

# MICROCENTRALES DANS LES RÉSEAUX URBAINS

## PRODUCTION D'HYDROÉLECTRICITÉ DANS LES RÉSEAUX D'APPROVISIONNEMENT EN EAU POTABLE

La micro-hydroélectricité offre l'opportunité d'utiliser l'énergie excédentaire dans des systèmes hydrauliques existants pour générer de l'électricité. Un schéma de microcentrale basé sur une nouvelle micro-turbine a été conçu pour des applications en milieu urbain. Son placement à l'intérieur des réseaux de distribution est optimisé en utilisant un algorithme qui maximise la valeur économique de l'installation après 20 années d'exploitation. Le concept est testé en ville de Fribourg.

*Irene Samora, EPFL et Instituto Superior Técnico-Univ. de Lisboa*

*Pedro Manso\*; Mário J. Franca; Anton J. Schleiss, Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH), EPFL*

*Helena Ramos, Instituto Superior Técnico-Univ. de Lisboa*

### ZUSAMMENFASSUNG

#### KLEINWASSERKRAFTWERKE IN STÄDTISCHEN WASSERVERSORGUNGSNETZEN: FALLSTUDIE STADT FREIBURG

Mithilfe von Kleinwasserkraftwerken kann überschüssige Energie an bestimmten Punkten in bestehenden Hydrauliksystemen zur Stromerzeugung genutzt werden. In Wasserversorgungssystemen kann dies mit der Druckregelung, die für das einwandfreie Funktionieren eines Netzes erforderlich ist, verbunden werden. Die täglichen Schwankungen der hydraulischen Bedingungen sowie die Komplexität städtischer Netze werfen jedoch mehrere Fragen auf, was die Auswahl von vorteilhafteren Standorten und die Auswirkungen eines lokalen Druckverlustes angeht. Für Anwendungen in städtischen Gebieten wurde ein Modell eines Kleinwasserkraftwerks auf der Grundlage einer neuartigen Kleinturbine mit einem Fünfblatt-Rotor erarbeitet. Um bestehende Leitungen herum werden Kammern gebaut oder erweitert, in denen eine bis vier Turbinen installiert werden können. Um die Ermittlung passender Kammer-Standorte innerhalb von Wasserverteilnetzen zu optimieren, wird ein Algorithmus verwendet, durch den der wirtschaftliche Wert der Installation nach 20 Betriebsjahren maximiert wird. Das Konzept wurde am Beispiel der Stadt Freiburg getestet und berücksichtigt die Preise für den Bau und die Ausrüstung in der Schweiz sowie verschiedene Stromvergütungsszenarien. Das komplette Netz der Stadt wurde simuliert. Die Er-

### INTRODUCTION

Les préoccupations actuelles sur l'environnement et l'efficacité énergétique accroissent l'intérêt de la petite hydroélectricité. Cette source d'énergie renouvelable peut être produite de façon décentralisée pour satisfaire des demandes locales d'électricité. La micro-hydroélectricité, qui correspond à moins de 100 kW de puissance installée, peut être produite dans des sites de basses chutes, des sites de petits débits, des systèmes d'approvisionnement d'eau [1], des systèmes d'irrigation [2], de traitement des eaux usées [3] ou des systèmes de drainage pluvial [4]. Par rapport à de nouveaux aménagements, l'utilisation des systèmes déjà existants dans l'environnement construit présente de nombreux avantages: des impacts négligeables et des faibles incréments de coût d'exploitation en s'appuyant sur l'infrastructure, le personnel et la trésorerie de systèmes qui fonctionnent. Parmi ces derniers, les systèmes d'approvisionnement ont la particularité d'être des systèmes en charge où le contrôle de pression est envisagé.

