

SIMK® - Calibration des stations de mesure sur rivières et canaux (1)

Auteur : Dr-Ing C. Kölling, ISAR CONSULT GmbH – ©2009 Traduction C. Haritchabalet - AnHydre SARL

Cinquième conférence internationale IGHEM 2004
« Innovation en mesure d'efficacité hydraulique »
Université des Sciences Appliquées, Lucerne, juillet 2004

1 - Application pratique de la méthode de calibration SIMK®

SIMK® est une méthode universelle qui permet des calibrations précises dépendantes du niveau et du profil sur les stations de mesure de débit au fil de l'eau. **SIMK®** s'est montrée efficace au fil de nombreuses années au travers de nombreuses applications pratiques à l'international. **SIMK®** est basée sur la simulation numérique des rapports $k = V_m / V_l$, exprimés sans unité, pour la vitesse d'écoulement fortement dépendante du niveau et du profil. La simulation numérique est pratiquée en appliquant un modèle haute résolution des dynamiques d'élément fluide fini.

SIMK® -> Simulation de $k = V_m / V_l$

V_m = vitesse moyennée $V_m = Q / A$ dans l'aire de la section mouillée
 V_l = vitesse locale mesurée moyennée – ponctuelle ou en ligne



Figure 1 : **SIMK®** - Station de mesure au fil de l'eau par radar – **SIMK®** de Schrottenbaumühle / Ilz (WWA Passau / Allemagne)

1 – une version pdf du document original peut être obtenue sur demande (anglais ou allemand)

AnHydre. Sarl au capital de 9000 €

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN – France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012 APE 3320C www.anhydre.eu anhydre@anhydre.com



Figure 2 : **SIMK®** - Montage sur pont de deux radars produisant une mesure sans contact en continu du niveau et de la vitesse sur la rivière Ilz (WWA Passau / Allemagne)

La figure 1 montre un exemple d'application typique de la méthode de calibration **SIMK®**. La photo a été prise depuis le pont routier montré en figure 2, en regardant vers l'amont. Elle montre le flux approchant la station au fil de l'eau de Schrottenbaumühle sur la rivière bavaroise Ilz. La station de mesure au fil de l'eau est opérée par le bureau des ressources en eau allemand (WWA) de Passau. Comme illustré en figure 2, deux radars ont été fixés sous le pont. Ces radars délivrent une mesure en continu et sans contact de niveau **h** et de vitesse locale **VI** en surface de l'Ilz. Ces valeurs sont mesurées sur un intervalle de 3 minutes puis mémorisées en numérique dans le contrôleur de la station de mesure au fil de l'eau.

Avant de commencer ces mesures de débit en continu par radar, le facteur sans unité entre vitesses $k(h) = V_m / V_l$, fonction du niveau et du profil, a été déterminé en une fois par application de la méthode de calibration **SIMK®**. **SIMK®** produit des ratios précis $k(h)$ des vitesses sur la plage totale relevant des variations de niveau $h_{\text{mini}} < h < h_{\text{maxi}}$, en tenant compte les conditions individuelles spécifiques de l'interface hydraulique du site de Schrottenbaumühle. Le résultat de la calibration **SIMK®** est un tableau de calibration **k - h** en fonction du niveau actuel sur le site, il est programmé dans le contrôleur de la station de mesure au fil de l'eau. Sur la base du niveau mesuré actuel **h**, la valeur correspondante du ratio $k(h) = V_m / V_l$ est sélectionnée dans le tableau de calibration **k - h** mis en mémoire numérique.

En conséquence, une simple calibration **SIMK®** fonction du niveau sur la station de mesure au fil de l'eau, permet de déterminer en continu et en ligne le ratio entre les vitesses $k(h) = V_m / V_l$ précis et spécifique au site, correspondant au niveau actuel mesuré **h**. Ces valeurs de **k** permettent la transformation précise, en ligne et en fonction du niveau, des vitesses locales en surface **VI** en vitesses moyennes au travers de la section baignée $V_m = k(h) * V_l$ et en conséquence en débit $Q = A * V_m$ dans la rivière Ilz.

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com

SIMK® - Calibration des stations de mesure sur rivières et canaux

Les valeurs mesurées **h** et **VI** avec leurs débits correspondants calculés **Q** sont mémorisés sur la base de la fréquence de mesure **Dt**. Les valeurs instantanées et toutes les valeurs historiques **h**, **VI** et **Q** sont disponibles en ligne à tout moment au travers du système de transmission réalisé au moyen de modem ou autre organe de gestion centralisée. En conséquence, ces mesures de débit basées sur **SIMK®** peuvent être utilisées immédiatement, sans plus de traitement et sans délai, par exemple pour rapporter une crue, une prévision de crue ou une alerte de crue.

2 - Fonctionnement de la méthode SIMK®

Les bases de la méthode de calibration **SIMK®** ont été développées à l'institut d'hydraulique de l'université de Munich [4]. Elles sont basées sur l'équation de continuité simple :

$$Q = A(h) * Vm \quad (1)$$

Avec

Q [m³/s] = débit

A [m²] = aire de la section baignée

Vm [m/s] = Vitesse moyenne sur la section baignée $Vm = Q/A$

VI [m/s] = Vitesse locale en une position connue de la section (x, y)

Comme la vitesse moyenne sur la section **Vm** s'écarte généralement des vitesses locales moyennées **VI**, ponctuelles ou en ligne, des mesures précises de débit exigent une connaissance précise des facteurs sans unité, fonction du niveau et du profil et qui doivent être déterminés par la calibration :

$$kl = Vm / VI \quad (2)$$

La substitution de (2) dans (1) donne :

$$Q = A(h) * kl(h) * VI \quad (3)$$

(3) révèle que des mesures précises de débit dépendent également de la précision :

* de l'aire **A(h)** de la section baignée, dépendante du niveau et du profil

* des ratios sans unité **k(h)** dépendants du niveau et du profil

* des vitesses locales **VI(x, y)** mesurées aux positions connues x, y dans la section transversale

Pour les sites de mesure choisis comme hydrauliquement compatibles, les déterminations précises de l'aire **A(h)** dépendante du niveau, basées sur un profil connu de la section transversale et des niveaux mesurés **h**, sont des tâches géométriques généralement simples ne requérant pas d'explication plus approfondie. En accord avec les spécifications du constructeur, les vitesses locales **VI** peuvent être mesurées avec une précision de +/-2% si les exigences d'application du constructeur sont prises en compte.

Les facteurs d'échelle sans unité **k(h)** dépendent principalement des paramètres géométriques connus.

- Forme du profil
- Niveau (haut) d'eau actuellement mesuré
- Position **(x, y)** de la mesure locale de vitesse **VI(x, y)**

Mais aussi, dans une moindre mesure, du nombre de Reynolds **Re** et de la rugosité **ks** [4] de la paroi. Pour les sites de mesure choisis comme hydrauliquement compatibles pour la mesure de débit et des positions données d'installation des sondes de vitesse, on doit s'attendre, dans les profils typiques de rivières et canaux, à des facteurs d'échelle fortement dépendants du niveau et du profil dans la plage de :

$$60\% < kl < 120\% \quad (4)$$

Les ratios de vitesse **kl** sont fortement affectés par le type et la position de la mesure de vitesse locale **VI(x, y)**. Particulièrement sur les rivières quasi naturelles et dans une même section transversale, des variations de valeur du facteur **kl** en fonction du niveau d'approximativement 10 – 25% sont typiques pour des positions fixes de la mesure de vitesse locale.

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com

SIMK® - Calibration des stations de mesure sur rivières et canaux

Aussi, sur des sites de mesure de débit choisis mais hydrauliquement incompatibles ou sur des positions des sondes de vitesse hydrauliquement incompatibles, des variations substantiellement plus grandes des ratios sans unité $kl(h)$ doivent être considérés. Par exemple, si le site de mesure est positionné directement en aval d'un coude prononcé ou d'une pile de pont ou directement en amont d'un déversoir, des zones d'eau morte ou même des zones localisées de retour peuvent apparaître au voisinage direct de la mesure de vitesse locale. Ceci doit être plus particulièrement surveillé pour les hautes eaux. Toutefois, les valeurs du facteur sans unité k correspondant aux vitesses locales mesurées sur des zones d'eaux mortes, peuvent atteindre des multiples de 100%. Les vitesses mesurées dans les zones de retour fortement dépendantes du niveau peuvent même requérir des valeurs négatives de k .

De ceci il découle :

1 – pour les sites de mesure ou pour les positions d'installation des sondes de vitesse, choisis mais incompatibles avec l'hydraulique, des mesures précises de débit ne peuvent normalement pas être déterminées, même si des mesures très précises de niveau et de vitesse sont disponibles, ceci parce que les vitesses locales Vl mesurées ne sont pas suffisamment représentatives des vitesses moyennes d'aire Vm dans la totalité de la section transversale mouillée.

2 – A l'opposé, pour les sites de mesure et pour les positions d'installation des sondes de vitesse choisis hydrauliquement compatibles, les mesures de vitesse locale Vl sont caractéristiques des vitesses recherchées comme moyennes sur la section Vm . Toutefois, les ratios sans unité $kl = Vm / Vl$ des vitesses, ne sont pas constants mais sujets à de fortes variations en fonction du niveau.

3 – En conséquence, (3) révèle que, même basé sur des sites de mesure et des positions d'installation des sondes de vitesse choisis comme hydrauliquement compatibles et sur des mesures de niveau et de vitesse très précises, le débit Q ne peut pas être déterminé plus exactement que ce qui est permis par la connaissance disponible des facteurs d'échelle correspondants $kl = Vm / Vl$. Ces valeurs k dépendent du site et sont typiquement fortement liées à la forme du profil et au niveau (haut) actuel de l'eau.

En conséquence, les sites de mesure de débit et les positions d'installation des sondes de vitesse doivent être choisis comme hydrauliquement compatibles. Toutefois, quand cette exigence minimale est respectée, il reste que des mesures précises du niveau et de la vitesse doivent être complétées par une procédure universellement applicable produisant le facteur de mise à l'échelle $k(h)$ défini en (2), en fonction du niveau et du profil. Cette méthode doit produire des ratios sans unité $k(h)$ des vitesses, spécifiques aux sites, avec précision, sur le court terme comme sur la plage complète de variation de niveau pouvant se produire sur le site de mesure:

$$h_{\text{mini}} < h < h_{\text{maxi}} \quad (5)$$

Cette procédure est la méthode SIMK® décrite dans la section suivante.

3 – SIMK® - les bases

(2) montre que les facteurs d'échelle sans unité $kl = Vm / Vl$ requis pour la calibration d'un site de mesure de débit, correspondent exactement au produit de Vm et de la valeur réciproque de la distribution axiale de vitesse $Vl(x, y)$ du profil de la rivière ou du canal. En conséquence, des déterminations universelles de kl requièrent la connaissance détaillée des relations sans unité entre les distributions axiales de vitesse turbulente $V(x, y)$ et les vitesses moyennées sur l'aire transversale correspondante $Vm = Q / A$ dans les sections baignées en fonction du niveau.

La méthode de calibration SIMK® est basée sur la simulation des facteurs d'échelle kl sans unité, dépendants du niveau et du profil. Pour ceci, des distributions de vitesse turbulente sont simulées dans des rivières et canaux de toutes formes et tailles, au moyen d'un modèle numérique des dynamiques du fluide. Les distributions axiales de vitesse sont fortement influencées par les courants secondaires, lesquels prévalent dans le profil de la section transversale et qui ont pour origine les obstacles d'échange d'impulsion turbulente au voisinage des bords du profil et de la surface libre de l'eau [4]. En conséquence, les distributions axiales de vitesse $Vl(x, y)$ et les facteurs d'échelle correspondants $kl = Vm / Vl$, dépendent fortement en particulier de la forme spécifique du profil sur le site et du niveau actuel de l'eau. Toutefois, la forme du profil et le niveau d'une rivière ou d'un canal sont connus ou sont mesurés en continu.

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com

SIMK® - Calibration des stations de mesure sur rivières et canaux

Parce que l'utilisation de la connaissance précise de ces facteurs géométriques particulièrement prédominants requiert de considérer avec précision la forme spécifique au site et les niveaux mesurés actuels, la méthode de calibration **SIMK®** permet des discrétisations adaptables, précises et détaillées par éléments finis dans les sections baignées en fonction du niveau des rivières et dans des canaux de toute taille et forme.

Ceci est particulièrement illustré par la figure 3 montrant la discrétisation en éléments finis d'une section transversale jointe sur Muka Keratan / Malaisie, comprenant un canal en béton de largeur 20 mètres, restreint par des palplanches et avec des berges de différentes largeurs, recouvertes d'herbe, limitées par palplanches et inondées seulement aux hautes eaux. Dans cette section de mesure large de 43 mètres devaient être pris en compte des rugosités de parois très différentes et des niveaux variant significativement dans la plage approximative de $24.0 < h < 29.0\text{m}$.

Dans cette section transversale a été installé un système par temps de transit des ultrasons, produisant des mesures en continu des vitesses moyennées **VI**, au long du chemin acoustique défini par les positions de montage des transducteurs correspondants. Comme des mesures en continu étaient demandées sur la totalité de la plage des variations du niveau, les capteurs à ultrasons ont été montés en accord avec la figure 3, sous le plus bas niveau attendu de 23,20m sur des piles en opposition dans le canal principal. La figure 3 montre la discrétisation en élément fini pour le niveau maximum d'eau attendu d'environ 29,0m, correspondant à un débit maximum d'environ $Q_{\text{max}} = 450\text{m}^3/\text{s}$.

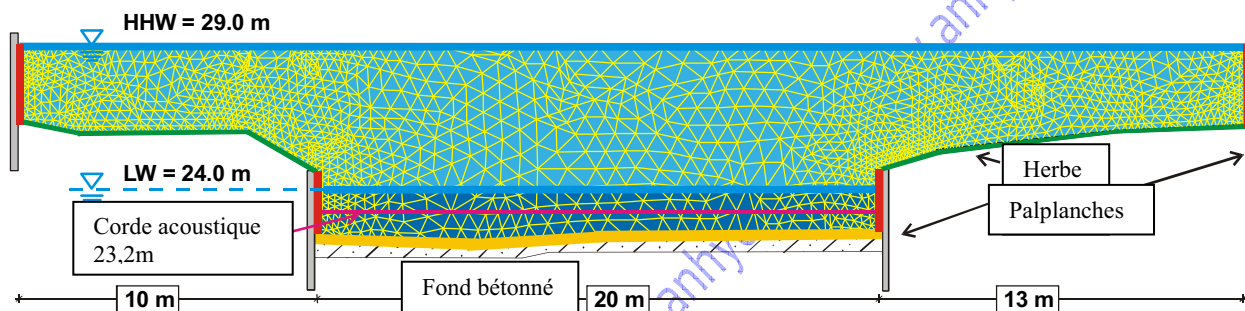


Figure 3 : Discretisation en élément fini d'une section transversale de mesure jointe sur une station de mesure par ultrasons en temps de transit installée sur Muka Keratan / Malaisie, pour le niveau maximum d'eau HHW.

La figure 3 révèle que les profils de toutes formes peuvent être discrétisés en fonction du niveau, très exactement et en grand détail, au moyen d'une triangulation en élément fini universellement adaptable. De plus, sur la base de ces triangulations les rugosités des parois, qui sont significativement variables au fil du périmètre hydraulique de la section baignée, peuvent être facilement prises en considération en grand détail. Ceci est obtenu parce que toute rugosité de paroi peut être assignée indépendamment des autres sur chaque élément de l'interface externe du réseau en élément fini. Dans le modèle **SIMK®** ces rugosités de parois sont considérées individuellement pour l'extérieur de chaque élément du réseau en élément fini sur la base de la loi logarithmique universelle de la paroi [4]. Par exemple, des valeurs de rugosité de paroi (k_s en mm) plus faibles ont été assignées sur le fond en béton lissé du canal principal qu'à celles des berges en herbe. Des rugosités particulièrement élevées ont été assignées aux palplanches verticales. En accord avec (5) des discrétisations analogues en éléments finis ont été générées systématiquement pour les niveaux d'eau h plus bas.

Sur la base des assignations, en fonction du niveau, de la forme du profil et des rugosités variables des parois sur les éléments finis, les distributions correspondantes de vitesse axiale turbulente dans la rivière ou le canal sont simulées au moyen du modèle **SIMK®**. Des simulations simultanées de la turbulence très influente commandée par les courants secondaires, permettent des simulations **SIMK®** très précises de distribution de la vitesse axiale. Les considérations détaillées de profils de rivière et de canal de toute forme et de toutes les variations de rugosité, permettent des applications universelles de la méthode de calibration **SIMK®** prouvées en [4] par comparaisons extensives des distributions des vitesses simulées et mesurées. L'application de la méthode de calibration **SIMK®** standard est restreinte aux changements graduels dans la distribution de vitesse de la rivière ou du canal dans la direction d'écoulement, parce que tous les gradients dans la direction d'écoulement sont négligés car présumés nettement plus faibles que les gradients se produisant à l'intérieur de la section baignée.

