs létales [16].

ment est relativement courte. Plus cette durée est courte, plus la température maximale admissible est élevée;

► La *température maximale ou minimale* causant une mortalité. Ces températures maximales ou minimales sont fixées pour chaque espèce de poisson [14];

► Le *type d'espèce considérée et le stade de développement*: les salmonidés sont généralement plus sensibles que d'autres espèces peuplant nos rivières. En outre, le stade de développement joue également un rôle. Le stade juvénile, le plus sensible, est généralement considéré;

► La *différence de température*: une grande différence de température entre la température initiale et finale (par exemple 7 °C) peut être problématique, quand bien même la température maximale n'est pas atteinte;

► La *vitesse à laquelle le changement de température s'opère*. Lors d'un événement de pluie, on s'attend à un brusque changement de température (plusieurs $°\text{C}$ par minute), alors que les changements «naturels» journaliers de température ($0,5\text{--}1 \text{ °C}$ par heure) n'occasionnent aucun dommage pour les espèces de poissons [15].

A titre d'exemple, la figure 1 donne les températures létales en fonction de la température d'acclimatation et de la durée d'exposition. Cette figure illustre en quelque sorte un «espace de températures» permettant la survie d'une espèce.

Sur la base de ces observations, trois critères ont été définis (tableau 1), qui se réfèrent à une température maximale en été après mélange complet dans le milieu récepteur (T1), à une différence maximale entre la température initiale et finale (T2) et finalement à une température maximale en

Critère	Paramètre de température	Valeur limite
T1	Température max. après rejet par les canalisations (avril à octobre)	$<25 \text{ °C}$ ou Fig. 2
T2	Augmentation max. de température due aux rejets par les canalisations	$<7 \text{ °C}$
T3	Température max. après rejet par les canalisations (novembre à mars)	$<12 \text{ °C}$

Tableau 1: Critère de température pour les rejets urbains de temps de pluie.

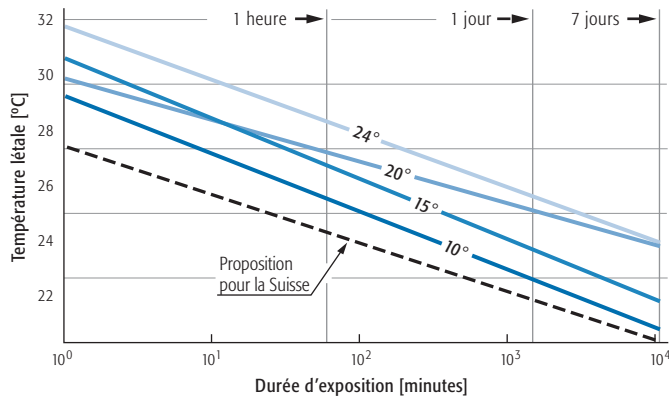


Figure 2: Température de survie en fonction de la durée d'exposition pour de jeunes salmonidés (entre 1 et 3 ans) et en fonction de différentes températures d'acclimatation (10, 15, 20, 24 °C). Les données limites de températures sont fournies par [19]. Une proposition pour la Suisse est également présentée.

hiver (T3). Ce dernier critère est spécifiquement lié aux systèmes d'assainissement unitaires.

Comme on a pu le voir dans le projet STORM, les aspects dynamiques jouent un rôle très important lors d'un événement de pluie, c'est également le cas pour la température. Ainsi, le critère T1 se base sur une courbe de type CDF (concentration-durée-fréquence) prenant en compte le temps d'exposition à une certaine température [17]. De telles courbes ont été proposées pour de jeunes salmonidés [18, 19]. Elles représentent, en fonction du temps d'exposition, la température permettant la survie de 100% de la population de poisson (figure 2).

De manière à généraliser ces résultats, une courbe limite est proposée pour la Suisse, quelle que soit la température d'acclimatation initiale. La durée d'exposition, pendant laquelle les surfaces imperméables vont se refroidir par l'effet de la pluie, est estimée de manière conservatrice à 1 heure. La courbe proposée pour la Suisse tient compte d'une marge de sécurité de l'ordre de 2 °C, pour une durée d'exposition de 1 heure, telle que proposée par différents auteurs [19, 20]. Ainsi, la température maximale tolérée sera de 28 °C pour une durée d'exposition de 1 minute, de 27 °C pour une durée de 10 minutes et de 25 °C pour une exposition de 1 heure.

Le critère T2 se base sur différentes études menées en laboratoire. La première étude consistait à simuler un choc thermique pour une espèce de truite (*Salmo trutta*) acclimatée dans de l'eau à 12 °C provenant du Rhin. Ces poissons ont été soumis à une élévation de température de 7 °C pendant 2 heures, puis replacés dans les conditions initiales [21]. Des effets au niveau de la peau étaient apparents après 3 heures et des dommages au niveau des branchies ont également été rapportés. L'étude s'est poursuivie pendant 29 jours de manière à suivre le taux de récupération des poissons. Cette récupération est faible à la fin de ce test, après 29 jours. Il semble que ce choc thermique ait été problématique pour les truites. Dans la seconde étude, la même espèce de truite

a été soumise à un brusque changement de température (de 8 °C à 19 °C) pendant deux heures, puis replacées à la température initiale de 8 °C [22, 23]. Plusieurs analyses ont été menées après exposition, puis après 24 heures et 48 heures. Des protéines de stress (*Heat Shock Protein*: HSP) ont notamment été analysées [24]. Après 48 heures, le taux de protéines de stress était semblable à celui des poissons non exposés, et les observations visuelles ont montrées une nette régénération des poissons exposés. Dans ce cas, il semble que le choc thermique (11 °C pendant 2 heures) puisse être acceptable pour les truites. Sur la base de ces études, nous proposons ainsi de retenir 1 heure comme durée d'exposition et une élévation de température maximale de 7 °C. Une certaine marge de sécurité est ainsi prise en compte, en considérant que les effets d'une augmentation de 11 °C pendant 2 heures peuvent être supportés par les poissons. En outre, l'augmentation suggérée (7 °C durant 1 heure) ne sera tolérée en moyenne qu'une fois tous les 2 ans (cf. démarche de calcul).