Bien que l'utilisation de turbines dans les systèmes d'approvisionnement puisse sembler illogique, compte tenu de l'utilisation de pompage, le contrôle de pression est souvent impératif pour minimiser les fuites et assurer une pression adéquate pour

\* Contact: [pedro.manso@epfl.ch](mailto:pedro.manso@epfl.ch)

le consommateur. Des vannes de contrôle de pression sont normalement utilisées à cet effet en dissipant de l'énergie, mais une turbine permettrait d'en récupérer une partie [5]. Alors les deux activités, soit le pompage de l'eau pour alimenter les réservoirs intermédiaires et le turbinage dans le réseau pour récupérer l'énergie excédentaire, peuvent coexister dans le même système mais à différents endroits. Le potentiel pour la micro-hydroélectricité peut exister même dans les réseaux où des vannes de dissipation n'existent pas. Il existe des régions, où la pression est plus élevée que nécessaire, même sans être excessive, à cause des connexions avec des régions topographiquement plus en altitude.

Dans cet article, une nouvelle micro-turbine est présentée pour être appliquée dans des réseaux d'eau potable. En plus, une méthode est présentée pour optimiser d'un point de vue économique l'emplacement des turbines dans ces réseaux. Finalement, les deux concepts sont testés dans le cas d'étude de la ville de Fribourg.

## LA TURBINE 5BTP

Malgré le potentiel existant pour la micro-hydroélectricité, des solutions pour son implantation dans les systèmes d'approvisionnement manquent surtout pour les réseaux urbains. Cela est dû à l'absence de technologies performantes et de schémas d'installation spécifiques pour les réseaux de distribution, puisque ceux-ci sont des systèmes complexes où la pression et le débit varient constamment. Un schéma d'installation de micro turbines a été conçu spécifiquement pour ce type d'application en utilisant la turbine en hélice à cinq pales, 5BTP (en anglais, *five blade tubular propeller*). Le développement de cette turbine a été initié à l'Instituto Superior Técnico à Lisbonne (IST) dans le cadre d'un projet européen. La turbine est conçue pour être installée directement dans la conduite, dans l'axe de l'écoulement. Immédiatement en aval de la turbine, une courbe à 45° permet la sortie de l'arbre de rotation de la conduite, pour accouplement à un générateur [6]. Un nouveau modèle de 85 mm (fig. 1) a été l'objet d'une campagne expérimentale dans le stand d'essais de la HES-SO Valais [7], avec le soutien financier de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN).

Pour chaque vitesse de rotation imposée entre 50 et 2750 tours par minute

(tr/min), ce qui simule le fonctionnement d'un générateur, le débit d'alimentation a été varié progressivement. La performance de la machine a été évaluée avec une grande plage de débits, de 5 à 50 m<sup>3</sup>/h, et des mesures de couple mécanique, (fig. 2). La température de l'eau a été maintenue entre 15 et 25 °C.

Le point de meilleur rendement de 64% a été identifié à une vitesse de rotation de 750 tr/min, pour un débit de 16 m<sup>3</sup>/h et 0,34 m de chute. D'autre part, la puissance maximale obtenue a été de 330 W, pour un débit de 48 m<sup>3</sup>/h, une chute de 4,8 m et une vitesse de rotation de 1500 tr/min.

Dans le cas d'une installation réelle, la vitesse de rotation devra être réglée par rapport au débit, afin de trouver la puissance maximale à chaque instant d'opération de la turbine. Basée sur ces prémisses, une courbe caractéristique