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com



SIMK® - Calibration des stations de mesure sur rivières et canaux

De nombreuses années d'expérience révèlent que dans la plupart des cas cette condition peut être remplie avec une bonne approximation, si l'on choisit des sites de mesure hydrauliquement compatibles. Des descriptions détaillées des bases et conditions du modèle SIMK® sont produites en [4]. Des descriptions complètes sont données en [6], [8], [10].

4 – Vérification de l'outil de calibration SIMK®

L'efficacité du modèle SIMK® a été prouvée par le calcul des distributions de vitesse turbulente sur des profils de différentes formes et par comparaison des distributions de vitesses simulées avec des mesures de précision en laboratoire, produit par différents auteurs.

Par exemple, les isovels dans la moitié droite de la figure 4, mesurée sans contact par Nezu & Rodi [11] au moyen de mesures Laser Doppler dans la moitié gauche d'un canal rectangulaire partiellement rempli. Ces mesures correspondent très bien avec la distribution de vitesse turbulente axiale simulée au moyen du modèle SIMK® et montrée dans la moitié gauche de la figure 4. La profondeur typique de la vitesse maximum sous la surface libre et la forme des isovels vers la paroi du profil, qui sont des points très caractéristiques de la distribution de vitesse turbulente dans la forme du profil sous investigation, sont simulées au moyen du modèle SIMK® avec grande précision et grands détails.

La raison de cette correspondance très proche est clarifiée par la comparaison des courants secondaires découlant de la turbulence, correspondants, simulés et mesurés, montrée en figure 5. Le coin au fond du canal rectangulaire provoque un fort courant secondaire au long de la bissectrice vers ce coin, créant un vortex de surface tournant dans le sens horaire et un vortex de fond tournant dans le sens contre horaire.

Proche de la surface libre les fluctuations de vitesse turbulente sont réduites en direction verticale et augmentées en direction horizontale. En conséquence, au voisinage de la surface libre de l'eau les fluctuations de vitesse turbulente deviennent anisotropes, provoquant des réductions substantielles de l'échange d'impulsion de turbulence verticale et pour des raisons de continuité de substantielles augmentations de l'échange horizontal d'impulsion de turbulence. Cette anisotropie caractéristique induite par la surface libre est fortement dépendante du niveau et provoque des augmentations substantielles des composantes horizontales du vortex de surface au voisinage de la surface libre. Ces augmentations génèrent une forte impulsion convective de transport depuis la berge du profil vers le centre du profil, ce qui cause des réductions substantielles des vitesses axiales de surface.

De plus, cette caractéristique de turbulence anisotropique induite en surface libre et dépendante du niveau, qui se produit proche de la surface libre provoque une augmentation et un déplacement du vortex de surface depuis la berge du profil vers le centre du profil. En conséquence, le vortex de fond est repoussé dans le coin du profil et réduit par l'augmentation d'influence de la friction sur la paroi. Ainsi, le vortex de surface surpassé le vortex de fond nettement en fonction de l'extension et de la vitesse maximum. Au centre du profil le fort courant vertical du vortex de surface, vers le fond, provoque un enfoncement significatif de la vitesse maximum axiale sous la surface libre. Cet enfoncement de la vitesse est typique des profils rectangulaires compacts.

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com

SIMK® - Calibration des stations de mesure sur rivières et canaux

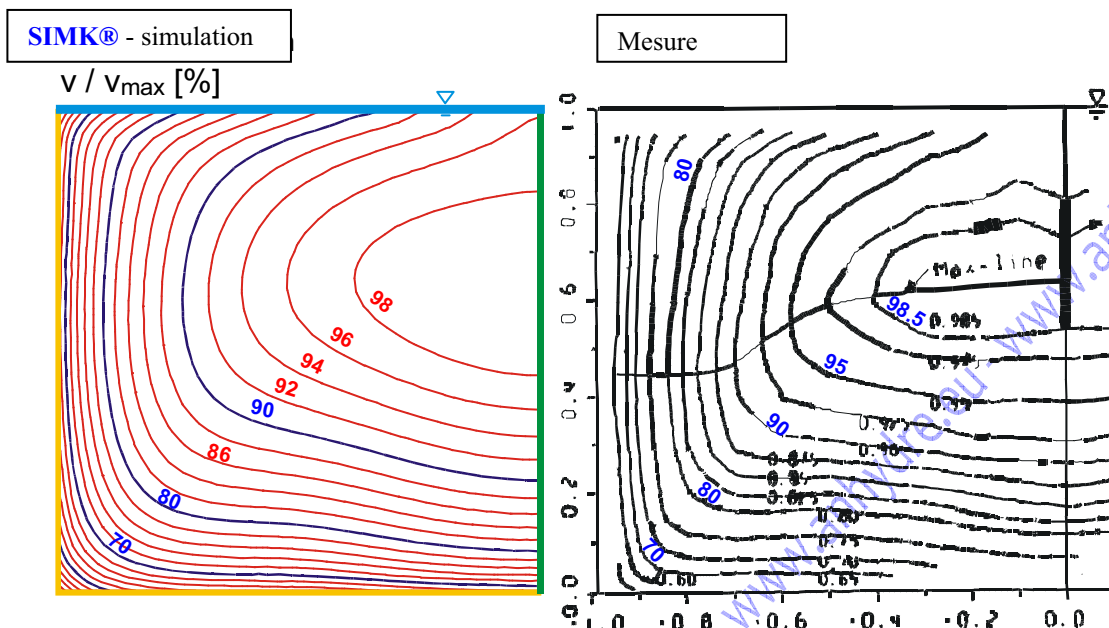


Figure 4 – Au moyen de **SIMK®**, vitesses axiales simulées avec le modèle et mesurées [11] sur la moitié gauche d'un canal rectangulaire

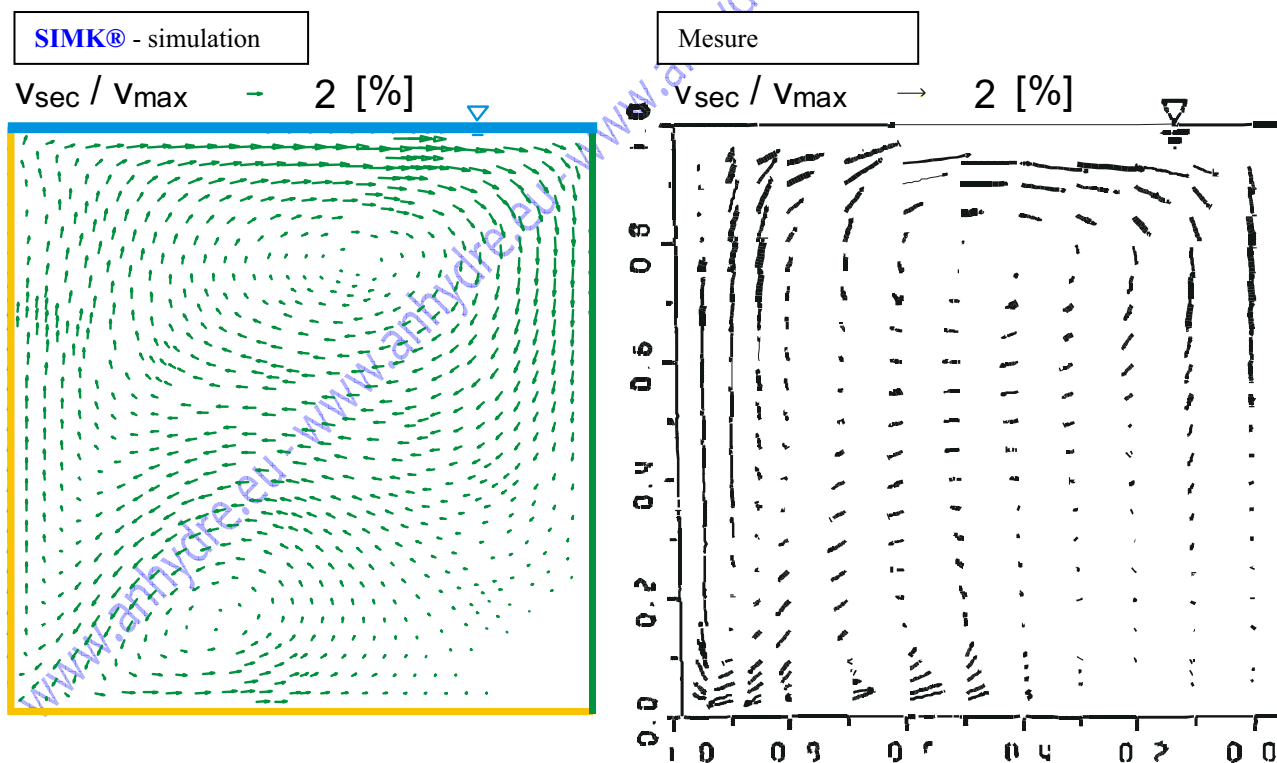


Figure 5 – Au moyen de **SIMK®**, vitesses secondaires simulées avec le modèle et mesurées [11] sur la moitié gauche d'un canal rectangulaire

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com

SIMK® - Calibration des stations de mesure sur rivières et canaux

Par analogie, de nombreux points caractéristiques additionnels des distributions de vitesse turbulente axiale peuvent être simulés et expliqués au moyen des courants secondaires liés à la turbulence, lesquels sont fortement influencés par la forme du profil et le niveau d'eau de la surface libre. [4]

Le modèle **SIMK®** prend en considération précisément ces influences dominantes de la forme du profil et du niveau. En conséquence le modèle **SIMK®** permet des simulations détaillées et précises en fonction du niveau des distributions de turbulence axiale et secondaire dans des profils de toutes formes et toutes tailles.

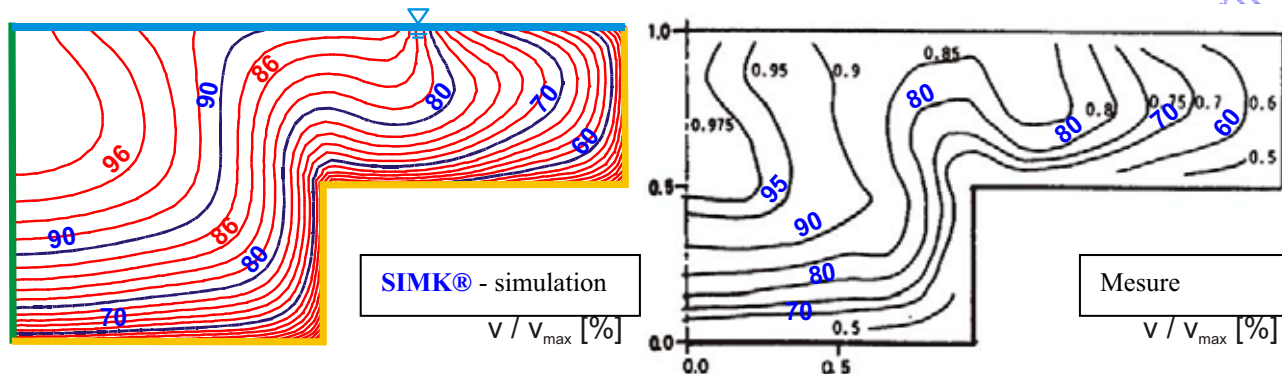


Figure 6 – Au moyen de **SIMK®**, vitesses axiales simulées avec le modèle et mesurées [11] dans la moitié droite d'un profil schématique avec berge inondée

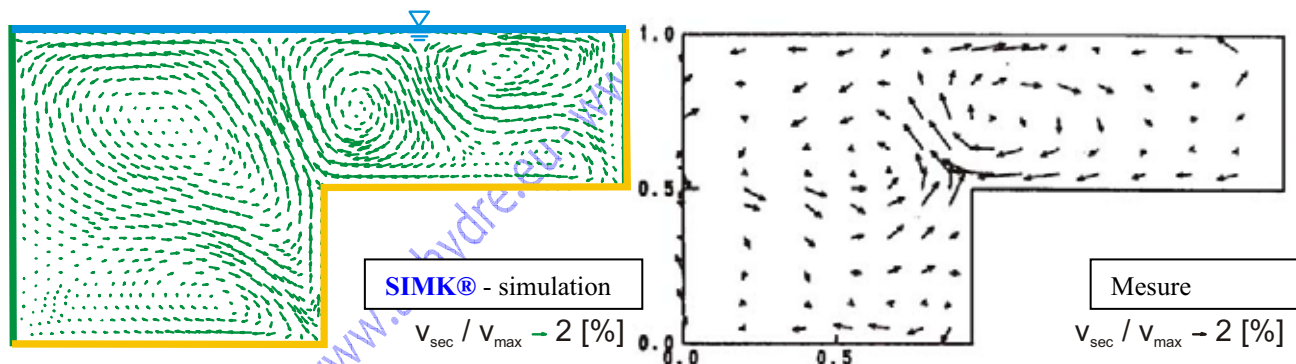


Figure 7 – Au moyen de **SIMK®**, vitesses secondaires simulées avec le modèles et mesurées [11] dans la moitié droite d'un profil schématique avec berge inondée

L'applicabilité universelle du modèle **SIMK®** sur les profils de toutes formes est illustrée exemplairement en figures 6 & 7, montrant la comparaison des distributions simulées et mesurées de vitesse turbulente par des mesures avec film chaud de Tominaga, Nezu & Ezaki [15] pour la moitié droite d'un profil schématique avec berge inondée. Comme attendu, une forme de profil plus compliquée crée des structures de distribution de vitesse plus compliquées. Par exemple, le coin latéral du profil génère des courants secondaires particulièrement forts au long de la bissectrice de cet angle, ils sont toutefois orientés depuis ce coin vers le centre du profil et vice versa pour les courants secondaires générés par le saillant du coin dans le profil du canal rectangulaire. Ce fort courant au coin dans le plan de séparation du profil de berge pilote un système de cinq vortex secondaires dans le sens contre horaire dans une moitié du profil schématique de la berge. La figure 7 révèle que chacun de ces cinq vortex est simulé au moyen du modèle **SIMK®** en grand détail et en proche correspondance avec les mesures de vitesse par film chaud de Tominaga, Nezu & Ezaki [15].

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com

SIMK® - Calibration des stations de mesure sur rivières et canaux

[4] comprend environ 20 comparaisons supplémentaires de distributions de vitesse turbulente simulées et mesurées pour d'autres formes de profil et différents niveaux d'eau. Malgré des formes très différentes de profil, toutes ces simulations montrent une correspondance étroite avec les mesures. Ainsi, de hautes précisions du modèle **SIMK®** peuvent également être attendues dans le cas de profils irréguliers des rivières. Comme les courants secondaires commandés par la turbulence et leurs fortes influences sur les distributions de vitesse axiale sont simulés avec fiabilité et en grand détail, le modèle **SIMK®** permet des calculs précis et détaillés des relations entre vitesses fortement dépendantes des profils et des niveaux d'eau $kl = V_m / V_l$ définies en (2).

Les calibrations **SIMK®** spécifiques aux sites des stations de mesure au fil de l'eau appliquent en conséquence les règles hydrauliques de base, guidant le modèle **SIMK®** de manière à obtenir la vitesse moyenne V_m dans la section mouillée et ainsi le débit recherché $Q = A * V_m$ sur la base d'une seule ou de quelques vitesses locales V_l mesurées sur des positions hydrauliquement compatibles (x, y) dans la section transversale du site.

Les calibrations **SIMK®** n'utilisent aucune des valeurs absolues des vitesses simulées, mais seulement des ratios sans dimension de vitesse simulée $k(x, y) = V_m / V(x, y)$. Parce que ces facteurs sans dimension dépendent en général fortement des niveaux mesurés, mais pour les nombres de Reynolds typiques des rivières et canaux, ils ne dépendent que très légèrement des valeurs absolues des vitesses ainsi mesurées, les calibrations **SIMK®** sont très bien applicables en cas d'influence aval, parce que l'influence aval n'est pas simulée mais mesurée actuellement au moyen de h et de V_l .

5 – Inspections de terrain de la méthode de calibration **SIMK®**

Plusieurs autorités professionnelles ont vérifié les précisions et l'applicabilité universelle de la méthode de calibration **SIMK®** par comparaisons des débits déterminés au moyen de la méthode de calibration **SIMK®** sur des canaux et rivières de très différentes tailles, formes et rugosités avec des mesures de référence indépendantes du débit.