Le critère T3 se base sur une température critique pour le développement des oeufs et des larves de poissons. En hiver, dans la période de septembre à mars, les oeufs de poissons déposés dans le lit des rivières sont particulièrement sensibles aux polluants et aux changements de température. Les oeufs sont déposés en novembre dans le lit des rivières et leur éclosion se déroule en février ou mars. L'éclosion se passe après un certain nombre de jours, en fonction notamment de la température de l'eau. La méthode de calcul se base sur la somme des degré-jours pour cette période, par exemple 420 degré-jours pour les truites de rivière (soit environ 80–90 jours entre 4–5 °C) [25]. De manière à éviter une éclosion prématurée des oeufs ou une mortalité, la température maximale pour la période de novembre à mars ne devra pas dépasser 12 °C [26]. Notons qu'une température inférieure à 1 °C ou supérieure à 9 °C peut déjà conduire à une augmentation de la mortalité pour les oeufs de salmonidés [27]. La probabilité de survie à une température de 1 °C en hiver est beaucoup plus faible que celle correspondant à un dépassement de la température maximale en été [28]. La température maximale hivernale pourrait être dépassée lors de déversements par temps de pluie, pour des bassins versants unitaires sur lesquels sont implantées des installations générant une grande quantité de chaleur. On parle ainsi de «chaleur usée», par comparaison aux eaux usées. A ce propos, rappelons que la température maximale autorisée pour le rejet d'eaux industrielles dans une canalisation est de 60 °C, 40 °C après mélange complet (OEaux, annexe 3.2, art. 2). A l'opposé, des températures trop basses qui pourraient résulter par exemple du rejet de neige dans un cours d'eau sont également à éviter. Il faut s'attendre dans ce cas à un abaissement de température préjudiciable pour la faune. De plus, la neige collectée sur les routes ou dans les agglomérations à tendance à accumuler de nombreuses substances potentiellement dangereuses pour l'environnement.

Démarche simplifiée de calcul pour la température

Différents modèles thermodynamiques ont été proposés pour évaluer la température des eaux de ruissellement au cours d'un événement de pluie [29, 30, 31, 32, 33, 34]. Avant de se lancer dans de telles modélisations, il est possible de recourir à une démarche simplifiée pour estimer le risque lié à une augmentation de température dans un cours d'eau au début d'un événement de pluie. Cette démarche fait appel à différentes étapes (figure 3).

La première étape considère la température du cours d'eau en amont du rejet en été par temps sec. Il s'agit d'identifier en premier lieu les cours d'eau dont la température est *a priori* trop élevée pour les truites. Pour une température maximale journalière supérieure à 22 °C, ou se situant hors de la plage de température idéale (figure 4) pour le développement optimal de truites adultes [8], il existe déjà un stress lié à la température indépendamment des rejets pluviaux. Le problème de température est dans ce cas lié à la morphologie du cours d'eau et/ou à l'absence de végétation (ombrage) [9, 35]. Des conditions climatiques particulières, comme celles de l'été 2003 en Europe, peuvent également générer des températures exceptionnellement importantes et fragiliser les populations piscicoles.

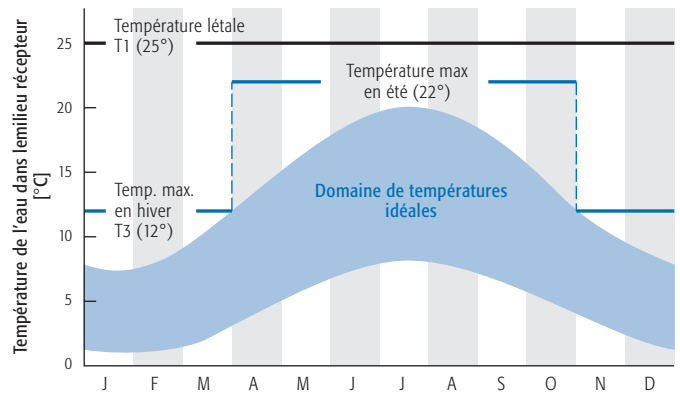


Figure 4: Plages de températures idéales pour le développement optimal des espèces de truites [8], ainsi que limites de températures maximale en été (T1: 25 °C), température moyenne journalière tolérable (22 °C) et température maximale hivernale (12 °C).

Si la première condition est remplie ($T_{moy} \leq 22 \text{ °C}$, températures optimales selon figure 4), la deuxième étape nécessite une estimation de la température des eaux de ruissellement. Celle-ci se calcule sur la base d'une corrélation linéaire qui existe entre la température de l'air et la température des eaux de ruissellement, pour des surfaces en asphalté. Cette corrélation a été établie pour différentes conditions climatiques à l'aide d'un modèle thermodynamique, pour une pluie de temps de retour de 2 ans et d'une durée de 1 heure [32].

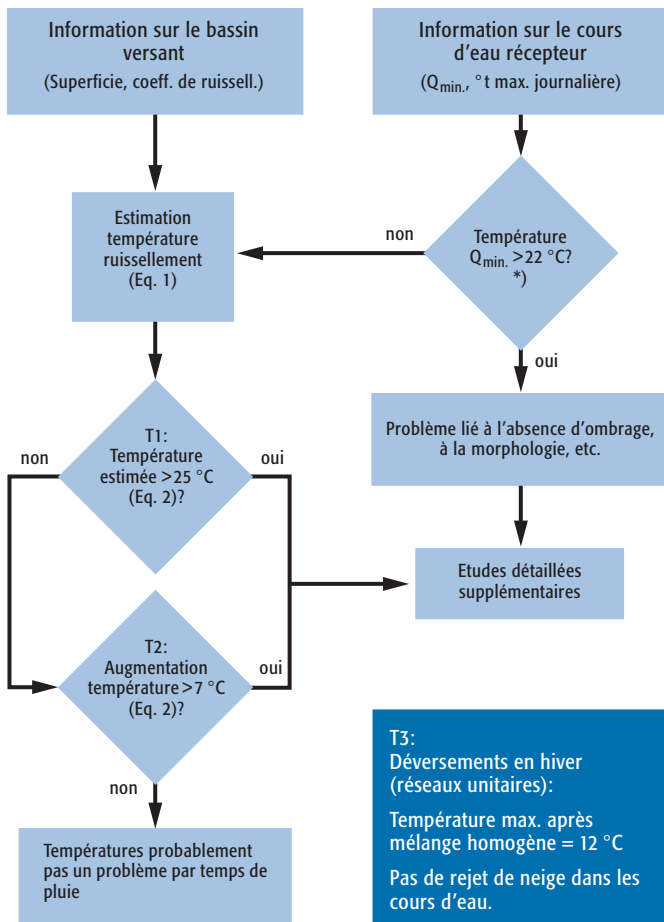
Un facteur de refroidissement est pris en compte dans l'équation 1. En effet, ce modèle se base sur une surface im-

$$T_{ER} = (0,8 T_{air} + 5,2)(1-c) \tag{Eq. 1}$$

T_{ER} : température des eaux de ruissellement (°C)
 T_{air} : température de l'air (°C)
 c : coefficient de refroidissement (-)

perméable plane en asphalté, sans zone d'ombre, qui se rejette directement dans un cours d'eau. Des mesures effectuées sur différents bassins versants montrent un refroidissement (de 20 à 30%) dans les canalisations lors d'un événement de pluie, par exemple pour un parking situé au bord d'un cours d'eau [32]. Ce coefficient de refroidissement est corrélé avec la longueur des canalisations, la nature de la surface imperméable (asphalté, béton, tuile ...), ainsi que l'étendue du bassin versant. Dans une première estimation, il est possible de négliger ce terme. On se place ainsi dans un scénario extrême ou «worst-case».