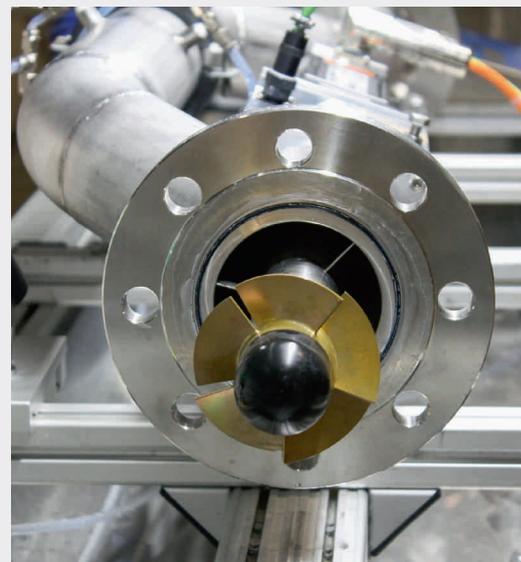


Fig. 1 Modèle de la turbine 5BTP au laboratoire de la HES-SO Valais

Modell der Turbine 5BTP im Labor der HES-SO Wallis

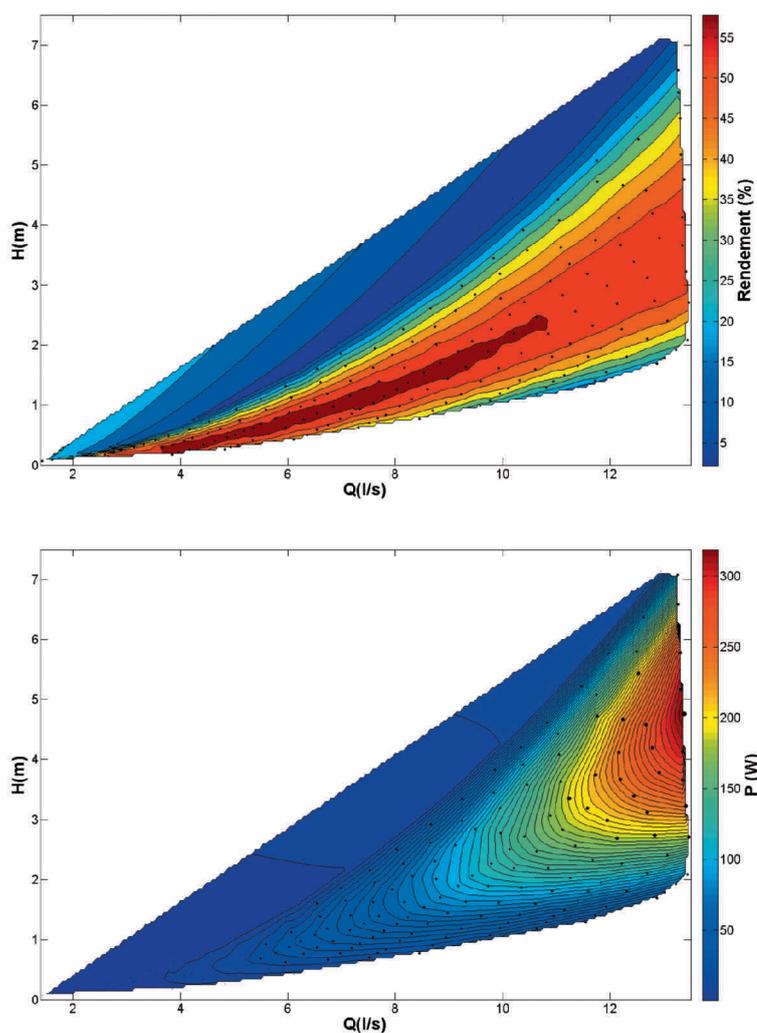


Fig. 2 Diagrammes en colline de la 5BTP avec 85 mm, en laboratoire

Leistungsdiagramme der Turbine des Typs 5BTP mit 85 mm, im Laboratorium

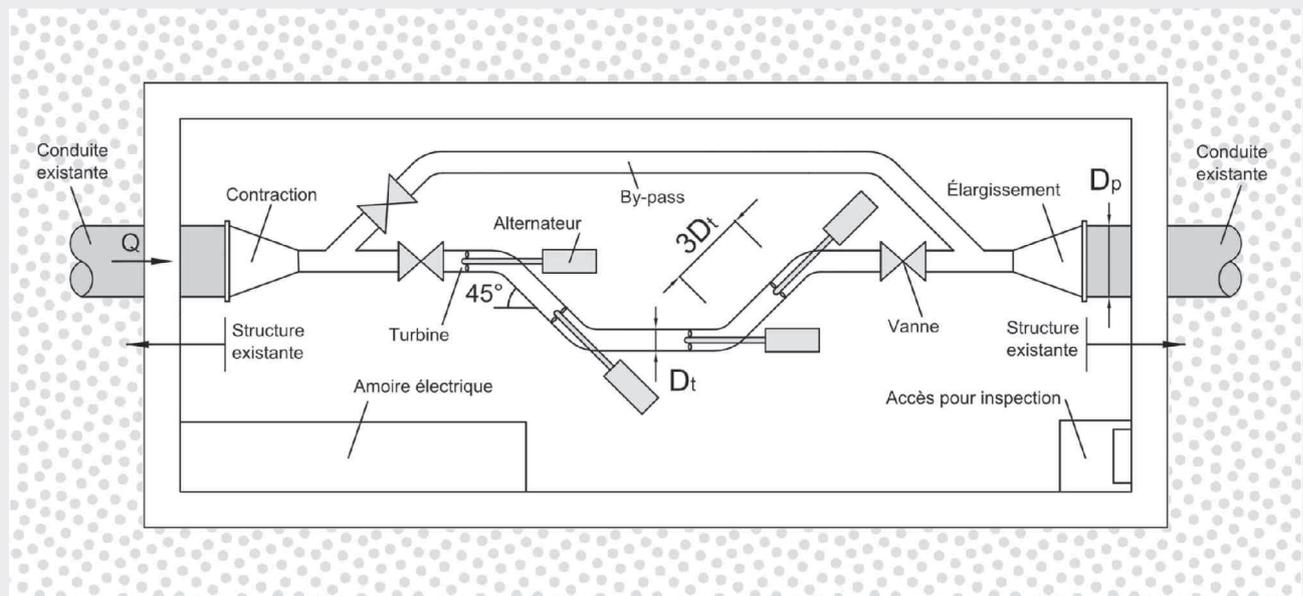


Fig. 3 Chambre pour l'installation de quatre turbines / Kammer für die Installation von vier Turbinen

unique d'une machine à vitesse variable a été établie, laquelle peut être considérée et extrapolée pour d'autres diamètres. Les résultats de la campagne expérimentale sont satisfaisants, compte tenu des rendements d'environ 60% jugés bons pour des petites machines. La turbine a une conception simple et peut être exploitée à vitesse variable.

Finalement, le schéma d'installation de la 5BTP permet d'installer une à quatre turbines dans une chambre créée autour d'une conduite existante (fig. 3). Typiquement, le diamètre de la turbine est plus petit que celui de la conduite et une réduction et un élargissement sont nécessaires respectivement en amont et à l'aval de la turbine.