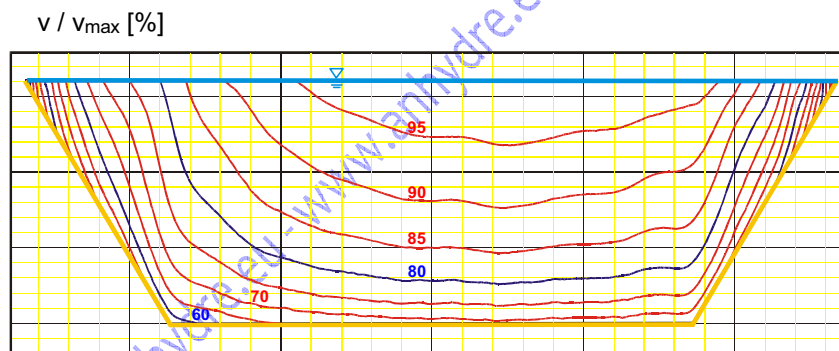


Figure 8 – Distribution de vitesse turbulente simulée au moyen du modèle **SIMK®** dans un canal trapézoïdal du VAO [14]

5 - 1 – Laboratoire d'ingénierie hydraulique et de gestion des ressources en eau de l'université de Munich (VAO)

Des mesures de débit **SIMK®** ont été faites dans le laboratoire d'ingénierie hydraulique et de gestion des ressources en eau de l'université de Munich (VAO) en canal rectangulaire rectiligne de largeur 2,5 mètres et sur trois niveaux différents. Les niveaux h ont été mesurés au moyen d'une canne jauge et les vitesses maximum V_{max} ont été mesurées au moyen d'un courantomètre à hélice. Les positions (x, y) locales dépendantes du niveau de la vitesse maximale très plate et très facilement déterminable (cf figure 4) et des ratios de vitesse dépendants du niveau correspondants $k_{max} = V_m / V_{max}$ ont été déterminés au moyen du modèle **SIMK®**. D'autres mesures de vitesse complémentaires ont été prises à côté de V_{max} . Le tableau 1 résume les débits **SIMK®** résultants $Q_{simk} = A(h) * k_{max} * V_{max}$ déterminés en accord avec (3) exclusivement sur la base des valeurs mesurées h et V_{max} et des facteurs d'échelle correspondants k_{max} déterminés par la calibration **SIMK®**.

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com

SIMK® - Calibration des stations de mesure sur rivières et canaux

Tableau 1 Vérification de 5 mesures de débit avec SIMK® dans un canal rectangulaire et dans un canal trapézoïdal courbé

Canal	H [m]	A [m ²]	Qsimk [l/s]	Qvao [l/s]	DQ [%]
Rectangle	0,89	2.22	223	231	-3,5
B = 2,49m	1,48	3.69	254	253	0,5
	1,91	4.76	319	302	5,6
Trapèze	0,159	0.349	27,6	27,6	0,0
Bs = 1,71m	0,161	0.353	37,3	37,8	-1,3

D'une manière analogue, les deux débits additionnels **Qsimk** du tableau 1 ont été déterminés dans un canal trapézoïdal courbé avec un lit mobile. Ce canal trapézoïdal est caractérisé par une largeur de fond $b_s = 1,71\text{m}$, des gradients de pente de 1 :3 et un rayon de courbure de $R = 40\text{ m}$ dont l'influence est prise en compte par le modèle SIMK®. En accord avec la figure 8, des gradients de vitesse plus raides dominent le long de la rive droite qu'au long de la rive gauche à l'intérieur du canal courbe. Cette distribution asymétrique de vitesse résulte de la courbure qui induit des forces centrifuges additionnelles, générant des courants secondaires qui sont dirigés vers la rive extérieure, proches de la surface libre et vers la rive intérieure proches du fond du canal. Dans cette large courbure, des vortex secondaires induits résultent de cet effet, les vitesses axiales augmentent depuis le fond vers la surface libre. Du fait de la courbure, les forces centrifuges sont substantiellement augmentées par les vitesses en élévation, la partie supérieure de la section transversale est exposée à des forces centrifuges plus grandes que la partie basse de cette section.

Comme le modèle SIMK® prend en compte ces effets additionnels induits par cette courbure, le modèle SIMK® permet aussi des simulations réalistes des distributions de vitesse de turbulence sur les coudes longs, étirés des rivières, qui se manifestent souvent dans la pratique.

5 - 2 – Institut fédéral d'hydrologie (BfG)

L'avantage des mesures comparatives pratiquées par le VAO est que les mesures de débit SIMK® peuvent être comparées à des mesures de référence très pointues basées sur des mesures précises du niveau en amont d'un déversoir triangulaire de mesure situé en amont. Il est toutefois désavantageux que ces vérifications de débit ne puissent pas être pratiquées en rivières naturelles et que ces débits réalisables au VAO soient substantiellement plus faibles que les débits typiques trouvés dans les grands canaux et larges rivières.

En conséquence, les précisions à la portée de SIMK® ont été investiguées plus en profondeur par des tests de terrain à grande échelle. Pour ceci, l'institut fédéral allemand d'hydrologie (BfG) a commandé des calibrations SIMK® dépendantes du niveau sur dix voies d'eau, canaux et rivières, localisées dans les régions de Berlin et en Saxe. Sur la base de ces calibrations le BfG a pratiqué des mesures de débit SIMK® puis comparé les résultats avec des mesures de débit en référence indépendante, pratiquées typiquement avec un courantomètre à hélice. Des profondeurs d'eau dans la gamme de $2,4\text{m} < t < 7\text{m}$ et des largeurs dans la gamme $14\text{m} < B < 70\text{m}$ ont été investiguées. Dans le fleuve Elbe, le BfG a analysé différentes sections transversales jusqu'à 200m de largeur, prenant en compte de grandes rives submergées. Ces tests pratiques du BfG ont couvert des variations de débit sur la gamme

$$0,5\text{m}^3/\text{s} < Q < 1500\text{m}^3/\text{s} \quad (6)$$

Ces tests extensifs de terrain ont été accomplis avec succès et sont documentés en [12]. Au compte de ces dix tests de terrain, des mesures comparatives de débit sont introduites dans les sections suivantes, elles ont été pratiquées par le Bfg sur la station au fil de l'eau de Dresde sur le fleuve Elbe et sur la station Muhlendamm de la voie d'eau Spree – Oder au centre de Berlin.

5 – 2 - 1 – Dresde - Elbe

La station de jaugeage est localisée en aval de la ville de Dresde sur un long coude étiré du fleuve Elbe. La profondeur moyenne se situe entre 3,0 et 3,5 mètres. En conditions de hautes eaux la profondeur peut dépasser 8 mètres. La largeur moyenne de l'Elbe vers Dresde est approximativement 110 mètres. Dû aux fortes crues sur les rives, la largeur peut atteindre $B = 160\text{m}$ environ.

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com

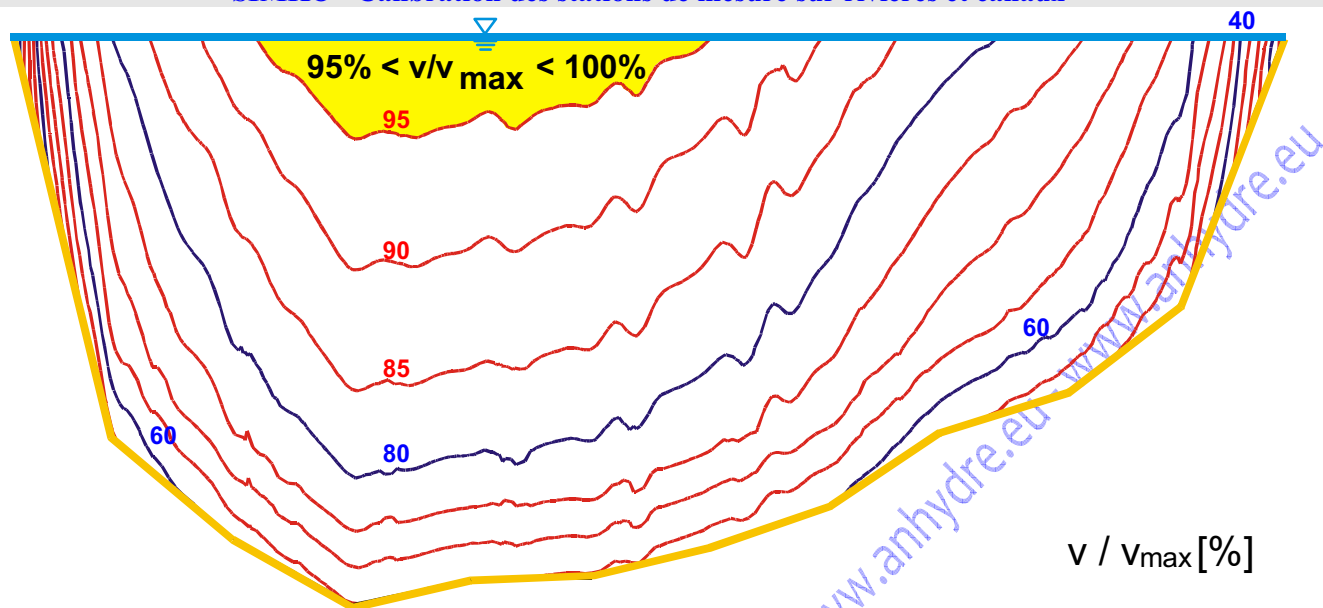


Figure 9 – Représentation super élevée de la distribution de vitesse turbulente de la station au fil de l'eau de Dresde / Elbe, simulée au moyen du modèle **SIMK®** (BfG, Allemagne [12])

La figure 9 montre une représentation sans échelle, fortement surélevée de la distribution de vitesse turbulente de l'Elbe, simulée au moyen du modèle **SIMK®**. La figure 9 montre le fleuve Elbe d'une manière similaire au canal trapézoïdal courbé du VAO en figure 8, avec un clair décalage de vitesse maximum vers la rive externe de la section transversale, provoqué par les forces centrifuges induites par le coude. De plus, la figure 9 révèle qu'entre la rive extérieure et le centre du fleuve, proche de la surface existe une zone jaune large d'environ 30m et profonde jusqu'à 0,6m et dans laquelle les vitesses axiales ne varient que légèrement entre 95 et 100% de la vitesse maximum. Ce résultat du modèle **SIMK®** a été utilisé pour des mesures précises de débit dans l'Elbe avec peu de frais. En conséquence seulement trois vitesses simples ont été mesurées dans cette zone jaune au moyen d'un courantomètre à hélice.

Avec l'hypothèse simplifiée que la moyenne de ces trois vitesses mesurées localement V_I représentent approximativement 97.5% de la vitesse maximum V_{max} dans la section baignée A, la vitesse moyenne sur la section V_m et le débit Q de l'Elbe en sont déduits. Ces mesures de débit avec **SIMK®** Q_{simk} ont été répétées par le BfG sur 12 niveaux très différents h . Les résultats de cette rapide procédure d'évaluation de débit [12] sont résumés dans le tableau 2.

A titre de référence, le tableau 2 résume en plus les résultats des mesures **Qprofil**. Chacun des résultats des débits de référence **Qprofil** provient de l'intégration d'une campagne détaillée sur la section transversale requérant 100 à 200 mesures individuelles de vitesse par courantomètre à hélice. Ces mesures de vitesse pratiquées par le BfG sur la section totale baignée du fleuve Elbe.

Même si le tableau 2 révèle que les débits investigués varient significativement sur la gamme $152 < Q_{profil} < 844$ m³/s, les divergences de débit entre Q_{simk} et Q_{profil} ne varient que légèrement entre 0,0 et 6,7%. La divergence moyenne du débit des 12 comparaisons investiguées s'élèvent à 2,6%. Des résultats comparables auraient été trouvés si les vitesses de surface de l'Elbe avaient été mesurées en continu et sans contact au moyen d'un radar ou d'un capteur de vitesse superficielle par caméra installés sous le pont (cf figure 2).

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com

SIMK® - Calibration des stations de mesure sur rivières et canaux

N°	date	A [m2]	Qprofil [m3/s]	Qsimk [m3/s]	D Q [%]
1	10/11/94	236,1	153,8	158,6	3,1
2	17/11/94	236,0	151,9	156,9	3,3
3	19/01/95	317,5	269,4	271,3	0,7
4	25/01/95	488,7	634,8	592,5	6,7
5	05/04/95	601,8	844,2	825,1	2,3
6	18/04/95	526,5	719,8	723,8	0,6
7	18/07/95	287,8	235,1	237,8	1,1
8	25/07/95	277,7	223,0	216,0	3,1
9	11/10/95	285,8	228,1	228,9	0,4
10	19/10/95	273,7	201,4	212,1	5,3
11	29/03/96	505,3	670,0	638,1	4,8
12	03/04/96	384,0	403,7	403,9	0,0

A = Aire de la section baignée – Qprofil = Evaluation des mesures par courantomètre à hélice – Qsimk = Evaluation SIMK® de la vitesse Vmax
 DQ = (Qsimk – Qprofil) / Qprofil

Tableau 2 Vérification de 12 mesures SIMK® pratiquées sur l'Elbe à Dresde [12]

Il doit être noté que les bonnes correspondances entre toutes les mesures de débit résumées au tableau 2 ont été obtenues non en conditions de laboratoire mais sous conditions de pratique à grande échelle.

En particulier, l'Elbe a un lit naturel. La rugosité du fond et le gradient d'énergie de la rivière ont du être estimés pour les calibrations SIMK®. Ces estimations ont été simplement basées sur l'information générale « fond sableux et rives couvertes de végétation » et sur une grossière évaluation du débit moyen de l'Elbe. Même si le site de mesure de débit est placé sur un coude typique de l'Elbe et même si à chaque fois seulement trois mesures de vitesse locale ont été faites proches de la surface libre, les hautes précisions des mesures données au tableau 2 ont été obtenues au moyen de la méthode de calibration SIMK®. Des résultats comparables et bons ont aussi été obtenus pour d'autres sites de mesure comparative du Bfg [12] et plusieurs autres stations comparables de mesure au fil de l'eau.

Le tableau 2 révèle que la méthode de calibration SIMK® permet des mesures précises de débit non seulement dans de petits canaux mais aussi dans de grandes rivières. Ces hautes précisions ont été obtenues de manière reproductible, même si les gradients d'énergie et les rugosités du lit devaient être estimés. Malgré ces estimations grossières SIMK® permet des mesures précises des débits parce que SIMK® ne prend en compte aucune des valeurs de vitesse absolues simulées qui dépendent fortement des gradients estimés d'énergie et des rugosités estimées du fond. A la place, SIMK® ne prend en compte que des ratios sans dimension de vitesse $kl = Vm / VI(x, y)$ déduits des simulations de vitesse de turbulence. Toutefois, en contraste avec les valeurs de vitesse absolue VI, les facteurs de calibration sans dimension SIMK® $Kl = Vm / VI$ sont quasi indépendants des gradients actuels d'énergie, tant que les nombres de Reynolds sont dans la gamme

$$10x5 < Re < 10x8 \quad (7)$$

Indiquant de hautes distributions de vitesse de turbulence typiques des rivières et grands canaux. En conséquence pour les positions d'installation hydrauliquement compatibles de capteurs de vitesse, des estimations réalistes de la rugosité du fond permettent des calculs précis des relations de vitesse $kl = Vm / VI$. En conséquence, la combinaison des informations pratiques disponibles sur la rugosité comme par exemple « fond sableux et rives couvertes de végétation » avec des expériences de projet extensif sur le long terme est suffisante pour des déterminations précises SIMK® des facteurs d'échelle sans dimensions requis $kl = Vm / VI$. L'impact très décisif des influences aval dépendent des gradients d'énergie et de la rugosité actuelle ne sont pas pris en compte dans tout type de simulation mais sont basés sur la mesure en continu de vitesse locale VI reflétant directement l'impact décisif des gradients d'énergie dépendants de l'influence aval et de la rugosité actuelles. En conséquence, par contraste aux simples mesures de niveau, les mesures de vitesse locale réalisées en continu avec la procédure SIMK® permettent des mesures précises du débit même en cas d'impact variable de l'influence aval (ex. : résultant d'une végétation variable en fonction des saisons ou de toute perturbation ou obstacles positionnés en aval du site de mesure au fil de l'eau).

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com

5 – 2 – 2 – Mühlendamm / voie d'eau Spree – Oder dans Berlin

Les figures 10 à 13 montrent en exemple des résultats typiques **SIMK®** commandés par le BfG pour la calibration de la station de mesure au fil de l'eau Mühlendamm localisée sur la voie d'eau Spree – Oder dans Berlin [12]. Le réseau d'éléments finis montré en figure 10 illustre la capture flexible de la géométrie dans la section transversale. Les palplanches latérales et le fond sableux substantiellement plus lisse sont considérés par le modèle **SIMK®** en différentes rugosités de paroi. La figure 11 montre la relation sans dimension de la distribution de vitesse de turbulence $V(x, y)$ simulée au moyen du modèle **SIMK®**. Les rugosités différentes des parois provoquent des gradients de vitesse plus marqués à proximité du fond du profil qu'à proximité des palplanches latérales verticales. Clairement reconnaissable est l'enfoncement de la vitesse maximum sous la surface libre, l'arrière fortement courbé des isovels proches des zones limites de la surface libre et les isotaches en couches bombées vers les parois verticales. Ces effets sont causés par la turbulence fonction du profil, pilotée par les courants secondaires [4] calculés de manière similaire au moyen du modèle **SIMK®** et montrés en figure 12.

Les facteurs de calibration requis kl découlent de l'évaluation de distribution axiale de vitesse montrée en figure 11. A cet effet les résultats sont montrés en figure 13 sous une forme différente. A la place de $Vl / Vmax$, la figure 13 montre une représentation surélevée de la relation Vm / Vl présentant le produit de Vm et de la distribution inversée de vitesse sur la section transversale de Mühlendamm, identique avec la distribution du facteur d'échelle sans dimension $kl = Vm / Vl$ défini en (2). Le système local de coordonnées montré en plus en figure 13 permet d'identifier facilement des positions dans la section transversale (x, y) auxquelles sont mesurées les vitesses locales $V(x, y)$, par exemple au moyen d'un courantomètre à hélice (cf figure 9 et tableau 2) ou au moyen, d'une sonde radar montée au dessus de l'eau (cf figure 2) ou au moyen d'un capteur Doppler à ultrasons installé au fond ou sur les parois verticales du canal [2], [5], [9]. Le tracé isoligne de $kl = Vm / Vl$ montré en figure 13 permet une identification directe du facteur d'échelle requis $kl(x, y)$ valide pour la position (x, y) à laquelle sont mesurées les vitesses locales $Vl(x, y)$. Toutefois, Vl , kl et l'aire de la section transversale fonction du niveau $A(h)$ sont suffisants pour calculer le débit recherché Q (cf. (3)).

