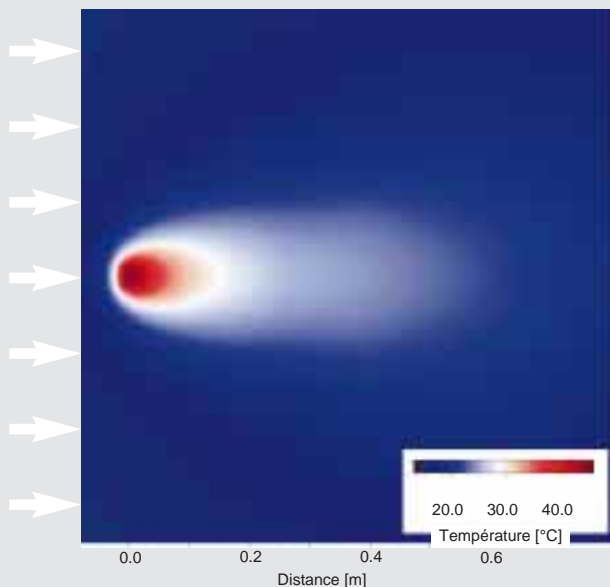


**Ouvrages hydrauliques** • Les endommagements graves et les ruptures des digues et des barrages sont essentiellement dus à l'érosion interne et la formation de chenaux internes. L'érosion est déterminée d'une part par les caractéristiques des matériaux et de la construction telles que la structure du dispositif filtrant, la distribution granulométrique et la géométrie des grains, d'autre part par les conditions hydrodynamiques propres à l'ouvrage. Alors que les indices caractéristiques des matériaux et de la construction sont bien connus, il n'existe généralement que peu d'informations réelles sur les conditions hydrodynamiques locales. D'un endroit à l'autre, les paramètres hydrodynamiques peuvent varier considérablement, en raison de défauts d'homogénéité dus à des vices de construction, à des déformations locales ou au champ des contraintes. La vitesse de Darcy représente le paramètre hydrodynamique critique pour le transport de matériau par l'eau par percolation. Les érosions internes s'amorcent généralement dans les zones où les vitesses de Darcy sont élevées.

Jusqu'à présent, la vitesse de Darcy critique, à partir de laquelle le transport de matériau débute, a été déterminée théoriquement à partir de la distribution granulométrique et du gradient hydraulique. En général, la distribution granulométrique et le gradient hydraulique sont spécifiés pour une



*Carte du champ de température après 12 h d'échauffement à proximité d'une source chauffante située à l'origine de la figure, calculée à partir d'un modèle numérique. La source chauffante représente une intensité de 150 W/m. Le matériau modélisé est défini par une porosité de 10 % et une conductivité de chaleur de 1,2 W/m/K. L'eau dont la température de départ est de 17,3 °C afflue de la gauche dans le domaine modélisé avec une vitesse de Darcy de  $10^{-5}$  m/s. La figure montre parfaitement qu'une partie importante de la chaleur induite est déportée par le flux de percolation.*

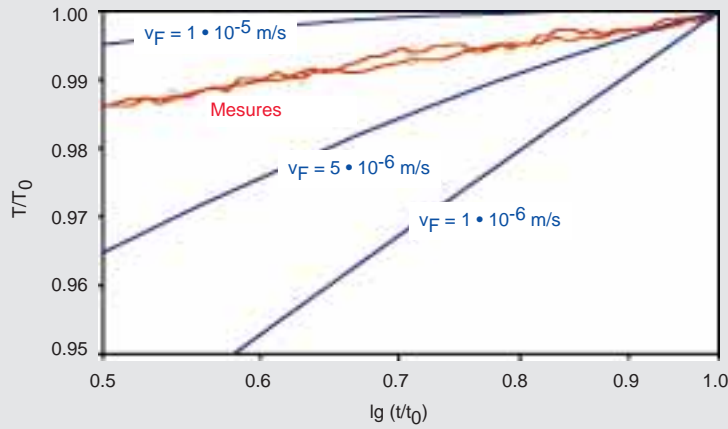
zone étendue, c'est-à-dire que les hétérogénéités locales ne sont pas considérées dans cette détermination de la vitesse de Darcy. L'utilité pratique des vitesses de Darcy déterminées théoriquement est donc limitée et souvent sujette à caution.