### OPTIMISATION DE L'EMPLACEMENT

Les réseaux d'eau potable en zone urbaine sont des systèmes complexes. Ce sont des mailles, où un changement dans une conduite peu affecter l'équilibre hydraulique de tout le réseau et où les débits varient en fonction de la consommation. De plus, des limites minimales de pression doivent être assurées pour les utilisateurs. L'emplacement des microcentrales est de ce fait un problème qui implique la simulation du système avec de petits pas de calcul. Les emplacements appropriés des turbines dans les réseaux sont identifiées en utilisant un algorithme d'optimisation du type «simulated annealing» [8] qui tient compte non seulement de la production d'énergie mais aussi des quantités des principaux équipements et des travaux de génie civil [9, 10]. L'axe est la maximisation de la valeur économique, représentée par la valeur actuelle nette après 20 années d'exploitation. Comme contraintes à la validité des solutions, la pression dans tous les nœuds consommateurs du réseau doit être au moins 30 mètres de colonne d'eau (mCE) et la vitesse d'écoulement inférieure à 2 m/s.

La simulation de l'énergie moyenne produite sur un an est réalisée sur EPANET<sup>1</sup>, compte tenu des changements horaires de

débit et de leur impact dans le rendement de la turbine. À chaque pas de calcul, l'équilibre hydraulique du réseau est obtenu par rapport à la consommation et à la hauteur de chute, simulée par un coefficient de perte de charge local.