SIMK® n'est pas limité aux mesures ponctuelles de vitesse Vp en toute position connue $P(x = xp, y = yp)$ de la section transversale, **SIMK®** est aussi applicable par analogie à tous types de mesures en ligne moyennées de la vitesse, qui produisent des signaux de mesure représentant les vitesses moyennes Vab trouvées au fil d'une distance rectiligne $A - B$ définie par la position exactement connue du début $A(x = xa, y = ya)$ et de la fin $B(x = xb, y = yb)$ du chemin de mesure de la vitesse. Par exemple les systèmes de mesure acoustiques par temps de transit délivrent des signaux de mesure représentant les vitesses moyennes en ligne Vab mesurées au long du chemin acoustique $A - B$ dont la position locale est précisément définie par les positions exactement connues du montage des transducteurs à ultra sons, typiquement installés sur les deux côtés d'une section de mesure. Juste comme toute mesure ponctuelle de vitesse Vp , les mesures moyennées en ligne de la vitesse Vab peuvent aussi être regardées comme des mesures de vitesse locale Vl qui en général dévient aussi des vitesses moyennées sur la section $Vm = Q / A$ requises pour la détermination finale du débit Q . Toutefois, ajouter les chemins $A - B$ de mesure de vitesse locale du système par temps de transit des ultrasons sur la figure 13 et moyenner les relations de vitesse simulée $kl = Vm / Vl$ au long de ces chemins, produit exactement les facteurs de calibration requis $kab = Vm / Vl$ pour ce système acoustique. La figure 13 montre exemplairement les facteurs d'échelle **SIMK®** $kl1 = 91,6\%$ et $kl2 = 98,2\%$, respectivement déterminés de la manière décrite au moyen du modèle **SIMK®** pour la section transversale de la voie d'eau Mühlendamm à un niveau spécifique et pour une position d'installation exactement connue des transducteurs à ultrasons.

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com

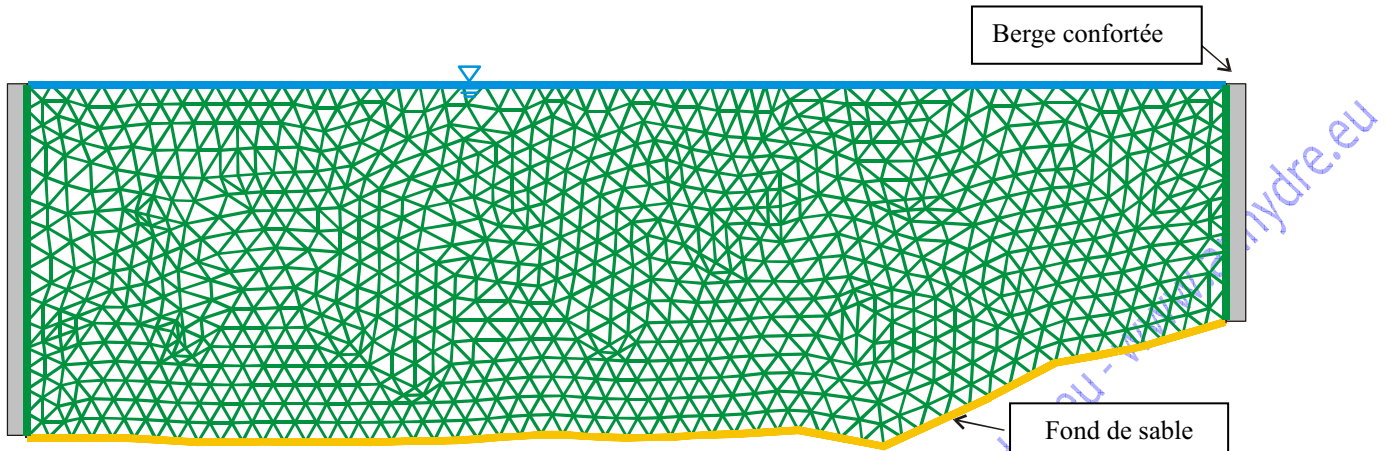


Figure 10 - réseau d'élément fini du profil Mühlendammschiffdamme sur la voie d'eau Spree - Oder à Berlin (commande - BfG [12])

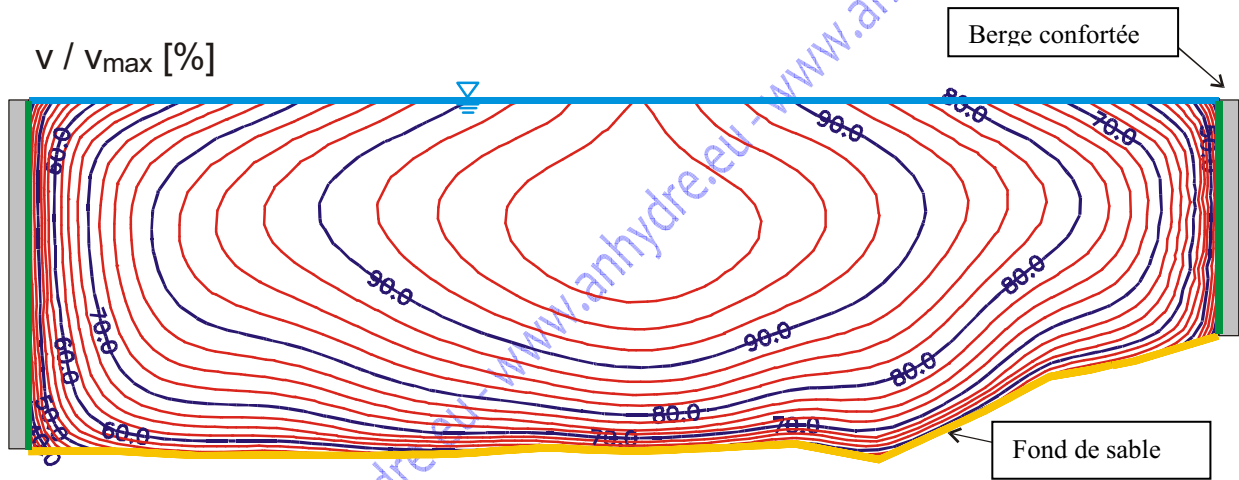
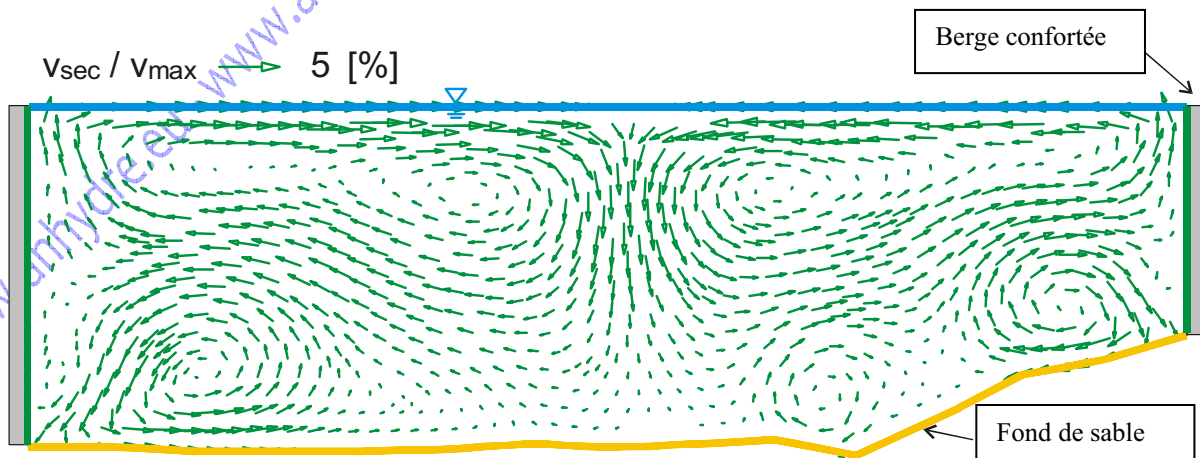


Figure 11 - Au moyen du modèle **SIMK®** distribution de vitesse axiale turbulente simulée par modèle sur la section transversale Mühlendammschiffdamme sur la voie d'eau Spree - Oder à Berlin (commande - BfG [12])



AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 - Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 - SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com

SIMK® - Calibration des stations de mesure sur rivières et canaux

Figure 12 – Au moyen de **SIMK®** - distribution de vitesse secondaire turbulente simulée par modèle sur la section transversale Mühlendamm sur la Spree – Oder à Berlin (commande BfG [12])

Des répétitions intentionnelles des simulations **SIMK®** des distributions de vitesse turbulente et des évaluations du facteur **k** pour des niveaux variés de manière systématique **h** produisent le profil nécessaire et les fonctions de calibrations en fonction du niveau **kl(h)** sur la section transversale et la configuration de capteurs de vitesse investigués pour la plage totale des variations relevant du niveau d'eau définie en (5). Comme le facteur de calibration **kl** et l'aire de la section transversale **A** sont des fonctions dépendantes du niveau et du profil, ces facteurs peuvent être résumés à l'aire de section transversale réduite en fonction du niveau et du profil

$$A_{red}(h) = A(h) * kl(h) \quad (8)$$

Ainsi (3) peut être simplifié en

$$Q = A_{red}(h) * V_l \quad (9)$$

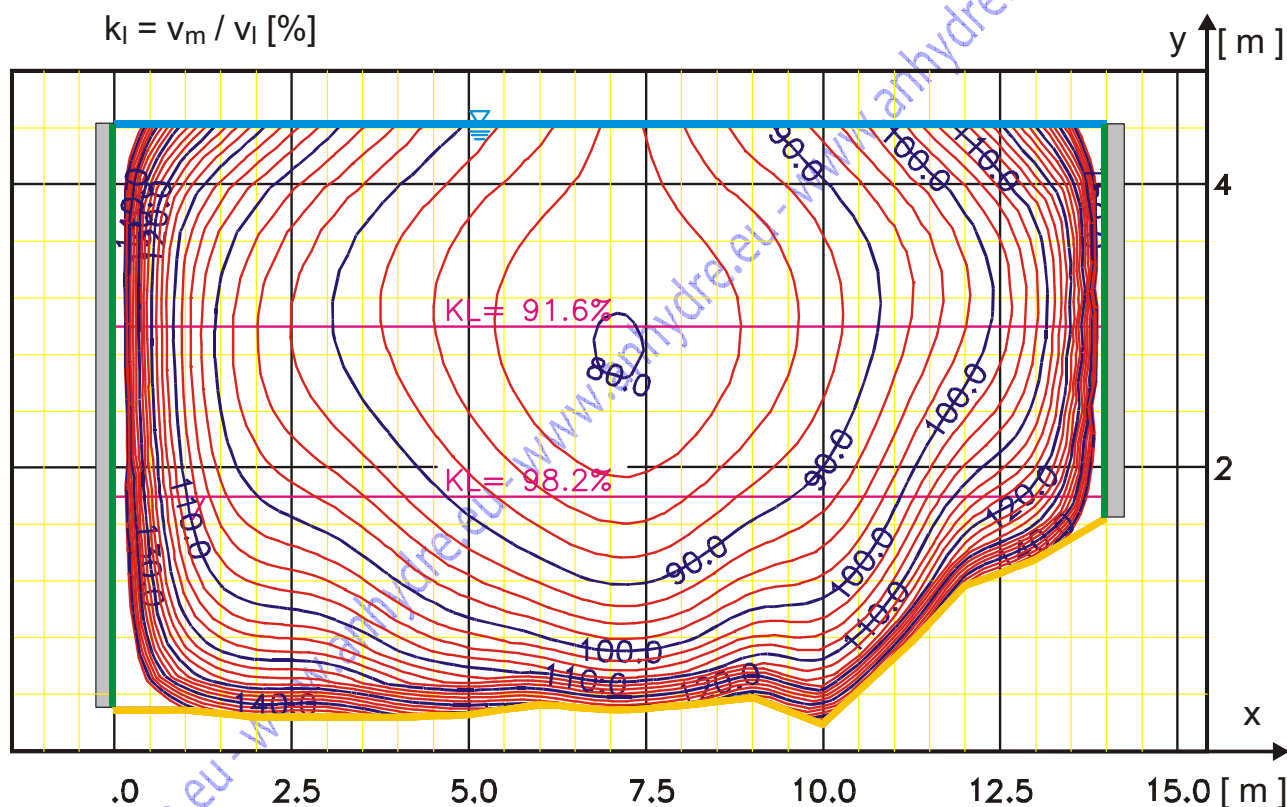


Figure 13 – Distribution simulée sur la section transversale des facteurs d'échelle **kl = Vm / Vl** pour le profil Mühlendamm avec évaluation additionnelle de la valeur **k** pour deux chemins acoustiques prédéfinis (commande BfG [12])

Formellement (9) correspond à la simple équation de continuité (1). Toutefois, par contraste avec l'aire de la section transversale géométrique **A(h)**, l'équation réduite de section transversale réduite **Ared(h)** de l'équation (9) ne comprend pas seulement des informations géométriques, mais en accord avec l'équation (8) aussi des informations hydrauliques fonction du niveau et du profil, et produites au moyen de la méthode **SIMK®**. Sur la base des vitesses moyennées **Vm** dans la section, l'équation de section complète (1) comprend la même information hydraulique.

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com



SIMK® - Calibration des stations de mesure sur rivières et canaux

Toutefois, comme V_m ne peut pas être mesurée directement, (1) n'est pas adaptée aux évaluations de mesure en continu (en ligne) de vitesse locale. A l'opposé le second facteur de l'équation (9) correspond précisément aux vitesses locales V_l qui peuvent être mesurées au moyen de méthodes physiques alternatives, parce que la méthode de calibration SIMK® est appliquée pour transformer les informations hydrauliques complémentaires à partir du second facteur vers le premier facteur de l'équation (9).

Sur la base des mesures comparatives de débit pratiquées par le BfG, le chapitre 5.2.1 résume les raisons des influences prédominantes Sur le facteur de calibration sans dimension $kl = V_m / V_l$ de :

- La forme du profil
- Les niveaux d'eau h actuellement mesurés
- Les positions des mesures locales de vitesse $V_l(x, y)$

Tous ces paramètres purement géométriques sont exactement connus immédiatement après avoir terminé les mesures de niveau. En conséquence, SIMK® est une méthode universellement applicable, utilisant toutes ces informations géométriques exactement connues en vue de la génération appropriée d'informations hydrauliques précises sorties, produites sous la forme de facteurs de calibration $Kl = V_m / V_l$ fonctions du profil et du niveau (haut) d'eau.

Ces informations hydrauliques SIMK® sorties sont exclusivement considérées dans le premier facteur $Ared(h)$ fortement dépendant du niveau et du profil dans l'équation (9). Le grand avantage de ce concept SIMK® vient du fait que le second facteur de (9) devient une pure valeur de mesure de vitesse, qui peut être enregistrée en continu au moyen de différents types de capteurs de vitesse et qui devient totalement indépendante de toute information hydraulique additionnelle, pour toutes sortes de forme de profil, de niveau d'eau et de position de sonde.

En conséquence, sur la base de ce concept SIMK® universellement applicable il devient totalement suffisant de mesurer des vitesses locales $V_l(x, y)$ en continu et avec reproductibilité, sur toute position (x, y) choisie et exactement connue sur la section transversale, puis de simplement multiplier ces valeurs mesurées de vitesse locale $V_l(x, y)$ par les aires correspondantes $Ared(h)$ de section transversale réduite, fonctions du niveau et du profil.

De par la transformation SIMK® précise et fortement liée au niveau et au profil, des informations géométriques connues entrées en sorties d'informations hydrauliques correspondantes, résumées dans la fonction spécifique au site $Ared(h)$, la multiplication très simple de $Ared$ et de V_l produit des valeurs très précises de débit Q , même dans le cas de formes très complexes du profil, d'influences aval variables dans le temps et de niveaux (haut) d'eau significativement variables.

Cette procédure ne requiert qu'une détermination SIMK® de la fonction $Ared(h)$ fortement dépendante du niveau et du profil, et le stockage numérique du tableau de liaison correspondant $Ared - h$ dans le contrôleur de la station de jaugeage au fil de l'eau. Immédiatement après, des mesures en continu des débits peuvent prendre place et tirer avantage de cette seule calibration SIMK® en sélectionnant le facteur $Ared(h)$ en ligne dans le tableau $Ared - h$ mémorisé, ceci en fonction de la valeur actuelle mesurée du niveau h . Le facteur $Ared(h)$ correspondant à la mesure actuelle de niveau h est extrait du tableau $Ared - h$ et multiplié par la vitesse locale mesurée $V_l(x, y)$. En accord avec l'équation (9), le résultat de cette multiplication facile et rapide, est le débit Q recherché qui peut être ainsi être produit en ligne, sur la plage totale des variations de niveau (5) y compris les eaux extrêmement hautes, avec des hautes précisions et sans plus de post traitement.