Comme on peut le voir dans la figure 5, les températures des eaux de ruissellement pour des villes européennes de même latitude que la Suisse ne dépassent pas généralement 21 à 22 °C, dans des conditions «normales» (pluie d'une durée de 1 heure, d'un temps de retour de 2 ans). Lors de conditions exceptionnelles, comme celles de l'été 2003, des températures jusqu'à 29 °C peuvent être rencontrées, mais on se place ici dans des conditions avec des temps de retour extrêmement importants (de l'ordre de 100 ans). De telles températures pourraient se trouver par exemple dans les conditions climatiques que l'on rencontre normalement à Athènes.



*) Ou en dehors du domaine des températures idéales (Fig. 4)

Figure 3: Démarche permettant d'estimer un risque potentiel lié à la température.

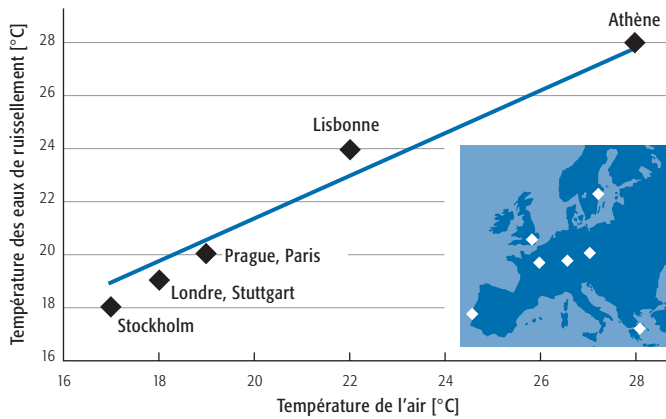


Figure 5: Corrélation entre température de l'air (moyenne horaire) et température des eaux de ruissellement (moyenne horaire), pour des surfaces en asphalte sous différentes latitudes (pluie de 1 heure, temps de retour de 2 ans) [32].

Une fois la température des eaux de ruissellement (T_{ER}) connue, la température résultante (T_{aval}°) dans le cours d'eau peut se calculer à l'aide d'un simple bilan, en considérant le débit temps sec Q_{min} dans le cours d'eau:

$$T_{aval}^{\circ} = \frac{Q_{min} \cdot T_{amont}^{\circ} + Q_{ER} \cdot T_{ER}^{\circ}}{Q_{min} + Q_{ER}} \quad (\text{Eq. 2})$$

Q_{min} : Débit minimal dans le cours d'eau en début d'averse en été. Cette valeur peut être associée la plupart du temps au débit Q_{347} ($l \cdot s^{-1}$).
 T_{amont}° : Température du cours d'eau en amont du rejet ($^{\circ}C$).
 Q_{ER} : Débit ruisselé, calculé par exemple à l'aide de la formule rationnelle pour une pluie d'une durée de 1 heure et un temps de retour de 2 ans ($l \cdot s^{-1}$).

Les résultats de ce calcul sont ensuite confrontés aux critères de la démarche:

- Est-ce qu'après mélange complet dans la rivière la température est supérieure à $25^{\circ}C$?
- Est-ce que l'augmentation de température dans le cours d'eau est supérieure à $7^{\circ}C$?

En cas de réponse positive à l'une de ces questions, une investigation plus poussée est nécessaire, ce qui comprend par exemple la prise en compte des incertitudes sur les données, l'estimation d'un coefficient de refroidissement potentiel à prendre en compte, la discussion avec des organisations de pêcheurs, des mesures in situ. Dans le cas contraire, la température n'est pas considérée comme un problème spécifiquement lié au temps de pluie.

Pour ce qui est des températures en hiver, la même approche peut être utilisée (équation 2), mais nécessite des informations sur la température des eaux rejetées par les déversoirs d'orage et les volumes déversés.

Exemples en Suisse

Afin de valider la démarche proposée, différentes données de températures provenant de plusieurs sites de mesures sont présentées. Ces exemples sont tirés d'études détaillées pour lesquelles les données ont été contrôlées et validées. Différents types de surfaces imperméables sont considérées: toiture, route, zone industrielle. Le premier exemple, dans le

canton d'Argovie, est particulièrement détaillé afin d'illustrer la démarche présentée dans cet article.

Exemple 1: rejet d'eaux de ruissellement de toiture dans un petit cours d'eau (Erzbach, AG)

La section Chasse et Pêche, division forêt du canton d'Argovie demandait des mesures de rétention lors du rejet de débits importants en provenance de zones imperméables. De manière à planifier ces mesures au niveau du PGEE et de pouvoir élaborer rapidement un projet de détail, le canton souhaitait établir une recommandation concernant le risque lié à la température. C'est ainsi que deux études ont été mises en place de manière à estimer dans quelle mesure et pendant combien de temps la température d'un cours d'eau peut être influencée par des rejets pluviaux [36, 37].

Le lieu d'étude considéré dans cet exemple est un quartier de la commune de Erlinsbach (AG). Ce quartier est équipé d'une canalisation séparative qui recueille les eaux de ruissellement de 20 toitures de maisons individuelles ou duplex (au total $2630 m^2$). Les eaux de ruissellement se rejettent dans la rivière «Erzbach», un petit cours d'eau alimenté principalement par des sources.

La température a été mesurée en différents points durant une première campagne en 1999 (de juillet à octobre), puis lors d'une seconde campagne en 2000 (de mai à octobre) (figure 6).

Pour l'estimation des débits dans la rivière, les données d'une station de mesure du canton d'Argovie ont été utilisées (Station n° 377, environ 670 m en amont du rejet des eaux de ruissellement).

Résultats de l'étude

Au niveau du ruisseau Erzbach, le débit minimal (Q_{347}) est estimé à $20 l \cdot s^{-1}$. Les variations maximales de températures enregistrées dans la rivière au point Ta étaient de $3,5^{\circ}C$, avec une température moyenne journalière de $12,2^{\circ}C$ en été. En début d'averse, de courtes augmentations de températures furent enregistrées entre l'amont et l'aval du rejet dans la rivière, sans néanmoins atteindre une variation de plus de $2^{\circ}C$ (figure 7). Le temps nécessaire pour générer cette aug-

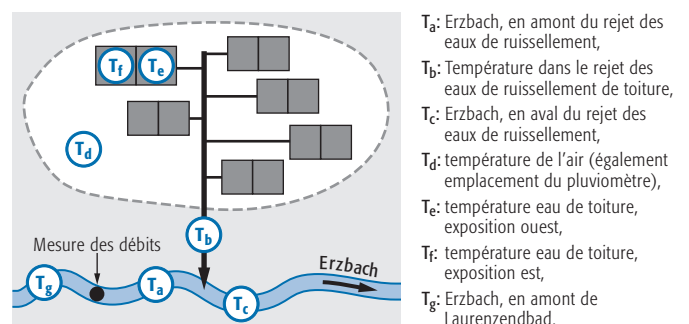


Figure 6: Emplacement des points de mesure de température sur le bassin versant et dans la rivière Erzbach.