Pour estimer les coûts totaux, seuls les coûts d'investissement et d'opération sont considérés. En fait, il a été admis que les coûts de maintenance de la chambre seront dilués dans les coûts de maintenance existants du réseau qui comporte déjà plusieurs chambres à buts multiples. Les coûts d'investissement sont obtenus en considérant l'équipement (turbine et générateur, vannerie, débitmètre), la construction civile (béton, acier, excavation, remblai), l'ingénierie et des coûts divers [10].

Un facteur important à prendre en compte est la possibilité d'isoler les chambres pour la maintenance. Avant de décider de la construction d'un by-pass, la redondance dans le réseau doit être vérifiée. S'il s'avère possible d'approvisionner tous les points du réseau avec une pression minimale tant que le tronçon de la chambre est hors-service, le by-pass devient facultatif. En plus, dans les cas où il existe des chambres de vannes, il est important de vérifier si les ouvrages en place peuvent être réutilisés et/ou adaptés.

### APPLICATION AU CAS D'ÉTUDE DE FRIBOURG

La technique d'optimisation présentée ci-dessus a été appliquée au cas de la ville de Fribourg (fig. 4) pour estimer la production avec des turbines de 5BTP [11]. Six des réservoirs existants sont considérés comme sources à niveau constant. Un autre réservoir, situé en ville, a été considéré comme faisant un cycle journalier de remplissage et de vidange totale, revenant au niveau initial après 24 h. Une consommation moyenne dans la journée de 0,1081/s a été associée à chaque nœud consommateur, et une variation horaire typique sur 24 h a été considérée. Le réseau possède aussi des pompes et des vannes.

Plusieurs scénarios de rémunération de l'énergie produite ont été considérés: soit un tarif RPC (rétribution à prix coûtant) de 0.33 CHF/kWh; soit des tarifs correspondant à un «bonus de remplacement» de 0.10 ou 0.20 CHF/kWh, définis comme la différence moyenne entre le prix d'achat d'électricité par la Ville

<sup>1</sup> EPANET est un logiciel pour modéliser l'hydraulique et le comportement de la qualité d'eau dans les réseaux de distribution d'eau potable: <https://www.epa.gov/water-research/epanet>