En conséquence une unique calibration SIMK® d'une station de mesure au fil de l'eau permet des déterminations précises et en continu des débits actuels, pouvant être utilisées pour rapporter les crues, prédire les crues, alerter en cas de crue et pour tous autres types de contrôle des débits.

Les évaluations des débits qui sont directement basées sur l'équation de continuité (1) requièrent des interprétations permanentes des valeurs de mesure de vitesse locale ($V_l \Rightarrow V_m$). Ces interprétations permanentes sont généralement très coûteuses et exigeantes en temps. En conséquence les évaluations de débit basées sur l'équation de continuité (1) sont inappropriées pour rapporter rapidement en ligne des débits, la prévision des crues, l'alerte aux crues, pour le contrôle optimal de crue des réservoirs limités et pour de nombreux autres contrôles de débit.

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com

SIMK® - Calibration des stations de mesure sur rivières et canaux

A l'opposé, comparer les équations (1) et (9) révèle que **SIMK®** est une méthode remplaçant avec efficacité les interprétations requises de façon permanente, donc exigeantes en temps, des mesures de vitesse locale ($V_l \Rightarrow V_m$) par une transformation systématique, et en conséquence requise une seule fois, des informations géométriques connues avec précision en des informations hydrauliques correspondantes et spécifiques au site ($A \Rightarrow A_{red}$). En conséquence, **SIMK®** ne demande qu'un coût d'investissement unique et aucun coût opérationnel. Au contraire, **SIMK®** permet de réduire significativement les dépenses opérationnelles déjà existantes. En conséquence, les avantages d'une calibration **SIMK®** peuvent être utilisés de manière permanente, sans dépenses opérationnelles, par la seule mise à jour du tableau **Ared - h** mémorisé en numérique dans le contrôleur de la station de jaugeage.

La calibration expliquée pour la station au fil de l'eau de Mühlendamm – Berlin (cf figure 10 à 13), a été répétée comme décrite et pour des variations systématiques du niveau, les résultats de calibration ont été utilisés pour les mesures en continu par vidéo des débits sur la voie d'eau Oder – Spree. Plus encore, dans un essai de mesure sur quatre mois, la surface de la voie d'eau Oder – Spree a été filmée en continu par une caméra vidéo montée en latéral sur le canal large d'environ 14 mètres. Sur la base de ces films vidéo les vitesses en surface V_l sur le canal ont été déterminées sans contact et en continu dans une petite fenêtre exactement définie au moyen d'un logiciel de traitement numérique d'image. Sous la houlette du BfG, les facteurs d'échelle sans dimension fonction du niveau $kl = V_m / V_l$, les aires réduites correspondant à la fenêtre vidéo sur la surface du canal ont été déterminées sur la base de la figure 13 et de l'équation (8) au moyen de la calibration **SIMK®**. Sur la base de ces mesures vidéo des vitesses de surface V_l et des aires réduites correspondantes **Ared(h)** dépendantes du niveau, les débits recherchés **Qsimk** ont été déterminés en accord avec (9). Cette station de débit par vidéo au fil de l'eau a été suivie par le BfG sur 16 semaines.

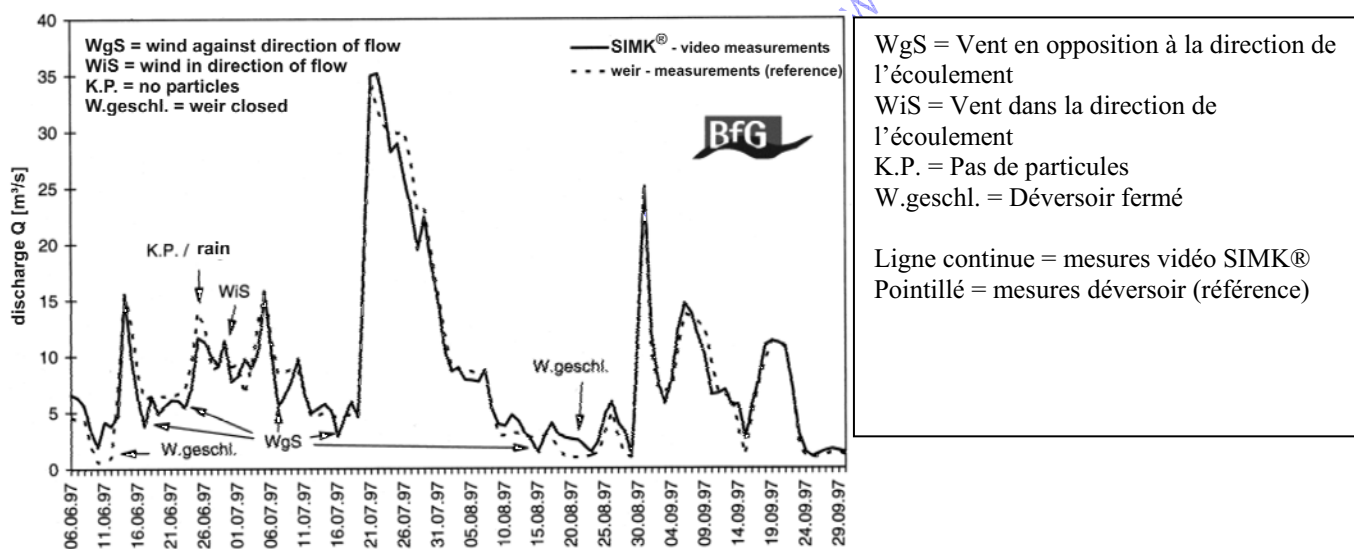


Figure 14 – Comparaison de **SIMK®** - mesure de débit par vidéo avec mesures simultanées sur déversoir de la station au fil de l'eau Mühlendamm sur la voie d'eau Oder – Spree de Berlin (commande – BfG [12])

La figure 14 montre les comparaisons des mesures par vidéo de débit **SIMK® Qsimk** avec les débits sur le déversoir **Qweir**, calculés par le BfG à partir des valeurs de niveau mesurées en simultanément à l'amont d'un déversoir large de 14 mètres, situé à environ 200 mètres en aval de la caméra vidéo. Sur la totalité de la période de mesure les deux graphes sont en bonne correspondance, particulièrement aux faibles débits. [13] contient des explications détaillées et des jugements sur ces mesures **SIMK®** par vidéo du débit.

Il a été remarqué que l'aire moyenne de la section baignée sur la voie d'eau Spree – Oder est d'environ $A = 55m^2$. En conséquence pour des débits $< 5m^3/s$ on trouve des vitesses moyennes de seulement $V_m < 0,1m/s$. Comme attendu, les vitesses de surface correspondantes étaient perturbées sur les périodes venteuses (cf figure 14). Une intention importante de ces études de terrain sur quatre mois par le BfG était d'investiguer et de documenter les limites pratiques d'application des mesures par vidéo créées par le vent, la pluie et autres influences perturbatrices.

AnHydre, Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com

SIMK® - Calibration des stations de mesure sur rivières et canaux

La figure 14 révèle que les mesures de débit par vidéo ne sont quasiment plus influencées par le vent si les vitesses de surface sont supérieures à $V_I = 0,25$ m/s. En conséquence, dans le cas de vitesses de surface $V_I > 0,25$ m/s les calibrations **SIMK®** en fonction du niveau peuvent généralement être appliquées pour mesurer les débits des rivières et canaux, en continu et avec une haute précision, basées sur des mesures de vitesse en surface, sans contact par radar ou vidéo. Avec des vitesses de surface inférieures et en présence de vent, ces influences doivent être prises en considération. En cas de vitesses de surface $V_I < 0,25$ m/s, des procédures alternatives de mesure de vitesse doivent être préférées.

5 – 3 - Bureau Allemand des ressources en eau (WWA) Weilheim

Dans le cas de la station au fil de l'eau par radar Rissbachdüker installée sur le torrent Rissbach, montrée en figure 15, les influences dues au vent sur la vitesse superficielle peuvent être exclues du fait des vitesses de surface d'environ 1,3 m/s attendues même en cas de débit moyen. La station de débit au fil de l'eau par radar de Rissbachdüker est localisée très poche de la frontière Autriche - Allemagne. A 5 km en amont du réservoir de stockage des hautes eaux Sylvensteinsee, le torrent Rissbach se jette dans la rivière Isar. Le torrent Rissbach draine environ 182 km² de la chaîne de montagnes alpines Karwendelgebirge. En conséquence, le Rissbach est un torrent pentu caractérisé par de très larges fluctuations de niveau et de débit. La station de mesure au fil de l'eau Rissbachdüker, montrée en figure 15, n'est large que de 20 mètres et se trouve limitée par des parois rocheuses très pentues. Dans la section transversale du torrent, montrée en figure 15, la crue Whitsun de 1999 a provoqué des débits d'environ $Q_{max} = 345$ m³/s [1] qui ont totalement détruit l'installation du câble transbordeur précédant celle vue sur la section illustrée en figure 15.

Sous la houlette du bureau allemand des ressources en eau (WWA) Weilheim, le système de mesure de vitesse de surface par radar, bien reconnaissable en figure 15, a été calibré au moyen du modèle **SIMK®** sur la totalité des niveaux pratiquement applicables (5), y compris les plus hautes eaux supérieures aux niveaux maximum produits durant la crue Whitsun de 1999. Cette calibration **SIMK®** fonction du niveau sur la station de débit Rissbachdüker, est exclusivement basée sur la photo numérique montrée en figure 15 et sur une reconnaissance géométrique précise de la section transversale sur laquelle sont mesurées les vitesses de surface V_I au moyen du radar montré en figure 15. Sur la base d'expériences à long terme et de la photo numérique les rugosités du fond et des parois ont été estimées sur le torrent Rissbach.



Figure 15 – **SIMK®** - station de débit au fil de l'eau Rissbachdüker / Rissbach (commande WWA Weilheim)

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com

SIMK® - Calibration des stations de mesure sur rivières et canaux

Sur la base de la calibration **SIMK®** fonction du niveau (haut) sur la station de débit Rissbachdüker, les positions de mesure ont été optimisées sur la section transversale ($x = xp$, $y = yp$) en vue de la prise des vitesses de surface $Vl(x, y)$ par le radar de vitesse sans contact. Ensuite ont été déterminées les équations de calibration fonction du niveau $k(h) = Vm / Vl$ et $Ared(h) = A(h) * k(h)$ définies par les équations (2) et (8) en vue de la position et de l'ajustement optimisées du capteur, sur la base des simulations **SIMK®**.

Le capteur de vitesse radar montré en figure 15 a été positionné et ajusté en accord avec les positions optimisées **SIMK®** ($x = xp$, $y = yp$) pour la mesure locale de vitesse en surface. Enfin, la fonction de calibration fonction du niveau **Ared(h)** correspondant à cette installation optimisée de la sonde, a été stockée en numérique dans le contrôleur du système radar. En accord avec l'équation (9) cette configuration du système radar permet des déterminations continues en ligne du débit actuel **Q** dans le Rissbach sans aucun post-traitement, avec un accès à distance, un stockage numérique et une transmission au moyen d'un modem GSM ou de tout autre système alternatif de transmission des données.

Les débits **SIMK®** déterminés de cette manière ont été vérifiés par le WWA Weilheim durant leur comparaison avec des mesures indépendante du débit de référence **Qref** principalement par traçage. Le WWA Weilheim a documenté ces examens en [3] et enfin évalué ces vérifications de mesure **SIMK®** par radar sans contact sur le torrent Rissbach montré en figure 15 comme suit : « sur la base d'une seule section transversale de la rivière, la méthode **SIMK®** produit des valeurs de débit **Qsimk** quasi identiques en comparaison avec les données de référence fonction du niveau **Qref(h)** déterminées sur de nombreuses années avec de grandes dépenses. »

5 – 4 – Bureau des ressources en eau (WWA) Passau

Les débits **Qsimk** basés sur **SIMK®** de la station au fil de l'eau par radar sur Schrottenbaumühle /Ilz décrite au chapitre 1, ont également été vérifiés avec des mesures indépendantes comme référence par le Bureau allemand des ressources en eau WWA Passau. Comme plusieurs niveaux **hr** et vitesses en surface **Vr** de l'Ilz sont mesurés en continu et sans contact sur intervalle de trois minutes au moyen du système radar montré en figure 2, plusieurs crues de l'Ilz ont pu être enregistrées en numérique quelques semaines après l'installation de ce point de mesure.

La figure 16 montre exemplairement une crue de durée 12 heures (environ HQ1) qui s'est produite durant la nuit entre le 07/10/2003 et le 08/10/2003 dans cette section de l'Ilz montrée en figure 1 et qui a été enregistrée sans défaut au moyen du système radar – **SIMK®**. Durant cette crue de l'Ilz, le niveau s'est élevé d'environ **Dhr** = 0,8m et la vitesse en surface s'est élevée de 250% depuis **Vr** = 0,97m/s jusqu'à 2,47 m/s. Dans les 18 heures enregistrées au moyen du système radar – **SIMK®** les débits se sont multipliés par 10, de **Qsimk** = 3,4 m³/s jusqu'à **Qsimk** = 33,2m³/s. Comme attendu, le front de crue est plus raide que la décrue. Dans la soirée du 07/10/2003 le débit est en augmentation continue jusqu'à 25% en seulement 30 minutes, il est enregistré durant cette crue relativement faible de l'Ilz. Cette période de temps est quasiment aussi longue qu'une mesure de débit par profil au moyen d'un saumon à hélice.

A environ 20 mètres en aval du pont sur l'Ilz montré en figure 2, se trouve la jauge de niveau Schrottenbaumühle où sont mesurés depuis de nombreuses années les niveaux de l'Ilz par le WWA Passau. De plus, entre 28/05/1986 et 12/08/12003 le WWA Passau a utilisé ce pont sur l'Ilz pour pratiquer des mesures de profil au saumon à hélice. Ceci correspond à une fréquence moyenne de mesure d'environ 3,2 par an et est typique pour d'autres stations au fil de l'eau comparables.

Les débits **Qwwa** sur l'Ilz ont été déterminés par évaluation des mesures au saumon et des niveaux **hwwa** enregistrés en simultané, ils sont résumés dans le tableau et le graphe en figure 17. En accord avec la figure 17 sur environ 7 années le WWA Passau a pu enregistrer des variations de niveau sur la plage 0,38m < **hwwa** < 1,23m et des variations de débit entre 1,23m³/s < **Qwwa** < 1,54m³/s au moyen de ces mesures au saumon à hélice. De plus, le 28/01/2002 le WWA Passau a pu documenter avec succès une crue substantiellement plus forte sur l'Ilz, caractérisée par un niveau **hwwa** = 2,25m et un débit **Qwwa** = 99,6m³/s.

Pour permettre des comparaisons directes des mesures **SIMK® Qsimk** de débit par radar avec les débits au saumon à hélice **Qwwa** fournis par le WWA Passau, les débits radar **Qsimk** mesurés entre 11/04/2003 et 24/06/2003 ont été tracés comme une fonction des niveaux **hwwa** mesurés en simultané par le WWA Passau.

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com

WWA Passau
Radar - Streamflow Gauging Station Schrottenbaumühle / Ilz



ISAR CONSULT
 Ingenieurbüro für Wasserwirtschaft GmbH
 www.isar-consult.de

measuring period: from 10/07/2003 until 10/09/2003

Schrottenbaumühle	measuring value	min	mean	max	Σ [T.m ³]
0205	discharge Q_{SIMK} [m ³ /s]	3.41	14.17	33.17	2448
0011	velocity v_R [m/s]	0.973	1.656	2.471	
0010	stage h_R [m]	0.61	0.96	1.42	

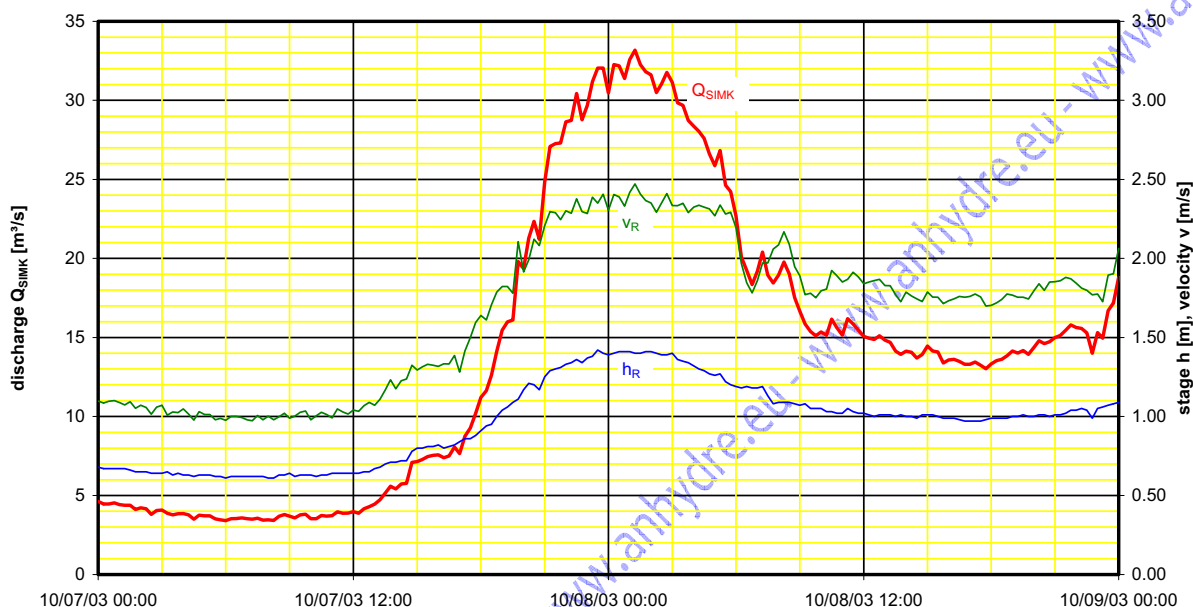


Figure 16 – Enregistrement détaillé et sans défaut de la crue sur la station de débit au fil de l'eau de Schrottenbaumühle / Ilz au moyen du système **SIMK®** - radar montré en figures 1 et 2 (commande : WWA Passau)

Sur la base de ces mesures **SIMK® Qsimk** par radar, pratiquées en continu sur un intervalle choisi de $Dt = 3min$ correspondant à une fréquence de 175 000 mesures **SIMK®** - radar par an, 36 000 paires de mesures **Qsimk / hsimk** ont été générées sur onze semaines et montrées en complément en figure 17.