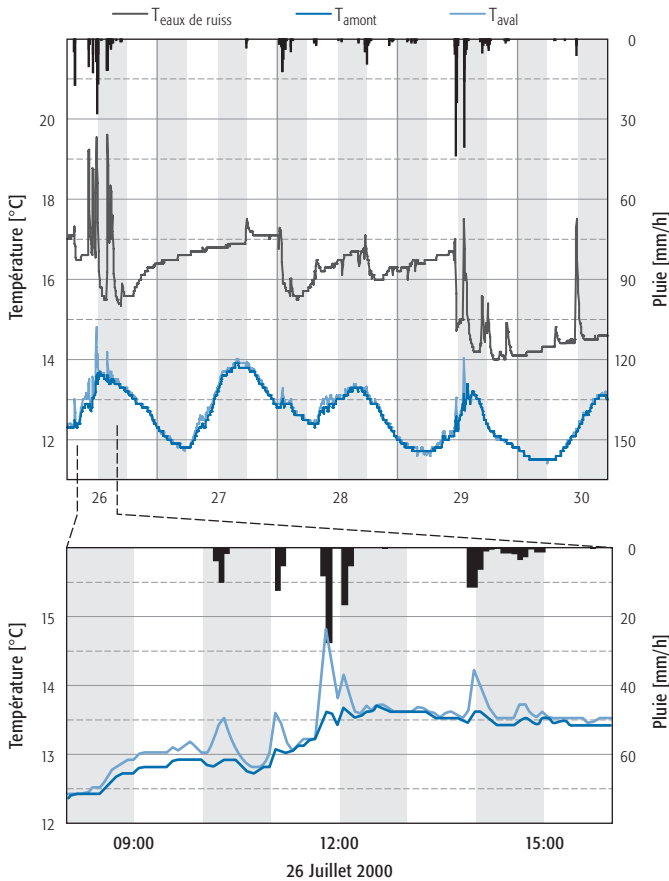


Figure 7a et 7b: Température en amont du rejet (T_a), dans les eaux de ruissellement (T_b) et en aval du rejet (T_c) dans la rivière Erzbach. Les précipitations sont également illustrées (échelle de droite).
 Figure 7a: résultats pour une période du mois de juillet.
 Figure 7b: Zoom sur un événement de pluie (26 juillet).

mentation était de 6–12 minutes. L'augmentation de température n'était plus visible 36–48 minutes après le début d'un événement de pluie [36, 37]. La température maximale mesurée dans le rejet d'eaux de ruissellement de toiture (T_b) était de 2,5 °C (valeur maximale).

Comme on peut le voir dans la figure 7, la température des eaux de ruissellement (T_b) ne dépasse pas 20 °C en été. On constate que des événements de pluie sur une courte période peuvent générer une augmentation de l'ordre de 3 °C de la température des eaux de ruissellement avant leur rejet. Comme pour ces événements le volume ruisselé est faible, cette augmentation de température n'a aucune influence sur le cours d'eau. La température au point T_b est mesurée en continu dans un regard, si bien que les valeurs en dehors des événements pluvieux représentent la température de l'eau stagnante dans le regard ou la température de l'air ambiant. Si l'on se base sur la procédure précédemment décrite, les résultats suivant sont obtenus:

1) Est-ce que la température maximale en amont du rejet dépasse 22 °C en été ou est en dehors de la plage de température idéale (figure 4)?

Non, car la rivière Erzbach est essentiellement alimentée par des sources avec une température relativement basse. La

température moyenne journalière maximale ne dépasse pas 14,5 °C. Les conditions de température sont donc optimales, en considérant la figure 4. La procédure décrite à la figure 3 peut par conséquent se poursuivre.

2) Quelle est l'augmentation de température dans le cours d'eau liée au ruissellement sur des toitures?

Pour répondre à cette question, on estime dans un premier temps la température des eaux de ruissellement sur la base de l'équation 1. Une température moyenne de l'air de 21 °C est prise en compte, pour un événement de pluie d'une durée de 1 heure (cf. figure 5), correspondant à des conditions européennes continentales. La température estimée des eaux de toiture est donc dans ce cas de 22 °C, en négligeant le facteur de refroidissement (sur la base de l'équation 1). Le volume ruisselé peut s'estimer sur la base d'une courbe IDF de Hörler et Rhein pour un temps de retour de 2 ans et une durée de 1 heure:

$$r = \frac{k}{B + t} = \frac{4400}{12 + 60} = 61 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1} \quad (\text{Eq. 3})$$

K, B : Constantes du lieu (Hörler/Rhein)
 t : Durée de la pluie (60 minutes)

L'intensité de pluie estimée à l'aide de cette équation, multipliée par la surface de toiture (2630 m²), nous donne un débit d'eaux de ruissellement pour les toitures de 16 l·s⁻¹. L'augmentation de température résultant de l'apport d'eaux de ruissellement se calcule donc par (équation 2):

$$T_{\text{aval}} = \frac{Q_{\text{min}} \cdot T_{\text{amont}} + Q_{\text{ER}} \cdot T_{\text{ER}}}{Q_{\text{min}} + Q_{\text{ER}}} = \frac{20 \cdot 12,2 + 16 \cdot 22}{20 + 16} = 16,6 \text{ °C} \quad (\text{Eq. 4})$$

La réponse aux questions posées dans la figure 3 (température max. >25 °C, $\Delta t > 7^\circ \text{C}$) sont toutes deux négatives. La température maximale estimée est de l'ordre de 16,6 °C et l'augmentation de température de 4,4 °C, et ce sans tenir compte du coefficient de refroidissement «c» de l'équation 1.

Dans ce cas précis, il n'y a pas de problèmes de température liés aux eaux de ruissellement pour la rivière Erzbach. Le tableau 2 résume les différents résultats des campagnes de mesures et du calcul, en tenant compte ou non d'un coefficient de refroidissement «c» de 20%. Deux événements de pluies sont également détaillés, pour lesquels les données mesurées sont utilisées pour le calcul. Pour ces deux événements, le coefficient «c» a été calculé de manière à reproduire l'écart de température effectivement mesuré. A la vue des résultats obtenus, un coefficient «c» de l'ordre de 10–20% permet d'estimer de manière réaliste l'augmentation de température mesurée dans ce cours d'eau.

Exemple 2: eaux de ruissellement sur différentes toitures et en provenance d'une route (Burgdorf, BE)

Une étude sur la contamination des eaux de ruissellement de toitures a été menée à Burgdorf (www.regenanalyse.ch) [38]. Huit types de toitures, d'une surface chacune de 25 m², ont été: tuile, toitures végétalisées avec différents substrats, métal (cuivre, zinc ...). La température et les débits sont mesurés en

		Erzbach (AG)				Burgdorf (BE)		Aire (GE)
DONNÉES:		c = 0 %	= 20 %	26.7.2000	21.8.2000	Toit tuile	Route	Zone industr.
Q _{min.}	[l/s]	20,0		44,9	58,0	–	–	58,0
T _{amont}	[°C]	12,2		12,3	14,7	–	–	18,5
T _{air}	[°C]	21,0		21,0	21,0	21,0	25,0	21,0
Coefficient «C»	[%]	0	20,0	20,0	13,0	10,0	10,0	11,0
CALCULS:								
T _{Ruissellement}	[°C]	22,0	17,6	17,6	19,1	19,8	22,7	19,6
T _{aval}	[°C]	16,6	14,6	13,7	15,7	19,7	22,7	19,6
ΔT	[°C]	4,4	2,4	1,4	1,0	–	–	1,1
MESURES:								
T _{ruiss. max.}	[°C]	20,5		19,8	21,5	10,0	23,2	19,7
T _{aval max.}	[°C]	16,3		15,0	16,3	–	–	19,3
ΔT	[°C]	1,4		1,4	1,0	–	–	1,0

Tableau 2: Résumé des paramètres, calculs et mesures pour les exemples en Suisse.

continu sur ces toitures par temps sec et par temps de pluie (figure 8).