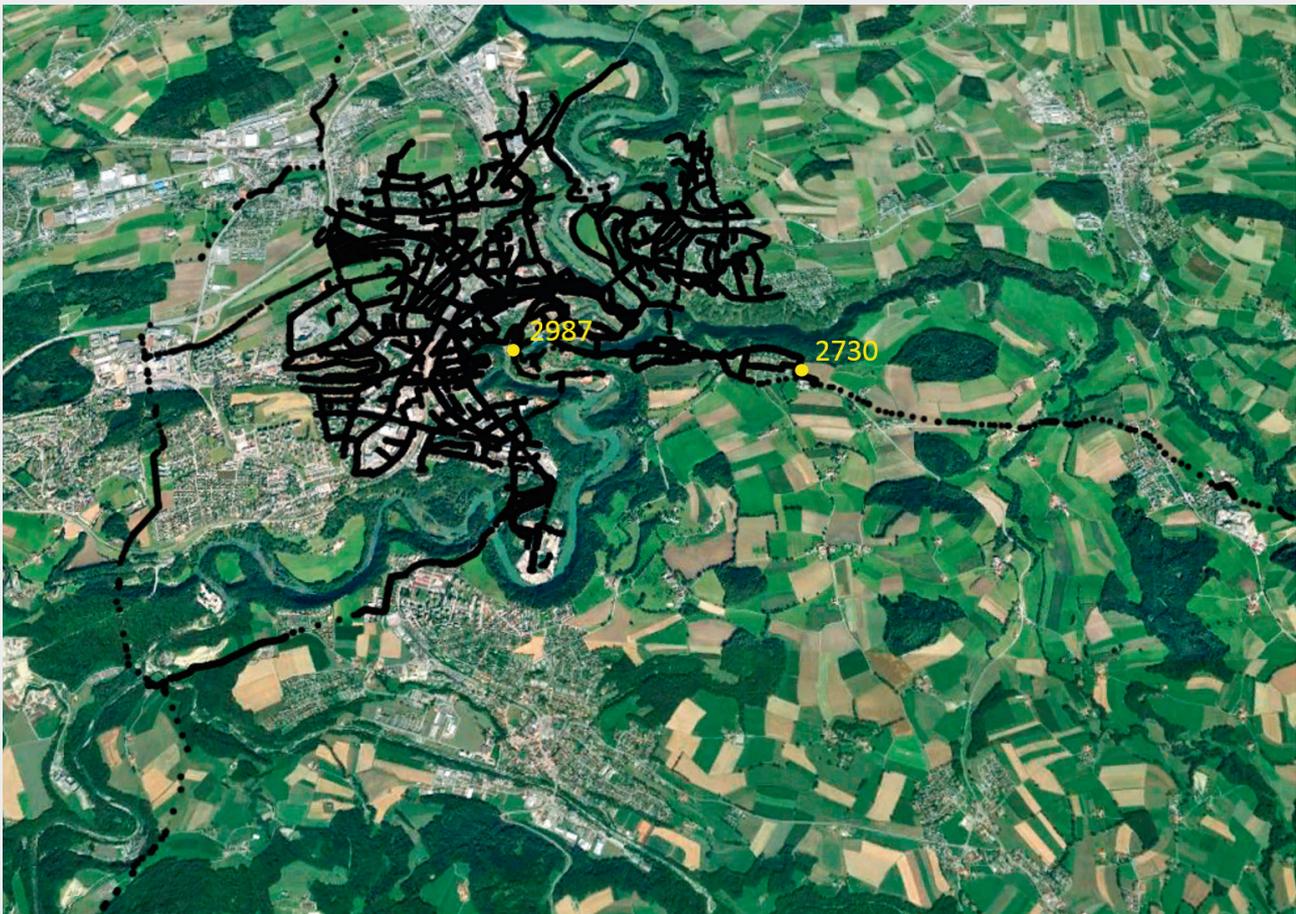


Fig. 4 Ville de Fribourg et son réseau (image en plan arrière Google Earth)

Die Stadt Freiburg und ihr Netz (Bild im Hintergrund Google Earth)

| N. de turbines | Position                 | Energie (MWh/année) | Puissance maximale (kW) | Diamètre de la turbine (mm) | Chute moyenne (m) | Débit moyen (U/s) | VAN <sub>20</sub> (kCHF), R1 | VAN <sub>20</sub> (kCHF), R2 | VAN <sub>20</sub> (kCHF), R3 |
|----------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1              | 2730                     | 60,5                | 8,1                     | 165                         | 17,6              | 95,7              | 61                           | 143                          | 250                          |
| 2              | (2730; 2730)             | 120,9               | 16,2                    | 165                         | 35,2              | 191,3             | 135                          | 299                          | 513                          |
| 3              | (2730; 2730; 2730)       | 131,8               | 17,8                    | 155                         | 44,4              | 240,0             | 149                          | 328                          | 561                          |
| 4              | (2730; 2730; 2730; 2987) | 136,2               | 18,5                    | 165; 135                    | 43,4              | 275,4             | 161                          | 335                          | 575                          |

Tab. 1 Résultats de l'optimisation pour la ville de Fribourg, sur une période de 20 ans, avec un taux d'actualisation de 4% et pour trois scénarios de rémunération à tarif fixe (R1 = 0.10 CHF/kWh; R2 = 0.20 CHF/kWh; R3 = 0.33 CHF/kWh; VAN<sub>20</sub>: Valeur actuelle nette après 20 années d'exploitation)