Les mesures de débit au saumon à hélice **Qwwa** et les mesures **SIMK® Qsimk** par radar montrent une bonne correspondance sur la plage disponible des variations de niveau $0,38m < hwwa < 1,23m$ documentée au moyen des mesures au saumon. Les mesures au saumon et les mesures **SIMK®** - radar montrent de faibles variations pour des niveaux identiques **hwwa**, résultant des débits faiblement variables **Qsimk** et **Qwwa**. Ces petites variations des valeurs individuelles de mesure correspondent au caractère fortement turbulent de la rivière naturelle Ilz (cf figure 1). Ceci est révélé par la courbe de tendance **Q(h)** qui a été calculée sur la base de toutes les paires de valeurs **Qsimk / hwwa** sur les onze semaines de mesure **SIMK®** – radar. Cette courbe de tendance correspond à la courbe hauteur – débit **Q – h** sur la station au fil de l'eau Schrottenbaumühle / Ilz. **Q(h)** est montrée en complément sous forme tabulaire et graphique en figure 17. Cette figure 17 révèle que les mesures **SIMK®** - radar du débit **Qsimk** sans maintenance sur onze semaines, permettent la génération d'une courbe **Q(h)** hauteur – débit pour la station Schrottenbaumühle / Ilz qui est quasiment identique à celle dérivée sur la base des 23 mesures de débit au saumon à hélice pratiquées par le WWA Passau sur ce même site durant environ sept ans.

En conséquence, la figure 17 révèle que la calibration unique **SIMK®** permet, même en segment de rivière naturelle comme l'Ilz montré en figure 1, des mesures continues en ligne, précises et reproductibles, disponibles immédiatement après en fin d'installation, sur la totalité de la plage pratique relevant des variations du niveau et du débit de la rivière sous investigation. Ces mesures de débit en continu sur base **SIMK®** ne requièrent aucune visite de site ni post-traitement expéditif des valeurs de mesure.

AnHydre, Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com

Ceci contraste avec les mesures de débit coûteuses et exigeantes en temps par saumon, les mesures de débit en continu et sans maintenance sur base **SIMK®** sont bien adaptées par exemple au reportage rapide des crues, à la prévision des crues, à l'alerte aux crues, pour optimiser le contrôle des crues dans les réservoirs limités et autres contrôles de débit, pour la fourniture rapide et économique de courbes complètes **Q(h)** hauteur – débit.

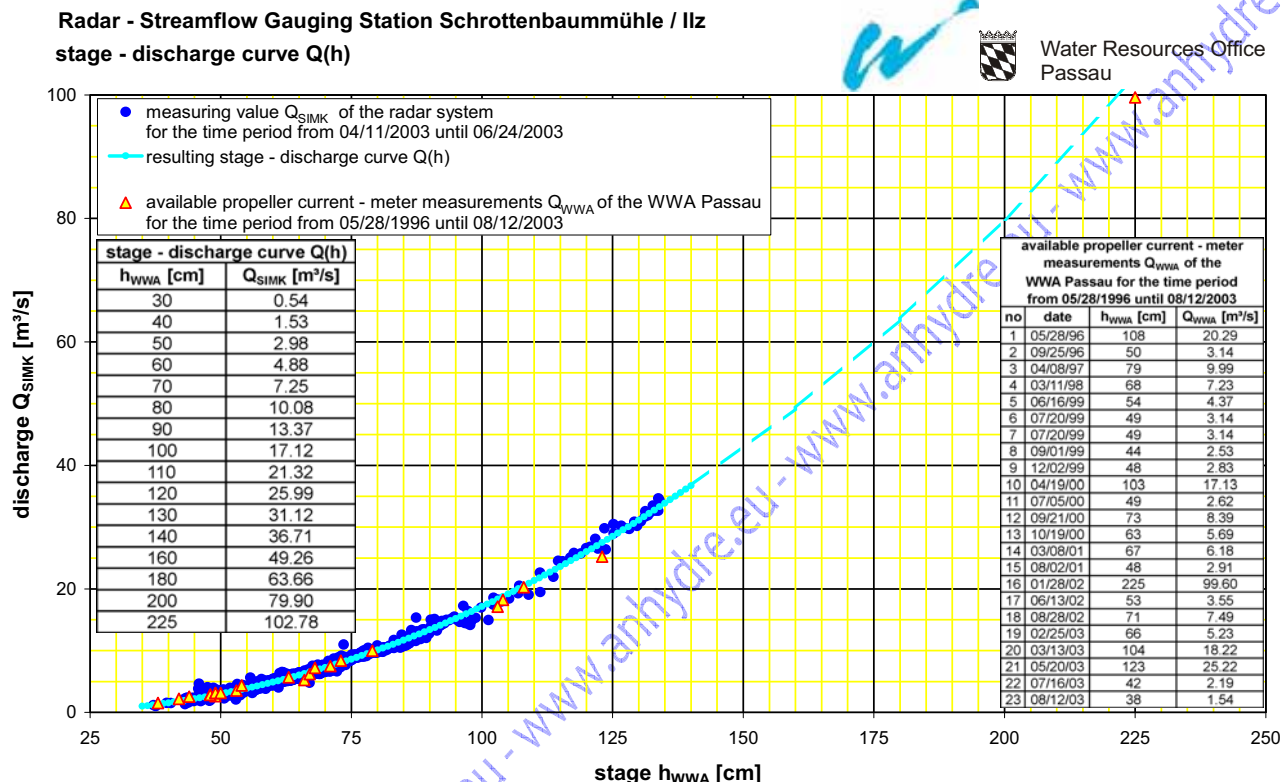


Figure 17 – Courbe hauteur – débit $Q - h$ de la station de Schrottenbaumühle / Ilz sur la base des mesures **SIMK®** - radar sur onze semaines sans maintenance et le post traitement des mesures historiques sur sept ans au saumon par le WWA Passau

Sur le site de mesure de débit Schrottenbaumühle / Ilz, les mesures de débit en continu sur base **SIMK®** ont été pratiquées totalement en automatique, sans contact et de plus sans maintenance. C'est seulement onze semaines après la fin d'installation qu'une courbe hauteur – débit $Q(h)$ a été générée, quasiment identique à la courbe $Q(h)$ dérivée pour ce même site à partir de toutes les mesures coûteuses et exigeantes en temps pratiquées au saumon par le WWA Passau sur plus de sept ans. Ceci confirme le jugement final sur la méthode de calibration **SIMK®** par le WWA Weilheim du chapitre 5-3.

En conséquence, les précisions possibles avec les mesures de débit **SIMK®** sont au moins comparables à celles des mesures au courantomètre dans les canaux (cf. chapitres 5.1 et 5.2.2) et dans les rivières naturelles (cf. chapitres 5.2.1 ; 5.3 ; 5.4 et 5.5). Toutefois, en opposition aux mesures au courantomètre, exigeantes en temps et donc coûteuses, en conséquence plus rares, les mesures de débit sur base **SIMK®** sont pratiquées en continu et ne requièrent pas de maintenance ni de post-traitement des valeurs de mesure. Par contraste aux mesures au courantomètre, les mesures **SIMK®** permettent des intervalles courts de mesure, de quelques minutes ou même de quelques secondes si besoin. Parce qu'à l'opposé aux mesures exigeantes en personnel faites au saumon, les mesures de débit **SIMK®** peuvent être pratiquées en continu et sans contact, elles se révèlent très bien adaptées pour les applications sans maintenance ni défaut comme le reportage de crue rapide et à haute fréquence, la prévision des crues, l'alerte aux crues et pour les enregistrements simultanés à haute résolution sur des événements de crue courts et rares sur tous les sites de mesure relevant d'un bassin versant. De plus, contrairement aux mesures de débit faites au saumon exigeantes en personnel, les mesures sur base **SIMK®** sont immédiatement disponibles et compatibles avec une mise en ligne.

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com

SIMK® - Calibration des stations de mesure sur rivières et canaux

Sur la base des précisions de mesure documentées en figure 17 et sur la base des avantages expliqués de la mesure de débit sur base SIMK®, le WWA Passau prévoit des opérations temporaires de systèmes de mesure mobiles SIMK®-radar. Ces systèmes mobiles par radar sont montés pour un moment sur les ponts existants afin de mesurer à court terme et haute résolution temporelle une crue complète affectant les graphes niveau et débit, et aussi pour déterminer les courbes correspondantes hauteur – débit de ces rivières en accord avec la figure 17, sur des durées courtes et à cout raisonnable, en grand détail et avec de hautes précisions.

5 – 5 Bureau Allemand des ressources en eau (WWA) Landshut

La photo numérique en figure 18 est prise sur le pont européen de Kelheim vers l'amont. Elle montre les conditions typiques en approche de la station Kelheim sur le Danube opérée par le bureau allemand des ressources en eau (WWA) Landshut. Sur cette position, le fleuve Danube se caractérise aux basses eaux par une faible profondeur $t = 1,1\text{m}$ et une largeur sous la surface d'environ $B = 105\text{m}$. Durant la crue Whitsun de 1999, une profondeur d'environ $7,7\text{m}$ a été mesurée sur ce site, soit $Dt = 6,6\text{m}$ au dessus des basses eaux. Durant la crue Whitsun, la largeur sous surface est passée à $B = 194\text{m}$ soit quasiment deux fois au dessus des basses eaux. Durant cette crue Whitsun de 1999, les rives bien reconnaissables en figure 18 ont été couvertes par plus de 2 mètres d'eau. Depuis le pont européen Kelheim sur le Danube, le WWA Landshut pratique régulièrement des mesures de débit au courantomètre à hélice. Comme l'aire baignée en fonction du niveau couvre plusieurs centaines de mètres carrés ce type d'opération requiert plusieurs mesures individuelles au saumon, coûteuses et exigeantes en temps, particulièrement durant les hautes eaux. De manière à pouvoir vérifier les précisions possibles et l'applicabilité de la méthode de calibration SIMK® et dans le but d'éviter ou de limiter fortement les dépenses régulières des coûteuses mesures au saumon, une calibration SIMK® sur la station de mesure Kelheim sur le Danube a été pratiquée sous la houlette du WWA Landshut.



Figure 18 – SIMK® - station de débit au fil de l'eau Kelheim / Danube (commande WWA Landshut)

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com

SIMK® - Calibration des stations de mesure sur rivières et canaux

Cette calibration **SIMK®** fonction du niveau révèle que dans la section transversale du Danube montrée en figure 18, indépendamment du niveau actuel **h**, les vitesses axiales maximum **V_{max}** se produisent toujours à l'intérieur d'une portion concentrique d'environ 20 mètres de cette section transversale, régulièrement stationnée proche de la surface de l'eau. Sur la base de ces résultats **SIMK®**, le WWA Landshut s'est vu recommander de ne pratiquer que trois mesures individuelles de vitesse **V_I** au saumon dans cette portion exactement définie d'environ 20m de largeur dans la section transversale, proche de la surface libre de la rivière. Pour tous les niveaux relatifs praticables **h**, le maximum de ces trois mesures de vitesse locale **max(V_I)** peut être vu comme une bonne approximation de la vitesse maximum **V_{max}** sur la totalité de la section transversale du Danube. Au moyen de la méthode de calibration **SIMK®**, les équations de la calibration fonction du niveau **k_{max}(h) = V_m / V_{max}** et **A_{red}(h) = A(h) * k_{max}(h)** définies en (2) et (8) ont été calculées pour ces vitesses maximum **V_{max}** dans le Danube. Enfin, (9) est appliquée pour déterminer les débits **Q_{simk}** du Danube sur la base des trois mesures individuelles de vitesse **V_I** prises au saumon avec une mesure additionnelle de niveau **h**.

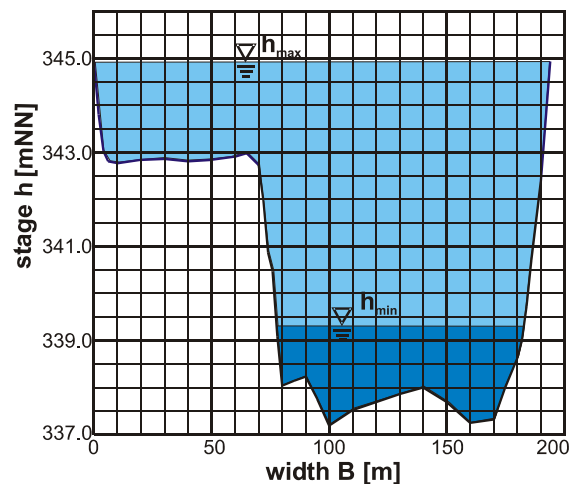
no	date	A [m²]	Q _{Profil} [m³/s]	Q _{SIMK} [m³/s]	ΔQ [%]
1	02/23/99	641.9	1392.9	1412.1	1.4
2	03/23/99	305.1	479.5	489.1	2.0
3	04/27/99	284.9	450.1	457.6	1.7
4	05/15/99	755.6	1646.6	1686.1	2.4
5	05/24/99	954.8	2048.7	2240.0	9.3*
6	06/16/99	353.5	573.9	560.6	-2.3
7	07/21/99	294.5	452.5	465.9	3.0
8	10/11/99	222.3	266.6	268.4	0.7
9	11/09/99	210.0	226.4	218.6	-3.4
10	01/20/00	238.5	314.1	320.1	1.9
11	04/13/00	289.0	452.5	450.8	-0.4
12	09/05/00	285.3	430.5	434.1	0.8
13	10/12/00	266.4	369.8	354.4	-4.2
14	11/23/00	235.4	282.7	256.6	-9.2
15	01/18/01	240.1	292.6	271.6	-7.2
16	03/06/01	366.1	659.8	652.2	-1.2
17	06/06/01	257.6	386.1	406.6	5.3
18	09/06/01	249.7	366.7	384.0	4.7
19	10/15/01	198.6	217.6	205.4	-5.6
20	11/13/01	213.6	254.8	244.8	-3.9
21	05/16/02	244.9	315.1	296.6	-5.9
22	07/25/02	208.5	242.6	242.5	0.0
23	08/14/02	785.2	1700.0	1691.9	-0.5
24	10/14/02	294.6	438.0	422.1	-3.6
25	12/17/02	268.6	354.5	345.9	-2.4
26	02/25/03	227.8	292.3	294.3	0.7
27	03/31/03	228.2	309.2	309.8	0.2
28	07/17/03	154.9	139.9	138.7	-0.9
				mean:	-0.6

* Rupture de digue durant la mesure de débit



**Water Resources Office
Landshut**

Danube (km 2412.7) streamflow - gauging station Kelheim



Avec :

A = Aire de la section baignée

Q_{Profil} = Mesures d'évaluation au saumon à hélice

Q_{simk} = Evaluation SIMK de V_{max}

ΔQ = (Q_{simk} - Q_{profil}) / Q_{profil}

Tableau 3 – Vérification de la calibration **SIMK®** en fonction du niveau de la station de débit Kelheim / Danube montrée en figure 18 et basée sur 128 mesures historiques de courant au saumon par le WWA Landshut.

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com

SIMK® - Calibration des stations de mesure sur rivières et canaux

Toutes les 28 mesures historiques du débit **Qprofil** disponibles au WWA Landshut, basées sur la mesure du courant par saumon et résumées dans le tableau 3, ont été évaluées ensuite avec cette procédure fortement simplifiée. Dans le tableau 3 **Qprofil** indique les résultats de débit déterminés sur la base des mesures au courantomètre à hélice par le WWA Landshut sur la totalité de cette section transversale du Danube, en accord avec les explications précédentes, en prenant en compte seulement trois mesures individuelles au courantomètre, pratiquées sur des positions hydrauliquement optimisées. La fonction de calibration correspondante **Ared(h)** produite au moyen de la méthode de calibration **SIMK®**. Les valeurs de $DQ = (Q_{simk} - Q_{profil}) / Q_{profil}$ produites dans la dernière colonne du tableau 3, indiquent les différences de débit en référence aux débits **Qprofil**. Les mesures de vitesse au saumon pratiquées pendant la submersion des rives du Danube (cf figure 18) sont marquées en gras dans le tableau 3.