Pour cet exemple, les données de températures mesurées sont utilisées afin de valider la température maximale que peut atteindre les eaux de ruissellement. De ce fait, nous ne considérons aucun milieu récepteur. La question qui se pose est donc:

Quelle est la température maximale des eaux de ruissellement en été?

Même si la température peut atteindre plus de 55 °C par temps sec en plein été sur une toiture en tuile, la température des eaux de ruissellement n'a jamais dépassé 20 °C (figure 9a). Un détail d'événement pluvieux est donné également dans la figure 9b, pour lequel on constate une diminution rapide des températures de la toiture lors d'un événement de

pluie. Ce résultat confirme la validité de la démarche proposée, pour laquelle la température horaire maximale des eaux de ruissellement en Suisse ne devrait pas dépasser 22 °C. Les résultats du calcul sont également donnés dans le tableau 2. On constate ici aussi que la démarche permet raisonnablement d'estimer la température maximale. Rappelons que cette température maximale des eaux de ruissellement est valable pour une surface en asphalté, pour laquelle l'emmagasinement de chaleur est plus important que pour une toiture. Un coefficient de refroidissement de l'ordre de 10 %, lié dans cas au type de surface (tuile au lieu d'asphalté), permet d'obtenir la valeur de 20 °C effectivement mesurée sur ce site.

Dans le cadre de la même étude, la contamination des eaux de ruissellement routière a fait également l'objet de recherches. Les eaux de ruissellement d'une route (1500 m²) ont été

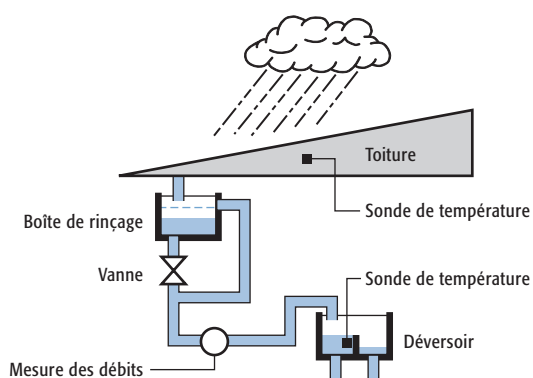


Figure 8: Installation d'expérimentation pour différents types de toitures à Burgdorf (www.regenanalyse.ch). Les numéros correspondent aux différents types de toitures. A droite, schéma de l'installation de mesure. (Photo: B. Gerber, HTA Burgdorf)

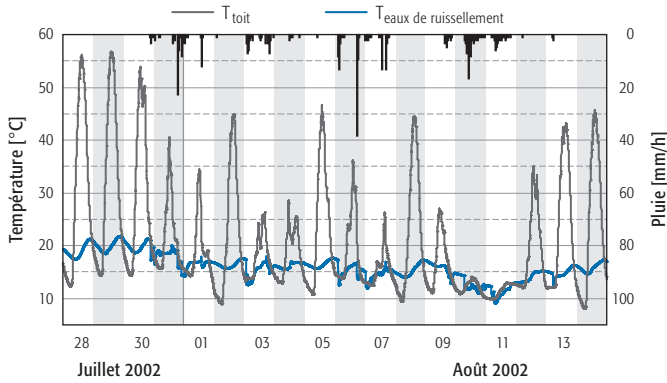


Figure 9a: Température sur une toiture en tuile et dans les eaux de ruissellement pour la période du 28 juillet au 14 août 2002.

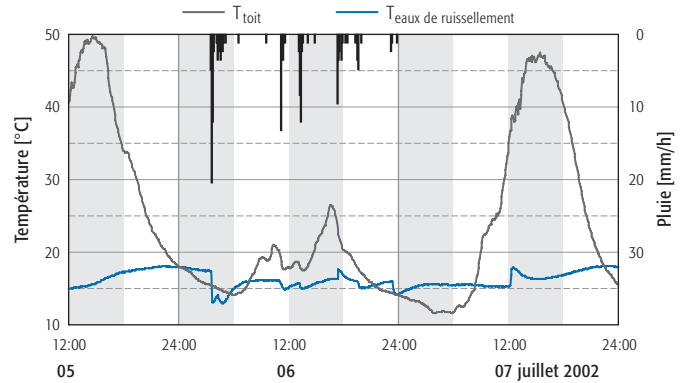


Figure 9b : Détail d'un événement de pluie (6 juillet 2002) pour une toiture en tuile.

directement collectées dans un regard à proximité, puis pompées vers une installation de traitement expérimentale. Les débits et la température des eaux de ruissellement ont été mesurés en continu. Un exemple de résultat est illustré dans la figure 10, pour un événement de pluie le 18 août 2003. Dans ce cas, la température par temps sec correspond à la température de l'eau stockée avant traitement. Dès le début de la pluie (vers midi), la température de l'eau diminue pour atteindre une valeur de 22–23 °C.

Etant donné les conditions particulières de l'été 2003, particulièrement chaud, le calcul de la température des eaux de ruissellement est effectué en tenant compte d'une température de l'air de l'ordre de 25 °C et d'un coefficient de refroidissement «c» de 10%, (collecte de l'eau dans une chambre puis pompage vers l'installation de traitement). Ces données permettent d'estimer une température des eaux de ruissellement du même ordre de grandeur (22,7 °C) que celui mesuré (23,2 °C) (tableau 2).

Exemple 3: Rejet d'eaux de ruissellement d'une zone industrielle dans un cours d'eau (rivière Aires, GE)

Une étude a été réalisée dans le Canton de Genève pour estimer le degré de contamination des eaux de ruissellement issues de zones industrielles [39]. Les impacts potentiels de ces rejets dans la rivière «Aire» ont également fait l'objet de recherches. Pour cela, les températures ont été mesurées en amont et en aval du rejet des eaux de ruissellement de la zone industrielle de Plan-les-Ouates (ZIPLO, 65 ha_{imp}) dans l'Aire par le biais de sondes multi-paramètres. Parallèlement, les débits d'eaux de ruissellement ont été mesurés en continu dans la canalisation du rejet. Les débits de la rivière ont été modélisés sur la base des données d'une station de mesure en amont du rejet. Pour le calcul, les données d'un événement de pluie (13–14 juillet 2002) sont prises en compte (cf tableau 2), avec un débit de base dans l'Aire avant l'événement de pluie de 58 l·s⁻¹. Un exemple de résultat est présenté dans la figure 11, montrant les débits en amont du rejet, le débit du rejet et les températures amont/aval. Les réponses aux questions posées dans la démarche proposées sont les suivantes:

1) Est-ce que la température journalière maximale en amont du rejet dépasse 22 °C en été ou est en dehors de la plage de température idéale (figure 4)?