Ergebnisse der Optimierung für die Stadt Freiburg über einen Zeitraum von 20 Jahren mit einem Abzinsungssatz von 4% und für drei Vergütungsszenarien mit Fixtarifen (R1 = 0.10 CHF/kWh; R2 = 0.20 CHF/kWh; R3 = 0.33 CHF/kWh; VAN20: Valeur actuelle nette (deutsch: Kapitalwert) nach 20 Betriebsjahren)

de Fribourg au distributeur régional et le prix de revient du kWh produit dans la microcentrale. Un taux d'actualisation de 4% a été considéré. Pour estimer les coûts d'investissement, les principales quantités ont été estimées et des prix unitaires typiques en Suisse ont été considérés. L'optimisation de l'installation d'une à quatre turbines a été réalisée et les résultats obtenus sont présentés dans le *tableau 1*. Les emplacements identifiés (*fig. 4*) sont proches de vannes de

dissipation de pression. Ce n'est pas une surprise, compte tenu que si les vannes existent, il y a un excès de pression. L'installation de trois turbines représente une augmentation d'énergie plus petite par rapport à celle produite avec deux turbines, que celle de deux turbines par rapport à la production avec une. Ce fait est expliqué par l'obstruction au débit que les turbines représentent. Dans un réseau maillé ou/et avec plusieurs sources, l'implémentation de pertes de charges locales

a un impact important dans la distribution des débits.

La solution avec quatre turbines implique deux emplacements différents. L'installation de quatre turbines dans la même chambre représenterait une infraction de la pression minimale dans le réseau. Ainsi, construire deux chambres serait la solution la plus rentable.

Une fois les emplacements optimaux trouvés, il est important de faire une analyse de sensibilité à la demande. Dans le cas

| N. de turbines | Position                 | Energie (MWh/année) | VAN (kCHF)<br>R3 |
|----------------|--------------------------|---------------------|------------------|
| 1              | 2730                     | 60,5                | 250              |
| 2              | [2730; 2730]             | 120,9               | 513              |
| 3              | [2730; 2730; 2730]       | 130,4               | 555              |
| 4              | [2730; 2730; 2730; 2987] | 124,9               | 527              |

Tab. 2 Effet d'une réduction de 20% dans la consommation (VAN: Valeur actuelle nette)  
Effekt eines Verbrauchsrückgangs um 20% (VAN: Kapitalwert)

où de longues séries de mesures existent, la simulation d'une longue période peut être faite. Si les données manquent, des scénarios peuvent être considérés. Dans le cas de Fribourg, une diminution de 20% de la consommation aurait peu d'impact, voir *tableau 2*. Le fait que la conduite choisie (la 2730) soit en amont d'un réservoir urbain se traduit par un contrôle assuré par le niveau dans le réservoir. Ainsi, le changement de consommation a un impact minimal. De plus, cette conduite se trouve dans un des plus importants axes d'entrée de la ville, ayant des débits particulièrement élevés.

gie d'optimisation présentée peut aussi être utilisée avec d'autres convertisseurs d'énergie.

Les emplacements optimaux se trouvent typiquement dans les tronçons à grands débits. Il est vrai que l'existence de vannes de dissipation indique qu'il y a un excès d'énergie, mais l'emplacement optimal des turbines peut être différent. Des simulations sont nécessaires pour optimiser leurs emplacements. De plus, une analyse de sensibilité à la consommation est souhaitable pour renforcer la confiance dans la rentabilité de la solution.

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] Gallagher, J.; Harris, I.M.; Packwood, A.J.; McNabola, A.; Williams, A.P. (2015): Strategic assessment of energy recovery sites in the water industry for UK and Ireland: Setting technical and economic constraints through spatial mapping. *Renewable Energy*, 81: 808–815. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.078>
- [2] Pérez-Sánchez, M.; Sánchez-Romero, J.F.; Ramos, H.M.; López-Jiménez, A.P. (2016): Modeling Irrigation Networks for the Quantification of Potential Energy Recovering: A Case Study. *Water* 8(6): p. 234. [doi:10.3390/w8060234](http://dx.doi.org/10.3390/w8060234)
- [3] Bousquet, C.; Samora, I.; Manso, P.; Schleiss, A.; Rossi, L.; Heller, P. (2015): Turbinage des Eaux Usées: Quel potentiel pour la Suisse? *Aqua & Gas*, 10/2016: 54–61
- [4] Ramos, H.M.; Theyssier, C.; Samora, I.; Schleiss, A.J. (2013): Energy recovery in SUDS towards smart water grids: a case study. *Energy Policy* 62: 463–472. [doi:10.1016/j.enpol.2013.08.014](http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.08.014)
- [5] Vicente, D.J.; Garrote, L.; Sánchez, R.; Santillán, D. (2016): Pressure management in water distribution systems: Current status, proposals, and future trends. *Journal of Water Resources Planning and Management*. [10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000589](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000589), 04015061