En accord avec la différence moyenne $DQ = -0,6\%$ donnée dans le tableau 3, les mesures simplifiées de débit **Qsimk** sur base **SIMK®** produisent des résultats quasiment identiques sur la station Kelhiem du Danube aux mesures complètes **Qprofil** pratiquées au courantomètre à hélice, celles-ci sont substantiellement plus coûteuses et ne sont pas applicables aux mesures rapides en ligne. Une différence de débit de +/-10% n'est atteinte sur aucune des 28 mesures comparatives.

Les différences **DQ** résumées dans le tableau 3 ne montrent pas de tendance dépendante du niveau, même les facteurs de calibration **k(h)** correspondants sont sujets aux variations systématiques fonction du niveau. En particulier, on doit mettre en avant que les mesures de débit aux hautes eaux pratiquées durant la submersion des rives du Danube et indiquées en gras dans le tableau 3, sont caractérisées par de très faibles différences **DQ**, même si la large submersion des rives provoque des variations significatives et systématiques des facteurs d'échelle correspondants **k(h)** fonction du niveau.

En conséquence, les résultats de la vérification extensive, résumés par le tableau 3, révèlent que les calibrations **SIMK®** fonction du niveau et du profil, permettent des mesures précises des débits sur la plage totale des variations de niveau et de débit, y compris en particulier des situations d'extrêmes hautes eaux.

En conséquence, les résultats présentés de la calibration **SIMK®** peuvent être utilisés sur la station de débit Kelheim montrée en figure 18 afin de déterminer les débits actuels du fleuve Danube, avec de hautes précisions et sur la base de mesures fortement simplifiées du courant par saumon, ou autre type de mesure de vitesse sans contact donc sans entretien voire sans défaut comme par radar (cf. figure 2).

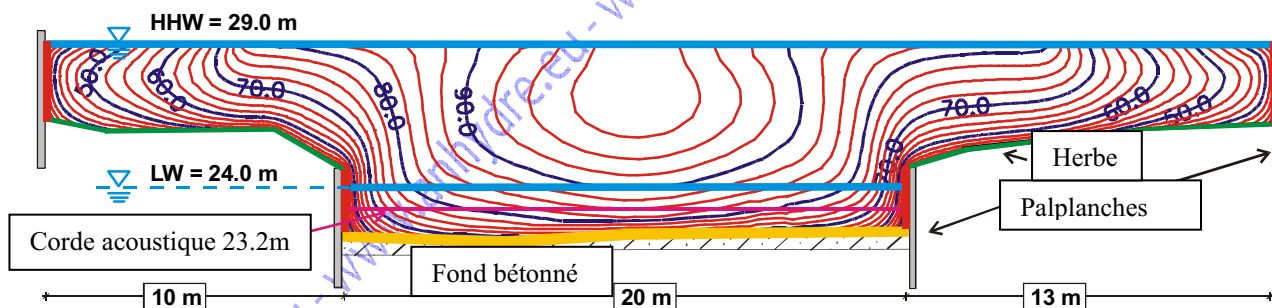


Figure 19 – Calibration **SIMK®** de la station de débit par ultrasons temps de transit Muka Keratan / Malaisie pour le niveau maximum d'eau HHW (cf. figure 3)

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com

6 – Applications pratiques additionnelles de la méthode de calibration SIMK®

Il existe d'autres stations de mesure au fil de l'eau avec des mesures comparatives indépendantes, qui montrent des résultats similaires aux inspections de terrain de la méthode de calibration SIMK® expliquées au chapitre 5. En conséquence, aucune inspection supplémentaire sur le terrain ne sera introduite dans ce qui vient, mais 6 exemples d'applications pratiques réalisées avec la méthode SIMK® vont être présentés, démontrant les possibilités d'autres applications typiques de la méthode SIMK®.

La figure 19 montre la distribution de vitesse turbulente sans dimension, simulée au moyen du modèle SIMK® sur la base d'une discrétisation en élément fini de la section Muka Keratan / Malaisie montrée en figure 3. La distribution de vitesse montrée par la figure 19 a été simulée pour la profondeur maximum d'écoulement $t = 7\text{m}$ qui provoque une submersion des deux rives sur environ 3m. Dans les zones de transition entre le canal principal et les deux rives, existent des aires transitionnelles fortement turbulentes, caractérisées par les gradients pentus de vitesse horizontale montrés en figure 19. Ces aires typiques de séparation des profils de rive (cf. figures 6, 18 et tableau 3) sont simulées au moyen du modèle SIMK® en discrétisations par éléments finis des sections transversales (cf. figure 3) sans plus d'entrée de données.

Sur la base de la distribution de vitesse montrée en figure 19 et d'autres simulations SIMK® de distributions analogues dépendantes du niveau, la fonction de calibration $k(h)$ fonction du niveau et du profil, a été déterminée pour la corde acoustique rajoutée sur la figure 19. Le tableau $k - h$ a été fourni en accord au chapitre 5 – 2 – 2 et stocké en numérique dans le contrôleur du système de mesure du débit par temps de transit des ultrasons sur Muka Keratan.

La figure 20 montre la station de mesure de débit de Helmarshausen sur la rivière Diemel, rivière typique en montagne basse. Dans cette station de mesure au fil de l'eau un système de mesure ultrasons temps de transit a été installé et calibré sous la houlette du Bureau d'état allemand pour l'environnement Kassel au moyen de simulations SIMK® en fonction du niveau.



Figure 20 – Station de mesure au fil de l'eau par SIMK® -ultrasons temps de transit Helmarshausen / Diemel Allemagne (commande : Bureau d'état pour l'environnement Kassel)

SIMK® - Calibration des stations de mesure sur rivières et canaux



Figure 21 – Station de mesure au fil de l'eau par **SIMK®** ultrasons temps de transit Bruckhäuser / Kollbach Allemagne (commande WWA Pfarrkirchen)

La figure 21 montre la station de mesure au fil de l'eau par ultrasons temps de transit à 2 cordes de Bruckhäuser, installée sur le ruisseau allemand Kollbach. Ce système ultrasons temps de transit de mesure de vitesse a été calibré au moyen de simulations **SIMK®** fonction du niveau pratiquées sous la houlette du Bureau allemand des ressources en eau (WWA) Pfarrkirchen. Sur la pente gauche du cours d'eau on reconnaît bien les deux transducteurs à ultrasons installés au dessus du niveau moyen de l'eau. Si les cordes acoustiques basses sont en immersion permanente, les cordes hautes ne sont activées que dans les rares cas de situations de hautes eaux.

Au moyen de ce système à ultrasons temps de transit, un débit de hautes eaux jusqu'à $Q_{max} = 49,7 \text{ m}^3/\text{s}$ a été enregistré le 28/01/2003 sur le ruisseau Kolbach, provoquant une élévation du niveau d'eau maximale, jusqu'à quelques décimètres sous le tablier du pont. Pendant ce temps, cette crue a provoqué une immersion significative des deux cordes acoustiques supérieures. Durant cette crue, le WWA Pfarrkirchen a pratiqué plusieurs mesures de débit au saumon à hélice qui étaient en proche correspondance avec les mesures de débit en continu **SIMK®** - ultrasons temps de transit.

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com



Figure 22 – Station de mesure par **SIMK®** ultrasons temps de transit de Marpent / Escaut France

La figure 22 montre aussi une station de mesure au fil de l'eau par ultrasons temps de transit calibrée au moyen de la méthode **SIMK®**. Ce site localisé sur Marpent, rivière Escaut, est une rivière typique du pays plat du nord de la France. La rivière Escaut est caractérisée par des très faibles pentes et vitesses.



Figure 23 – Station de mesure **SIMK®** - ultrasons temps de transit Gulfham / Alezkanal (commande : Alzwerke Burghausen)

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com

SIMK® - Calibration des stations de mesure sur rivières et canaux

La figure 23 montre le canal trapézoïdal Alzkanal de profondeur 4,5m opéré par la société hydro électrique allemande Alzwerke comme canal d'amenée de leur usine hydro électrique de Burghausen. Le fond et les pentes prononcées de ce large canal d'amenée d'environ $A = 50m^2$, sont en béton très lisse avec donc des pertes relativement réduites par friction, même dans ce canal de larges vitesses moyennes d'environ $V_m = 1,9m/s$ sont typiques. Le rendement hydraulique du canal d'amenée et en conséquence le rendement hydraulique total de la station hydro électrique complète, est fortement influencé par le développement saisonnier d'algues dans le canal d'amenée. Pour enregistrer l'influence significative du développement d'algues, une station de mesure au fil de l'eau ultra sons temps de transita été installée sur l'Alzkanal sous la houlette de l'Alzwerke Burghausen.

Grâce aux conditions d'approche absolument rectilignes et non perturbées de la station de mesure au fil de l'eau de Gulfham montrée en figure 23, l'installation d'un système de mesure à ultrasons temps de transit avec une seule corde et calibré au moyen de la méthode SIMK® fonction du niveau, était suffisante.



Figure 24 – Station de mesure SIMK® - H-ADCP de Mehring / Moselle – Allemagne (commande : Institut Fédéral d'hydrologie (BfG))

La figure 24 montre la station de mesure Mehring sur la rivière Moselle qui a été calibrée au moyen de la méthode SIMK® sous la houlette de l'Institut fédéral allemand de l'hydrologie (BfG). Les conditions en débit moyen sur ce site sont caractérisées par une largeur d'eau d'environ $B = 156m$, une profondeur maximale $t_{max} = 9,1m$ au milieu de la rivière et un débit moyen $MQ = 290m^3/s$. Dans le cas de hautes eaux 200 ans aux plus hauts niveaux ca 3,5m, des vitesses et débits substantiellement plus forts d'environ $HQ2000 = 4000m^3/s$ sont attendus dans cette section de la rivière Moselle.

Sur la station de mesure au fil de l'eau Mehring / Moselle montrée en figure 24, les niveaux h et les vitesses locales correspondantes V_l sont mesurés en continu et simultanément au moyen d'un système H-ADCP (profileur acoustique Doppler horizontal).

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com

SIMK® - Calibration des stations de mesure sur rivières et canaux

Les valeurs de mesure **h** et **VI** sont converties en ligne en valeurs correspondantes de débit **Q** sur la base d'un tableau spécifique au site fortement fonction du niveau **k – h** et qui a été déterminé sous la houlette du BfG au moyen d'une procédure de calibration **SIMK®** puis stocké en numérique dans le contrôleur du système H- ADCP.

Les systèmes de mesure de vitesse H-ADCP sont flexibles en regard de l'application car il est relativement facile de les monter au voisinage des berges, sur des piles de pont existantes ou autres structures comparables. Toutefois, les systèmes H-ADCP ne mesurent pas des vitesses locales **VI** au voisinage des positions de montage mais à des distances horizontales configurables de ces positions.

Les positions distantes de mesure (**x, y**) auxquelles le système H-ADCP mesure les vitesses locales **VI** sont exactement définies comme des petites cellules de mesure, au moyen du logiciel de l'H-ADCP. Ces positions spécifiques au site de ces cellules H-ADCP ont été optimisées avec la méthode **SIMK®**.

Les systèmes de mesure de vitesse H-ADCP permettent une stricte séparation spatiale des positions de montage du capteur et des positions configurables et déterminées avec précision de la mesure locale de vitesse. Le grand avantage de ce concept de stricte séparation est que l'installation des systèmes H-ADCP est typiquement relativement simple parce que fréquemment des structures existantes comme les berges des rivières et les piles de pont peuvent être utilisées pour réaliser des montages simples de capteur, même si ces structures ne sont pas typiquement localisées sur des positions hydrauliquement optimales pour la mesure de vitesse qui généralement n'existent pas à proximité mais se trouvent à distance des structures existantes.

7 – SIMK® - Entrée des données

Les calibrations **SIMK®** des stations au fil de l'eau requièrent simplement l'entrée de ces données :

- Relevé complet de la géométrie de section transversale dans laquelle les vitesses **VI** sont mesurées y compris les variations pratiques du niveau (5)
- Classification grossière de l'état des sédiments de la rivière ou des matériaux du canal, des berges, des rives (gravier, sable, champ, béton, palplanches)
- Cartes de présentation et photos numériques de la station au fil de l'eau prévue et des abords amont et aval.
- Plages de débits à évaluer ($h_{\text{mini}} < h < h_{\text{maxi}}$ et $Q_{\text{mini}} < Q < Q_{\text{maxi}}$)
- Si possible, informations estimatives ou exactes à propos des types et des positions (**x, y**) des mesures de vitesse locale

Dans le cas des mesures par radar, il faut noter que les vitesses en surface **VI** ne sont pas mesurées directement sous le radar mais en fonction de l'angle de montage typiquement de 40 – 60°, légèrement en amont ou en aval du radar. En conséquence dans ce cas la section transversale doit aussi être reconnue légèrement en amont ou en aval de la sonde radar. Autant que possible les coordonnées de la section transversale doivent être fournies en format numérique (ex. : fichier **x – y** en ASCII texte).

8 – SIMK® étendue

Pour des raisons hydrauliques présentes dans la section longitudinale d'une rivière ou d'un canal, les positions doivent être sélectionnées en vue de l'installation des stations de débit au fil de l'eau, caractérisées par de petites variations dans la distribution de vitesse turbulente dans la direction d'écoulement (cf. chapitre 3). En ces positions préférées pour mesurer le débit, des conditions d'approche stables et uniformes peuvent être attendues.

Toutefois, particulièrement dans les grands fleuves, ces positions idéales de mesure ne sont pas toujours réalisables. Malgré tout, des mesures précises des débits aux hautes eaux sont quelques fois requises même dans des segments de rivière ou de canal dans lesquels une distribution de vitesse varie fortement dans la direction d'écoulement.

Il existe en conséquence une version **SIMK® étendue**, produisant des calibrations précises et fiables des stations de débit au fil de l'eau localisées sur des segments de rivière et canaux exposés à des variations significatives de distribution de vitesse dans la direction de l'écoulement. La méthode **SIMK® étendue** permet aussi de produire des calibrations en fonction du niveau comprenant les situations des plus fortes eaux.

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com



SIMK® - Calibration des stations de mesure sur rivières et canaux

SIMK® étendue ne prend pas en compte seulement la géométrie de la section de mesure mais aussi celles la géométrie des zones d'abord en amont et aval. En conséquence **SIMK® étendue** permet l'optimisation des positions (x, y) des mesures de la vitesse locale et la détermination précise des équations de calibration correspondantes $k(h)$ et **Ared(h)** fonctions du niveau, définies en (2) et (8), même si les élévations du fond, les directions horizontales d'écoulement ou les sections transversales de la rivière ou du canal changent significativement dans la direction de l'écoulement.

De plus, **SIMK® étendue** prend également en compte des séparations fortement turbulentes d'écoulement et des zones de reverse d'écoulement qui peuvent être provoquées par exemple par des coudes prononcés du lit, le confluent avec des affluents ou autres entrées, sorties et/ou toutes sortes d'obstacles qui influencent le régime local d'écoulement de la rivière. En conséquence, la condition d'approche du site de mesure comme étant approximativement parallèle aux berges de la rivière n'a pas besoin d'être présumée dans le cas des mesures de débit **SIMK® étendue**.

A côté de ceci, des inclinaisons significatives en profondeur, perpendiculaires à la direction de l'écoulement, sont particulièrement importantes dans le cas des fortes vitesses et donc particulièrement dans le cas de rares hautes eaux sont prises en considération en complément avec de hautes précisions et en grand détail au moyen de la méthode de calibration **SIMK® étendue**. Les inclinaisons de profondeur perpendiculaires à la direction d'écoulement peuvent être très importantes car elles peuvent influencer de manière significative l'équation de calibration **Ared(h)** fonction du niveau définie en (8), et parce qu'elles doivent être considérées par la détermination optimale des positions hydrauliquement les meilleures en vue des mesures locales de niveau h et par l'évaluation précise de ces mesures de niveau.

Si nécessaire, **SIMK® étendue** prend en compte les influences des structures artificielles comme les déversoirs existants, les structures de prise et de rejet d'eau des usines hydro électriques et les prélèvements de refroidissement, les chutes, les rampes au fond, les murs de protection, les brises lames, les canaux souterrains, les piles de pont dont dépendent les équations de calibration $k(h)$ et **Ared(h)** définies en (2) et (8).

Dans les sections suivantes sont présentées trois applications réalisées avec **SIMK®** qui révèlent exemplairement que l'effort de calibration **SIMK® étendue** permet des mesures de débit fiables et précises même dans le cas des situations des eaux extrêmement hautes et même en cas de conditions d'approche vers la section de mesure extrêmement perturbées. Ainsi, les calibrations **SIMK® étendue** offrent des possibilités significativement élargies d'application de mesure en continu des débits.