Dans ce cas, on constate que la température par temps sec dans le cours d'eau est en dehors de la plage de température idéale pour le développement de poissons (figure 4). En outre la valeur limite T1 maximale fixée est pratiquement atteinte par temps sec. Il faut cependant noter que cette rivière fait l'objet d'un important travail de renaturation en amont du

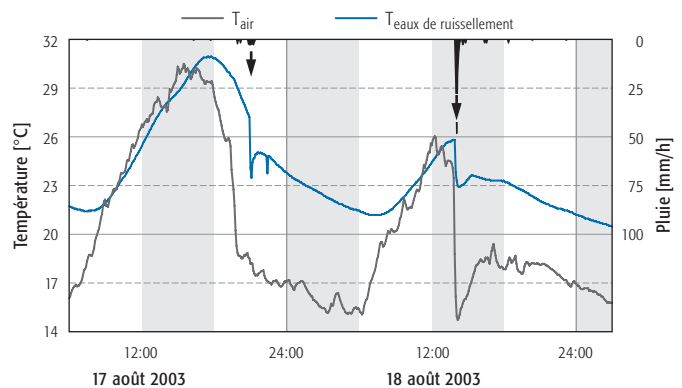


Figure 10: température de l'air et des eaux de ruissellement routières lors d'un événement de pluie le 18 août 2003.

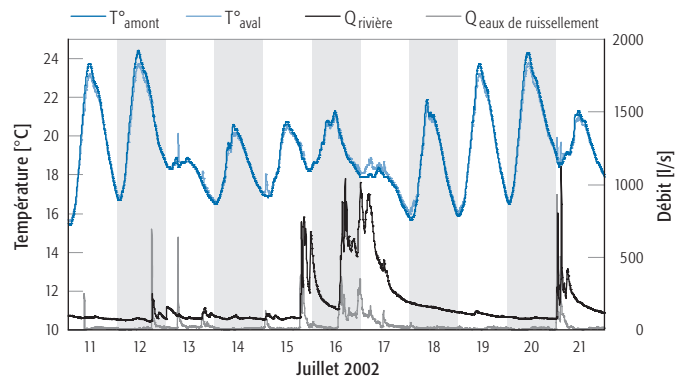


Figure 11: Température dans la rivière Aire en amont et en aval du rejet des eaux de ruissellement d'une zone industrielle. Les débits de ruissellement, ainsi qu'en amont sont également représentés [39].

rejet. Le débit dans le cours d'eau est limité à un maximum de $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pendant les travaux, le surplus étant évacué vers le Rhône par le biais d'une galerie de décharge. Après renaturation, les débits seront plus importants et la plantation d'un couvert végétal le long des rives permettra de réduire les températures actuellement mesurées.

2) *Quelle est l'augmentation de température dans le cours d'eau liée au ruissellement sur un bassin versant industriel?*

Dans le cas présent, de petites variations de températures liées aux eaux de ruissellement (de l'ordre de 1°C) sont constatées entre l'amont et l'aval du rejet. Les valeurs mesurées (températures en aval, écart de température) peuvent être reproduites par la démarche proposée, en tenant compte d'un facteur de refroidissement de l'ordre de 11%.

Remarques générales

La température est un paramètre très simple à mesurer, de nombreuses données sont disponibles pour la plupart des grands cours d'eau en Suisse, par le biais de stations fédérales de mesures (www.bwg.admin.ch) ou de stations cantonales. La mesure de la température est une mesure fiable, avec une précision de l'ordre de $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

Des températures moyennes journalières supérieures à 22°C sont rencontrées dans des rivières du Plateau, qui se refroidissent la nuit de quelques degrés seulement ($0,5\text{--}1,5^\circ\text{C}$). Ces cours d'eau n'appartiennent généralement pas aux cours d'eau piscicoles en Suisse, étant donné leur température trop élevée. Les mesures de températures dans de petits cours d'eau peuvent dépasser sporadiquement la valeur journalière moyenne de 22°C , essentiellement lorsque le niveau d'eau est faible. La température de ces cours d'eau peut ainsi augmenter de manière importante pendant la journée. Néanmoins, la température nocturne va également diminuer très rapidement (de l'ordre de $3\text{--}7^\circ\text{C}$) et permettre ainsi aux espèces piscicoles de récupérer.

L'utilisation d'un débit minimal Q_{\min} dans le calcul de la température en aval (équation 2) donne une certaine marge de sécurité, car même si les eaux de ruissellement des surfaces imperméables ont un temps de concentration beaucoup plus court que celui du bassin versant du milieu récepteur, il est plus approprié de calculer la température résultante à l'aide d'un débit moyen horaire pendant l'événement de pluie.

L'estimation d'un coefficient de refroidissement est plus délicat, mais à la vue des résultats présentés dans cet article, une valeur entre 10% et 20% semble indiquée. Pour des bassins versants de grande superficie, ce coefficient sera plus élevé étant donné la température des canalisations en sous-sol.

Un processus important non pris en compte dans notre démarche est l'aspect synergique des différents processus de temps de pluie: les effets d'une augmentation de température, même minime, associée à une charge organique importante

et de nombreux autres polluants peuvent se cumuler [10]. De plus, une succession de stress, inférieurs à un niveau d'effet fixé, peuvent être dommageables pour les organismes vivants s'ils surviennent à une fréquence inférieure au temps de récupération nécessaire pour ces organismes.

Une étude des températures des cours d'eau en Suisse entre 1978 et 2002 a été réalisée dans le cadre du projet FISCHNETZ [40]. Les résultats montrent une augmentation générale de la température de nos cours d'eau de l'ordre de $0,4$ à $1,6^\circ\text{C}$ pendant cette période [8]. Or l'imperméabilisation progressive de nos bassins versants pourrait également contribuer à cette augmentation des températures moyennes, en additionnant les effets dus au ruissellement urbain [35]. Mais il est impossible, à l'heure actuelle, de faire un lien entre l'imperméabilisation et l'augmentation de température générale des cours d'eau observée en Suisse.

L'ensemble des valeurs limites se base sur les poissons comme indicateurs d'effet. D'autres espèces, tels que les invertébrés, subissent également les variations de température. Or les poissons ont un réflexe de fuite face à un facteur de stress, tel que la température, ce qui dans une moindre mesure possible pour les invertébrés (drift). L'effet de la température sur les invertébrés a également fait l'objet d'une étude [41]. Une augmentation rapide de température (augmentation de 12°C , température initiale, à 20°C en $5\text{--}10$ minutes) a montré que les invertébrés n'ont pas de changement de comportement pendant les 10 premières minutes. Par la suite, après ces 10 minutes, leur comportement commence à changer et leur activité augmente, mais aucun effet visible n'est constaté après un retour aux conditions initiales. Ces variations de températures pourraient jouer un rôle important pour des espèces acclimatées à de basses températures, vivant notamment dans les cours d'eau alpins.