- [6] Samora, I.; Hasmatuchi, V.; Münch-Alligné, C.; Franca, M.J.; Schleiss, A.J.; Ramos H.M. (2016): Experimental characterization of a five blade tubular propeller turbine for pipe inline installation. *Renewable Energy* 95: 356–366. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.023>
- [7] Hasmatuchi, V.; Botero, F.; Gabathuler, S.; Munch, C. (2015): Design and control of a new hydraulic test rig for small hydro turbines. *The International Journal on Hydropower & Dams*, 22(4): 51–60. [http://www.hydropower-dams.com/article\\_detail.php?c\\_id=208&aid=3332](http://www.hydropower-dams.com/article_detail.php?c_id=208&aid=3332)
- [8] Rutenbar, R.A. (1989): Simulated annealing algorithms: an overview. *Circuits and Devices Magazine* 5(1): 19–26. [doi:10.1109/101.17235](http://dx.doi.org/10.1109/101.17235)
- [9] Samora, I.; Franca, M.J.; Schleiss, A.J.; Ramos, H.M. (2016): Simulated annealing in optimization of energy production in a water supply network. *Water Resources Management* 30(4): 1533–1547. [doi:10.1007/s11269-016-1238-5](http://dx.doi.org/10.1007/s11269-016-1238-5)
- [10] Samora, I.; Manso, P.; Franca, M.J.; Schleiss, A.J.; Ramos, H.M. (2016): Opportunity and economic feasibility of inline micro-hydropower units in water supply networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000700](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000700)
- [11] Samora, I.; Manso, P.; Franca, M.J.; Schleiss, A.J.; Ramos, H.M. (2016): Energy Recovery Using Micro-Hydropower Technology in Water Supply Systems: The Case Study of the City of Fribourg, *Water*, 8(8): 344. [doi:10.3390/w8080344](http://dx.doi.org/10.3390/w8080344)
- [12] Samora, I. (2016). Optimization of low-head hydropower recovery in water supply networks. EPFL-IST PhD Thèse 7126 et LCH Communication N° 65 du Laboratoire de constructions hydrauliques, A. Schleiss (ed.), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland, [doi:10.5075/epfl-ichcomm-65](http://dx.doi.org/10.5075/epfl-ichcomm-65)

#### REMERCIEMENTS

Cette recherche a été réalisée dans le cadre de la thèse de doctorat [12] de Irene Samora suivie par le Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH) et l'Institut Superior Técnico (IST). La Fondation pour la Recherche et Technologie portugaise (FCT) et le LCH ont financé l'étude. Les auteurs remercient l'OFEN pour le financement des tests en laboratoire de la turbine 5BTP et la HES-SO Valais. Les auteurs remercient aussi les Services Industriels de Fribourg et Ribi SA pour la mise à disposition des données de la ville de Fribourg.

#### CONCLUSIONS

Dans la ville de Fribourg, il est possible d'extraire avec le schéma proposé une quantité d'énergie qui rend le système rentable. La turbine 5BTP est un concept prometteur, avec des rendements satisfaisants, surtout si sa production se fait sans coûts élevés. Cependant, la straté-

#### > FORTSETZUNG DER ZUSAMMENFASSUNG

gebnisse sind positiv: Das Modell ist anwendbar. Im Freiburger Wassernetz könnten mit zwei Kleinturbinen rund 121 MWh/Jahr produziert werden.