8 – 1 – Station de débit au fil de l'eau par ultrasons temps de transit barrage d'Araizeki – rivière Seta / Japon

Une application pratique typique de la méthode de calibration **SIMK®** a été produite pour les positions des transducteurs à ultrasons et des cordes acoustiques correspondantes montrées schématiquement en figure 25. Cette vue schématique représente une station par ultrasons temps de transit installée sur la rivière japonaise Seta. Sur la section transversale montrée et située à approximativement 80km au Nord Est d'Ozaka, la rivière Seta couvre un bassin versant de capture d'environ 3900 km² comprenant le lac Biwa qui est le plus grand lac terrestre japonais, couvrant une surface $A = 674\text{km}^2$.

Pour des raisons opérationnelles, le système de mesure par ultrasons a du être installé sur la rivière Seta immédiatement en amont du déversoir Arazeiki comprenant dix couloirs déversoirs séparés qui peuvent être régulés indépendamment les uns des autres et sont utilisés comme contrôle du niveau de la mer sur la grande zone de rétention du grand lac Biwa et comme protection anti crue de la région d'Ozaka.

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com



Figure 25 – **SIMK®** - Station de débit au fil de l'eau par ultrasons temps de transit, localisée directement en amont du déversoir Araizeki de largeur 130 mètres sur la rivière Seta au Japon.

A l'évidence, la position choisie pour le site de mesure n'est hydrauliquement optimale sous aucun aspect. Pour quelques conformités réglementaires du déversoir d'Araizeki, des conditions d'écoulement en approche fortement dissymétriques étaient attendues au voisinage du système de mesure par ultrasons.

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com

SIMK® - Calibration des stations de mesure sur rivières et canaux

De plus, en accord avec la figure 25, le site de mesure sélectionné est localisé directement en aval d'un coude en S sur la rivière et directement en aval d'une sortie de rejet d'usine hydro électrique marqué d'une flèche sur la figure 25.

Plus particulièrement dans le cas des conditions de faible à moyen débit, les conditions d'approche sont en plus influencées par la station hydro électrique localisée directement en aval de la station de débit sur la rive gauche de la rivière Seta. Sur la figure 25, la région amont de cette station hydro électrique est marquée d'une autre flèche. Les conditions d'écoulement en approche de cette station hydro électrique sont en plus perturbées par cinq jetées directement en amont d'une ancienne construction de déversoir utilisé de nos jours comme musée d'ingénierie hydraulique.

Malgré ces conditions d'approche du déversoir d'Araizeki, compliquées et fortement dépendantes des débits, des deux stations hydro électriques, le système de mesure par ultrasons temps de transit montré schématiquement en figure 25 a été calibré avec succès au moyen de la méthode **SIMK® étendue**.

8 – 2 – Station de débit au fil de l'eau par radar Vorderhornbach / Autriche

La figure 26 montre le pont de Vorderhornbach sur la Lech dans les Alpes du Tyrol en Autriche. Sur le côté amont de ce pont sont installés deux sondes radar produisant des mesures en continu du niveau et de la vitesse de la Lech. Sous la houlette de E.ON hydropower GmbH, cette station de débit au fil de l'eau par radar a été calibrée au moyen de la procédure **SIMK® étendue**.

La station de débit au fil de l'eau Vorderhornbach Lech par radar est localisée dans la vallée de la Lech tyrolienne à 36km en amont de l'entrée du lac Forggensee d'une surface d'eau petite en comparaison $A = 15\text{km}^2$. Le site de mesure Vorderhornbach / Lech est utilisé par E.ON hydropower GmbH pour le reportage de crue, la prévision de crue, l'alerte aux crues et pour le fonctionnement optimisé du réservoir du lac Forggensee, limité aux hautes eaux, afin de réduire les dangers liés à ces hautes eaux dans les grandes vallées en aval de la Lech et du Danube.

Sur la station de débit au fil de l'eau par radar montrée en figure 26, la rivière Lech tyrolienne comprend une zone de captage de 680km^2 avec de nombreuses hautes montagnes alpines, comme le Parseier Spitze autrichien au sommet de 3 036mNN. En conséquence, la Lech tyrolienne est une rivière sauvage très ramifiée, très exposée aux fortes hautes eaux qui sont souvent combinées avec un transport significatif de flottants (particulièrement du bois sauvage) et au charriage. La morphologie du lit de la Lech consiste de manière prédominante en gros gravier et peut donc être changée significativement par les crues. Les reconnaissances répétées sur la section transversale révèlent que les fortes eaux de la Lech seule peuvent provoquer des érosions intensives aussi fortes que $DS > 2\text{m}$. Sur Vorderhornbach, la pente du fond de la Lech est de 6 0/00 et provoque de fortes vitesses jusqu'à environ 1,5m/s en eaux moyennes, dépassant rapidement des valeurs de 4,5m/s en cas de crue. Durant les périodes de fort gel, on peut aussi d'attendre à un charriage de glace temporaire par la Lech.

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com



Figure 26 – **SIMK®** Station de débit au fil de l'eau par radar sur Vorderhornbach / Lech du Tyrol / Autriche (commande : E.ON HydroPower GmbH)

Du fait de ces conditions hydrauliques complexes aux interfaces, il a été extrêmement difficile de sélectionner une station de débit au fil de l'eau sur la section longitudinale de la rivière Lech. Pour obtenir des temps de prévision suffisants pour le fonctionnement optimal du réservoir de crue du lac Forggensee dans le cas des hautes eaux, le site de mesure de débit par radar devait être positionné suffisamment en amont du Forggensee. D'un autre côté, une grande partie du bassin versant de 1 432km² du réservoir Forggensee devait être prise en compte par la station radar au fil de l'eau. En conséquence, seule la section d'environ 22km de long de la Lech tyrolienne entre Vorderhornbach et Reutte a été prise en considération comme site potentiel pour la mesure. Comme les hautes eaux induisent de très hautes vitesses et une morphologie instable du lit, des mesures sans contact de niveau et de vitesse ont été requises par E.ON GmbH. En conséquence, les positions préférées d'installation du système radar étaient les ponts de la Lech déjà existants sur les 22km de la section sur la Lech tyrolienne entre Vorderhornbach et Reutte. Toutefois, sur cette section de la rivière il n'existe que six ponts sur la Lech dont cinq sur des sections caractérisées par une grande instabilité et une morphologie de lit partiellement fortement ramifiée.

En conséquence, le pont Vorderhornbach sur la Lech, montré en figure 25 a finalement été sélectionné comme meilleure position disponible pour la station de débit au fil de l'eau par radar. Ce pont est situé directement en amont d'un seuil de rocher qui traverse le lit de la rivière et qui en conséquence empêche fiablement l'érosion du fond. La figure 26 révèle que le pont Vorderhornbach sur la Lech, est localisé sur un coude droit de la Lech. En aval de ce pont, le coude concave de la Lech est fixé par des roches, l'amont du pont Vorderhornbach est fixé par de larges brises lames stables. Comme le lit de la Lech n'est pas ramifié aux abords du pont Vorderhornbach et que la Lech est caractérisée par une section transversale relativement étroite et stable, par une pente exceptionnellement large du fond, contrairement à la majorité des segments de rivières de la Lech tyrolienne, des dépôts ne sont pas attendus au voisinage de la position de mesure sélectionnée.

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com

SIMK® - Calibration des stations de mesure sur rivières et canaux

En conséquence, sur cette section de la Lech, la morphologie de la rivière est stable à long terme et donc la position de mesure sélectionnée permet des mesures de débit reproductibles et stables sur le long terme. Même si les grandes vitesses de surface attendues temporairement dans la plage $V_{max} > 5\text{m/s}$ avec les hautes eaux, sont souvent combinées avec un transport significatif de matériaux flottants (particulièrement du bois sauvage) et possiblement associé avec du charriage de glace durant les périodes de gel sévère, les mesures sans contact par radar (cf. figure 2) depuis le pont Vorderhornbach existant sur la Lech permettent des mesures sans entretien et quasi sans défaut du niveau et de la vitesse.

Toutefois, du fait des brises lames en amont au long du coude concave de la rivière Lech et surtout du fait des piles massives du pont, les conditions d'écoulement en approche du site de mesure Vorderhornbach sont fortement perturbées, particulièrement en situations de hautes eaux. De plus, du fait des hautes vitesses, du coude existant sur la rivière et des piles du pont, on ne peut pas s'attendre à des niveaux horizontaux sur la section transversale de mesure Vorderhornbach, particulièrement en situations de hautes eaux.

A la place, le coude significatif de la rivière induit des différences de niveau sur la section transversale jusqu'à $Dh = 0,5\text{m}$ entre les niveaux plus élevés au long du coude concave de la rivière et les niveaux diminués au long du coude convexe de la rivière, voire de plus fortes différences de niveau se produisant au voisinage des deux piles massives du pont ne peuvent être négligées si des mesures précises de débit sont recherchées sur cette station. Ces non linéarités dépendantes du niveau dans les distributions de vitesse turbulente et les non linéarités correspondantes des équations de calibration $k(h)$ et $Ared(h)$ fonction du niveau et définies en (2) et (8), ont été simulées avec précision et en grand détail, évaluées pour des positions optimisées des capteurs de niveau et de vitesse sur la station de débit par radar Vorderhornbach / Lech au moyen de la méthode **SIMK® étendue**. Cette méthode de calibration **SIMK® étendue** comprenait des évaluations des eaux extrêmes de la Lech jusqu'à $Q_{max} = 750\text{m}^3/\text{s}$.

8 – 3 – Station de débit par ultrasons sur le barrage d'estuaire Tonegawa (Japon)



Figure 27 – **SIMK®** Station de débit par ultrasons temps de transit localisée en amont du barrage estuaire Tonegawa, Japon

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com

SIMK® - Calibration des stations de mesure sur rivières et canaux

La figure 27 montre une photo aérienne du barrage d'estuaire d'environ 600m de largeur Tonegawa qui opère en fonction de la marée afin de minimiser les intrusions d'eau salée dans la partie basse de la rivière Tonegawa et d'éviter des dommages induits par les crues. Le barrage d'estuaire Tonegawa est localisé approximativement 80km à l'est du centre de Tokyo et 19,5km en amont de l'estuaire de la Tonegawa dans l'océan Pacifique. Avec un débit moyen $Q_m = 350m^3/s$ et un débit maximum en crue d'environ $Q_{max} = 16000m^3/s$, la Tonegawa est le plus grand fleuve japonais. En amont un système de mesure de débit par ultrasons multi cordes a été installé au moyen de la procédure **SIMK® étendue** pour différents niveaux et débits et pour des positions alternatives des dix portes du barrage d'estuaire Tonegawa.

9 – Avantages SIMK®

SIMK® transforme des informations géométriques existantes ou simplement disponibles en caractéristiques hydrauliques, décrivant les conditions de géométrie et de niveau fortement dépendantes du site de la station de mesure de débit au fil de l'eau. **SIMK®** produit ces caractéristiques hydrauliques spécifiques de niveau et de site, pas seulement pour les eaux moyennes mais aussi pour les hautes eaux. Les résultats **SIMK®** sont résumés en une fonction de calibration sans unité $k(h) V_m / V_l$, applicable simplement, en fonction du site et du niveau.

SIMK® est caractérisée par :

- Applicabilité universelle sur rivières et canaux de toute forme et toute taille
- Calibrations systématique en fonction du niveau y compris les niveaux extrêmes des hautes eaux
- Hautes précisions
- Possibilités de combinaison adaptable, indépendante du constructeur avec tout type de mesures de vitesse, ponctuelle (exemple : saumon, ultrasons Doppler, H-ADCP ou radar Doppler) ou moyennée en ligne (ex : ultrasons temps de transit).
- Indépendance du débit actuel (hautes eaux) et en conséquence :
- Débit indépendant rapidement disponible à tout moment

Les calibrations **SIMK®** fournissent des tableaux très simples $k(h)$ et $A_{red}(h)$

- Qui ne sont déterminées qu'une fois
- Qui sont stockées en numérique dans la station de débit au fil de l'eau

Immédiatement après, ces résultats **SIMK®** permettent des mesures précises du débit

- Même en cas d'influence aval
- Pour la plage complète des variations de niveau (hautes eaux comprises)

En conséquence **SIMK®** permet des réalisations rapides de stations adaptables de débit au fil de l'eau caractérisées par :

- Investissement unique à faible coût
- Pas de coûts récurrents en fonctionnement en continu
- Haute précision
- Fonctionnement sans maintenance
- Fonctionnement quasi sans défaut
- Possibilité de réaliser de très courts intervalles de mesure (dans la plage de quelques minutes ou même secondes)
- Disponibilité immédiate en numérique des valeurs de débit mesurées à tout moment
- Sans port traitement

En conséquence, **SIMK®** offre des avantages particuliers pour des solutions totalement automatisées, sans maintenance pour des tâches à court terme, rapides, précises comme :

- Capture synchrone et en continu, enregistrement des débits des hautes eaux de toutes les stations de mesure de débit sur un bassin
- Sortie en ligne et à distance des données actuelles (hautes eaux) de la mesure du débit
- Reportage des crues
- Prévision de crue

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com



SIMK® - Calibration des stations de mesure sur rivières et canaux

- Alerte de crue
- Pilotage optimal de crue sur réservoirs limités
- Fourniture rapide de courbes complètes niveau – débit Q(h)

Références:

[1] Bavarian Agency for Hydrology (LfW) :

Présentation Internet du service de prévision des crues, <http://www.hnd.bayern.de>

[2] Burggraf, R., Kölling, C :

SIMK – Durchflussmessungen in den Hauptsammlern des Münchner Kanaltzes, Nürnberger Wasserwirtschaftstag vom 27.06.2002 des ATV – DVWK – Landersverbandes Bayern, Nürnberg 2002.

[3] Hannweber, M. :

Erfahrungbericht des Sachgebietes Gewässerkunde zum SIMK – Durchflussmessverfahren, internal report of the German Water Resources Office (WWA) Wirtheim, Wielheim 2001.

[4] Kölling, C. :

Finite – Element Simulation des Gerschwindigkeitsverteilung in Kanälen und teilgefüllten Rohrleitungen. (Finite – Element – Simulation of the velocity distribution in canals and partly filled pipelines) , PhD – Thesis, accepted by the Hydraulic Institute of the Technical University of Munich, report Nr 60, Munich / Germany 1994.

[5] Kölling, C., Petroff, A.M. :

New Finite Element Model accurately predicts velocity profiles.
Proc. Of the 67th Water Environemnt Federation Conference, pp.327–338. Chicago 1994.

[6] Kölling, C., Valentin F. :

SIMK – Abflussmessungen. Wasserwirtschaft 58 (1995, Nr 10).

[7] Kölling, C. :

Kalibrierung von Abflussmessstellen mit Hilfe des SIMK – Verfahrens, Workshop Ultrashall – Durchflussmessungen des Bundesanstalt für Gewässerkunde, Berlin 1996.

[8] Kölling, C. :

Praxiserfahrungen über SIMK – Durchflussmessungen in Flüssen and kanälen.
International Wasserbau – Symposium Planung und Realisierung in Wasserbau, Helf 82 des Lehrstuls f'r Wasserbayu und Wasserwirtschaft des TU München, S. 565 – 582, München 1998.

[9] Kölling, C. :

SIMK – Kalibrierung von Durchflussmesssanlagen, Helf 19 des ATV – DVWK – Schriftenreihe Durchflussmessung an Regenüberlaufbecken, Hennef, September 2000.

[10] * Kölling, C. :

SIMK® - Kalibrierung von Durchflussmessanstellen in Flüssen und Kanälen, International Seminar « New developments in flow measurements in natural and artificial flumes », Hydraulic – Institute of the Technical University of Munich, Munich / Germany march 2004.

[11] Nezu, I., Rodi, W. :

Experimental study on secondary currents in open channel flow. 21st IAHR Congress, proc . Vol. 2, pp. 114-119. Melbourne 1985.

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com



SIMK® - Calibration des stations de mesure sur rivières et canaux

[12] Siedschlag, S. :

Erfahrungen mit dem SIMK – Verfahren bei der Durchflussermittlung an Bundeswasserstrassen im Zusammenhang mit unterschiedlichen Methoden zur lokalen Fliessgeschwindigkeitsmessung, report 1099 of the German federal Institute of hydrology (BfG) Berlin 1997.

[13] Siedschlag, S. :

Durchflussmittlungen mit Hilfe digitaler Bildverarbeitung und SIMK – Kalibration. Wasserwirtschaft 88 (1998), Nr6.

[14] Strobl, T. Aufleger, M./

Überprüfung von SIMK – Durchflussmessungen an der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft in Oberrach vom 10.10.95, internal report of the Oberrach laboratory for hydraulic engineering and water – resources management of the Technical University of Munich (VAO), Oberrach 1995.

[15] Tominaga, A., Nezu, I., Ezaki, K. :

Experimental study on secondary currents in compound open – channel flow. Proc. of the 23rd IAHR Congress, Ottawa 1989, pp. A15-A22

AnHydre. Sarl au capital de 9000 Euros

11 Rue de l'égalité 08320 VIREUX MOLHAIN - France

Tel : +333 24 40 11 07 – Fax : +333 24 41 11 57

Vente France : 0811 60 08 08 – SAV France : 0825 66 30 40

SIRET 434 917 274 00012

APE 3320C

www.anhydre.eu

anhydre@anhydre.com