En général, une diminution des températures lors d'événements pluvieux ou neigeux est constatée pour les réseaux unitaires en période hivernale. Les rejets des déversoirs d'orage peuvent, dans des conditions particulières, générer une hausse des températures dans un cours d'eau en hiver. Une telle situation doit être examinée au cas par cas. En cas de doute, une mesure des températures en entrée de station d'épuration pour les réseaux unitaires permettra de clarifier la situation.

Considérant non seulement la température mais également le taux de contamination de la neige, le rejet de neige issue des agglomérations ou des voies de communications dans les cours d'eau n'est pas recommandé.

Dans un cas où la température serait problématique, différentes options s'offrent à l'ingénieur [35]. Pour le bassin versant, il y a la possibilité d'augmenter la part des surfaces ombragées sur les surfaces imperméables, par exemple en développant la végétation. Une autre possibilité est le choix de matériaux n'emmagasinant pas la chaleur (la température atteinte par une surface en béton est moins grande que celle atteinte par une surface en asphalte, pour les mêmes condi-

tions), ou la limitation du ruissellement par le biais de l'infiltration.

La question liée à une possible augmentation de température des nappes souterraines par le biais de l'infiltration d'eaux de ruissellement n'est pas abordée dans ce document.

Conclusions

La température est l'un des facteurs les plus importants pour nos cours d'eau. Le fait de garder des conditions de température aussi optimales que possible est essentiel pour assurer une diversité et une richesse faunistique.

L'imperméabilisation croissante des zones urbaines nous amène à considérer des problèmes qui jusqu'à présent n'ont pratiquement jamais été soulevés. Il en va ainsi de la température des eaux de ruissellement qui fait l'objet de cet article. Nous avons pu établir différentes exigences, en matière de températures dans les cours d'eau, spécifiques au temps de pluie. Une démarche, validée sur différents exemples en Suisse, permet de cerner ce problème. Cette démarche est très simple à mettre en œuvre et ne recourt pas à des calculs thermodynamiques complexes. Il semble, à la vue des résultats, qu'une augmentation ou une diminution de température en début d'événement de pluie suite au rejet par les canalisations ne soit pas préjudiciable pour la faune. Nos résultats indiquent que la température journalière moyenne de 22 °C ne sera pratiquement jamais atteinte pour les eaux sous nos latitudes. Le critère T1 de température maximale (25 °C), de même que le critère T2 (augmentation de température moyenne horaire de 7 °C) ne pourraient que très rarement être dépassés. Une brusque augmentation de température, de l'ordre de 5–7 °C pourrait cependant poser un problème dans des cas particuliers, notamment pour des cours d'eau relativement froids par exemple alimentés par des sources. En cas de doute, une analyse plus poussée est possible. La problématique liée à une augmentation de température dans un cours d'eau par temps de pluie, présentée dans cet article du projet «STORM», peut être contrôlée à l'aide de la procédure présentée.

Littérature

- [1] Cairns J., Buikema Jr. A.L., Heath A.G., Parker B.C. (1978): Effects of temperature on aquatic organism sensitivity to selected chemicals. Va. Water Resour. Res. Ctr. Bull. 106: 9–70.
- [2] Green D.W.J., Williams K.A., Hughes D.R.L., Shaik G.A.R., Pascoe D. (1988): Toxicity of phenol to *Asellus aquaticus* (L.): effects of temperature and episodic exposure. Water Res., 22: 225–231.
- [3] Garnacho E., Peck L.S., and Tyler P.A. (2000): Variations between winter and summer in the toxicity of copper to a population of the Mysid *Praunus flexuosus*. Mar. Biol. (Ger.), 137, 631.
- [4] Leung K.M.Y., Taylor A.C., Furness R.W. (2000): Temperature-dependent physiological responses of the Dogwhelk *Nucella lapillus* to cadmium exposure. J. Mar. Biol. Ass. (U.K.), 80, 647.
- [5] Magaud H., Migeon B., Morfin P., Garric J., Vindimian E. (1997): Modelling fish mortality due to urban storm run-off: interacting effects of hypoxia and un-ionized ammonia. Wat. Res. Vol.31, N° 2, 211–218.
- [6] Whitelaw K. and Solbé J.F. (1989): River catchment management: an approach to the derivation of quality standards for farm pollution and storm sewage discharges. Wat. Sci. and Techn. 21: 1065–1076.
- [7] Krejci V., Kreikenbaum S., Fankhauser R. (2004): Akute Ammoniak- und hydraulische Beeinträchtigungen. GWA n° 9, 671–679. Traduction française «Impacts aigus liés à l'ammoniac et au stress hydraulique» disponible sur le site: <http://library.eawag.ch/ris/risweb.isa>.
- [8] Hari R., Güttinger H. (2004): Temperaturverlauf in Schweizer Flüssen 1978–2002. Auswertungen und grafische Abbildungen fisch-relevanter Parameter. Fischnetz-publikation. Projekt «Netzwerk Fischrückgang Schweiz», Teilprojekt-Nr 01/08, EAWAG, Switzerland, 96 pp.
- [9] Karr J.R., Schlosser I.J. (1977): Impact of nearstream vegetation and stream morphology on water quality and stream biota. U.S. Environmental Protection Agency, EPA 600/3–77/097.
- [10] Elliott J.M. (2000): Pools as refugia for Brown Trout during two summer droughts: trout responses to thermal and oxygen stress. Journal of fish biology, 56, 938–948.
- [11] Burton G.A. and Pitt R.E. (2002): Stormwater effects Handbook. A toolbox for Watershed Managers, Scientists, and Engineers, Lewis Publishers.
- [12] Diaz F., Bückle L.F. (1999): Effect of the critical thermal maximum on the preferred temperatures of *Ictalurus punctatus* exposed to constant and fluctuating temperatures Journal of Thermal Biology, 24: 155–160.
- [13] Beitinger T.L., Wayne A.B., McCauley R.W. (2000): Temperature tolerances of North American freshwater fishes exposed to dynamic changes in temperature. Environmental Biology of Fishes (58): 237–275.
- [14] Küttel S., Peter A., Wüest A. (2002): Temperaturpräferenzen und -limiten von Fischarten schweizerischer Fließgewässer. Rhone-Revitalisierungs-Projekt, Publikation Nummer 1, www.rhone-thur.eawag.ch.
- [15] Oliver G.G., Fidler L.E. (2001): Towards a water quality guideline for temperature in the province of British Columbia. Ministry of Environment, Lands and Parks. British Columbia, Canada.
- [16] Elliott J. M. (1981): Some aspects of thermal stress on freshwater teleosts. In Stress and Fish (A. D.Pickering, ed), pp. 209–245. London: Academic Press.
- [17] Rossi L., Krejci V., Kreikenbaum S. (2004): Anforderungen an die Abwassereinleitungen. GWA n° 6, 431–438. Titre français: «Exigences légales en matière d'assainissement par temps de pluie», disponible sur le site <http://library.eawag.ch/ris/risweb.isa>.
- [18] Brungs W.S. and Jones B.R. (1977): Temperature criteria for freshwater fish: protocols and procedure. US-EPA, Environ. Research lab, Ecological Resources Service, Office of Research and Development. Duluth, MN.
- [19] Armour C.L. (1991): Guidance for evaluating and recommending temperature regimes to protect fish. Washington DC, US department of the Interior. Fish and Wildlife Service: 13.
- [20] US-EPA (1972): Water criteria 1972. A report of the Committee on Water Quality Criteria. National Academy of Sciences. Washington D.C.
- [21] Nolan D.T., Hadderingh R.H., Spanings F.A.T., Jenner H.A., Wendelaar Bonga S.E.. (2000): Acute temperature elevation in tap and Rhine Water affects skin and gill epithelia, hydromineral balance, and Na⁺/K⁺-ATPase activity in Brown Trout (*Salmo trutta*) smolts. Can. J. Aquat. Sci. 57: 708–718.
- [22] Burkhardt-Holm P, Schmidt H., Meier W. (1997): Heat shock protein (hsp70) in brown trout epidermis after sudden temperature rise. Comparative Biochemistry and Physiology Part A 120: 35–41.
- [23] Schmidt H., Posthaus H., Busato A., Wahli T., Meier W., Burkhardt-Holm P. (1998): Transient increase in chloride cell number and heat shock protein expression (hsp70) in Brown Trout (*Salmo trutta fario*) exposed to a sudden temperature elevation. Biol. Chem. 379: 1227–1233.
- [24] Iwama G.K., Thomas P.T., Forsyth R.B., Vijayan M.M. (1998): Heat shock protein expression in fish. Reviews in Fish Biology and Fisheries (8): 35–56.
- [25] Massa F. (2000): Sédiments, physico-chimie du compartiment interstitiel et développement embryo-larvaire de la truite commune