GTC a développé une méthode brevetée – Heat-Pulse-Method (HPM) – pour répondre aux questions concernant les vitesses de Darcy. À partir de la méthode HPM, on peut déterminer des vitesses de Darcy comprises entre  $10^{-7}$  m/s et  $10^{-3}$  m/s. Par conséquent, il devient possible pour la première fois de préciser le paramètre hydrodynamique le plus important – la vitesse de Darcy – in situ.

Une perturbation thermique est induite dans la digue à partir d'une sonde chauffante de forme cylindrique. L'évolution des températures, qui dépendent de la conductivité thermique locale et de la vitesse de Darcy, est observée pendant la phase d'échauffement. Les mouvements des eaux percolées génèrent toujours un transport advectif de la chaleur plus rapide que le transport conductif

de chaleur, même pour des vitesses aussi faibles que  $10^{-7}$  m/s ( $\sim 1$  cm/jour). La comparaison de la croissance des températures mesurées avec celles des températures calculées à partir de modèles numériques fournit une évaluation de la vitesse de Darcy, et donc de la vitesse du flux de percolation.

Pour l'installation de la source chauffante et afin d'effectuer les mesures de températures, des tubages creux – dans lesquels la source de chaleur et les capteurs de température sont introduits –



La figure montre la comparaison entre les courbes de l'évolution en fonction du temps des températures calculées à partir de modèles numériques (tracés bleus) et celles mesurées dans une digue à 10 m de profondeur (tracés rouges). L'échelle des températures est normée par la température finale  $T_0$  et celle du temps, est normée par la durée d'échauffement  $t_0$ . La température est présentée en fonction du logarithme du temps normé. Les résultats pour trois vitesses de Darcy  $v_F$  sont présentés sur la figure. Par comparaison avec les résultats numériques, le tracé des températures mesurées implique une vitesse de Darcy de  $8 \times 10^{-6}$  m/s.

sont enfoncés dans le sol de la digue. L'expérience montre que les tubages peuvent atteindre 30 m et plus de profondeur dans les digues en terre sans le moindre problème, selon la distribution granulométrique, la compacité et la structure de la digue.

Dans un premier temps, la température de la sonde chauffante s'accroît rapidement après la mise en marche de celle-ci.

La vitesse d'augmentation des températures décroît avec le temps pour tendre vers une température stable, le plus souvent en quelques heures. La valeur atteinte et la courbe de croissance des températures sont déterminées par l'efficacité des mécanismes de transfert de la chaleur. Si aucun mouvement de fluides aux alentours de la sonde chauffante n'existe, alors la température finale sera élevée et atteinte lentement. Par contre, plus l'écoulement des fluides qui circulent dans les alentours de la sonde est important, plus le transfert de chaleur sera efficace, c'est à dire que la température finale sera moins haute et sera atteinte plus rapidement. On peut observer un phénomène semblable lors de l'arrêt de la source chauffante. Le refroidissement est lent s'il n'y a pas de mouvement de fluides et on ne retrouvera la température initiale du sol qu'au bout d'une longue période. Des mouvements de fluides importants entraînent un retour visiblement plus rapide de la température mesurée vers la valeur initiale de la température du sol.

Les deux procédés d'investigation, par suivi de l'échauffement et par suivi du refroidissement, peuvent être modélisés numériquement pour différents paramètres des matériaux (capacité calorifique, conductivité thermique, porosité), pour différentes vitesses d'écoulement et pour différentes intensités de la source chauffante. Par comparaison dans le temps des tracés des températures mesurées avec les courbes calculées à partir de modèles numériques, il est possible de définir la vitesse de Darcy dans le voisinage de la sonde chauffante. La pénétration horizontale de la méthode HPM dépend de la durée d'échauffement, de l'intensité de la source chauffante et de la vitesse d'écoulement.



Installation d'un câble à fibres optiques chauffé

Ohratalsperre, en Thuringe