- (*Salmo trutta*): Étude en milieu naturel anthropisé et en conditions contrôlées. Institut National Agronomique, Sciences de l'environnement. Paris, Paris Grignon, 179 pp.
- [26] Jungwirth M., Winkler H. (1984): The temperature dependence of embryonic-development of Grayling (*Thymallus thymallus*), Danube Salmon (*Hucho hucho*), Arctic Char (*Salvelinus alpinus*) and Brown Trout (*Salmo trutta fario*). *Aquaculture* 38: 315–327.
- [27] Humpesch U.H. (1985): Inter-specific and intra-specific variation in hatching success and embryonic-development of 5 species of salmonids and *Thymallus-thymallus*. *Archiv für Hydrobiologie* 104: 129–144.
- [28] McCullough D.A. (1999): A review and synthesis of effects of alterations to the water temperature regime on freshwater life stages of salmonids, with special reference to Chinook Salmon. US Environmental Protection Agency (EPA 910-R-99-010), Seattle Washington.
- [29] Weatherbe D.G. (1994): A simplified stream temperature model for evaluating urban drainage inputs. *Stormwater and Water Quality Management Modelling Conference*, 259–274, Reference n° S2516.
- [30] Vespagen B. (1995): Experimental investigation of thermal enrichment of storm water runoff from two paving surfaces. M.Sc. Thesis Univ. Guelph:163.
- [31] James W., Vespagen B. (1997): Thermal enrichment of stormwater by urban pavement. *Advances in Modeling the management of Stormwater impacts*, vol 5, Chapter 8, 155–177.
- [32] Van Buren M.A. (1999): Thermal enhancement of urban receiving waters. Department of Civil Engineering. Kingston, Ontario, Canada, Queen's University: 199.
- [33] Haq ul R., James W. (2002): Thermal enrichment of stream temperature by urban storm water. *Conference Proceedings, 9th ICUD*, Portland, OR.
- [34] Arrington K.E. (2003): Tools to support the protection of cold water streams from the thermal impact of development in Dane County, Wisconsin. M.S. Thesis, University of Wisconsin-Madison: 279.
- [35] LeBlanc R.T., Brown R.D., FitzGibbon J.E. (1997): Modelling the effects of land use change on the water temperature in unregulated urban streams. *Journal of Environment Management* 49: 445–469.
- [36] Bodmer K. (2000): Thermische Auswirkungen von Dachwasser-einleitungen in kleine Oberflächengewässer. Versuch am Erzbach in Erlinsbach. Aarau, Kanton Aargau, Abteilung Wald und Abteilung für Umwelt: 5 + Anhang.
- [37] Bodmer K. (2001): Thermische Auswirkungen von Dachwasser-einleitungen in kleine Oberflächengewässer. Versuch am Erzbach in Erlinsbach. Versuchswiederholung 2000. Aarau, Kanton Aargau, Abteilung Wald und Abteilung für Umwelt: 5 + Anhang.
- [38] Boller M., Kaufmann P., Ochsenbeim U., Langbein S., Steiner M. (2004): Schadstoffe im Strassenabwasser einer stark befahrenen Strasse und deren Retention mit neuartigen Filterpaketen aus Geotextil und Adsorbermaterial. Versickerung von Strassenabwasser über das Bankett. 1. Zwischenbericht der Forschungsprojekte, EAWAG, Dübendorf: 32.
- [39] Davoli F., Pasteris G., Schweizer J., Cordonnier A., (2003): Impact pollitif global des eaux de ruissellement de certaines zones industrielles de Genève sur leur milieu récepteur et conséquences sur les modes de dépollution. Lausanne, École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL): 133 + annexes.
- [40] Fischnetz (2004): Rapport final du projet «Réseau suisse poissons en diminution»: Sur la trace du déclin piscicole. 198 pp + CD, EAWAG Dübendorf, www.fischnetz.ch.
- [41] Gammeter S. (1996): Einflüsse der Siedlungsentwässerung auf die Invertebraten-Zönose kleiner Fliessgewässer. *Naturwissenschaften*. Zürich, ETH Zürich: 157.

Impressum

Cette étude a été initiée par l'office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP) et par l'Institut fédéral pour l'aménagement, l'épuration et la protection des eaux (EAWAG). Elle est présentée sous la forme du projet «STORM: Assainissement par temps de pluie».

© EAWAG, BUWAL (2004)

Responsable de projet:

Vladimir Krejci, Dr. sc. tech.

Collaborateurs

Rolf Fankhauser, Dr. phil.
 Andreas Frutiger, Dr. sc. nat.
 Simon Kreikenbaum, Dipl. Ing. ETH
 Luca Rossi, Dr. sc. tech.

Le projet STORM a été suivi par un groupe d'experts:

Erwin Bieri, OFEFP
 Prof. Dr. Markus Boller, EAWAG
 Patrick Fischer, OFEFP
 Prof. Dr. Willi Gujer, ETHZ et EAWAG
 Rolf Lüdi, OFEFP
 Prof. Dr. Wolfgang Rauch, Universität Innsbruck
 Kurt Suter, VSA und Baudepartement des Kantons Aargau

Traduction

Daniel Eschmann, Luca Rossi

Layout

Peter Nadler, Küssnacht

Graphisme

Lydia Zweifel

Commande

EAWAG, Überlandstrasse 133, 8600 Dübendorf
http://www.eawag.ch/publications/d_index.html
