**Pôle Grenoblois Risques Naturels – 2005**

Programme de recherche 2005 financé par le Conseil Général de l'Isère

# « Détection des fuites dans les digues de l'Isère par mesures de températures »

Yves-Henri Faure – Cyril Guidoux
LIRIGM
Université Joseph Fourier de Grenoble.

## 1 Objectifs :

L'objectif de l'étude est la détection des zones de fuite d'eau dans les digues lors des crues par mesure de la variation spatio-temporelle de la température. Ces zones de fuite risquent de provoquer une érosion interne de la digue et d'entraîner la ruine de l'ouvrage par renard ou formation d'une brèche (Figure 1). Le projet consiste en la réalisation d'un site expérimental instrumenté implanté sur un tronçon de digue de l'Isère à Saint Martin d'Hères. Il doit permettre de valider des simulations numériques en cours tenant compte du couplage thermo – hydrodynamique des transferts dans un corps de digue, d'évaluer au mieux le comportement les digues de l'Isère dans leur environnement climatique, de mieux connaître les propriétés des matériaux constitutifs, de disposer d'une auscultation continue de ce tronçon de digue, et de tester la méthode d'interprétation lors des crues.

## 2 Contexte

Les digues de l'Isère (ainsi que celles de Camargue ou de Loire) sont des ouvrages anciens construits généralement avec les matériaux prélevés dans le lit de la rivière. Ce sont des matériaux hétérogènes, dont la mise en œuvre n'a pas toujours été effectuée en respectant les règles de l'art (granulométrie, compactage, etc.). Historiquement, elles ont aussi fait l'objet de confortements successifs (rehaussement, élargissement) avec des matériaux de granulométries contrastées (figure 2).

De ce fait, elles présentent de forts risques de circulations préférentielles comme cela a été observé dans la courbe de Grangeage lors de la crue de Mars 2001.

La détection des fuites dans les digues est réalisée à l'heure actuelle par inspection visuelle en période de crue. Une aide considérable pourrait être apportée par la mise en place d'un dispositif de détection opérationnel sur les grands linéaires que sont les digues (plusieurs kilomètres), de nuit comme de jour, permettant de localiser des zones de fuite et de suivre l'évolution des débits de fuite. Actuellement, aucun dispositif de ce type n'est encore disponible.

Le développement des fibres optiques capables de transporter un signal sur plusieurs kilomètres avec une bonne précision peut permettre de réaliser ce type de dispositif. Actuellement EDF teste 2,3 km de fibres optiques installées au pied de la digue du canal d'amenée à l'usine d'Oraison (Hautes Alpes). Un signal lumineux (laser) est envoyé à

l'intérieur de la fibre. L'amplitude et la fréquence du signal rétro diffusé par les défauts de la fibre permettent de déterminer la température avec une bonne précision. La résolution spatiale est de l'ordre du mètre.
La détection des circulations d'eau est réalisée suivant deux méthodes : la méthode passive et la méthode active.
La méthode passive consiste à mesurer uniquement la température du sol. Les fuites sont repérées du fait du contraste de température existant entre le terrain et l'eau.
La méthode active consiste à chauffer la fibre avec des câbles électriques. Les vitesses de circulation de l'eau sont évaluées par la cinétique des variations thermiques mesurées.
La méthode active est séduisante car elle permet de s'affranchir des périodes où les contrastes de température entre l'eau et le sol sont faibles. Mais elle nécessite des moyens électriques lourds (alimentation, maintenance, sécurité) pour chauffer la fibre (15W/m).
Dans le contexte des digues de protection contre les crues, le dispositif de détection doit être simple, fiable, et peu onéreux. Pour un ouvrage de protection contre les inondations, la digue est sèche et en équilibre thermique avant la crue: les venues d'eau en cas de fuite laisseront une signature thermique même en cas de faible contraste de température. C'est donc la méthode passive qui est privilégiée dans cette étude.

# 3 Complémentarité de ce projet avec le programme Hydrodetect

Le projet national Hydrodetect, soutenu par le Ministère de la Recherche (appel d'offre du RGC&U : Vulnérabilité des infrastructures vis-à-vis du changement climatique), a pour objectif la conception et le développement d'un dispositif de détection de fuite par mesure de température par fibres optiques en association avec un géotextile. Les partenaires du projet sont EDF, Cemagref Aix-en Provence, Tencate (Bidim Geosynthetics), Cetmef, Fos&S (développement de fibres optiques) et le Lirigm (UJF). Des expérimentations sur site sont envisagées dans le cadre du projet Hydrodetect conjointement avec le Lirigm, et doivent permettre la validation du dispositif de détection.

Le projet « Digues » soutenu par le Pôle Grenoblois Risques Naturels est une analyse des phénomènes thermiques induits par les circulations d'eau dans la berge et le corps de la digue en cas de très fortes crues. Elle sera une aide précieuse à la compréhension du comportement thermo-hydrodynamique des digues de l'Isère.

# 4 Utilité vis-à-vis de la gestion des risques naturels

L'utilité du projet est de contribuer au développement de techniques de détection par capteurs de température à fibre optique installés à l'aval de la digue ou dans le corps de digue, qui permettront de prévoir et de localiser des dysfonctionnements susceptibles de conduire à la rupture de l'ouvrage en période de crue.

# 5 Méthodologie

Des modélisations numériques couplant les transferts hydrauliques et thermiques ont été réalisées ces dernières années au LIRIGM à l'aide du logiciel FeFlow : elles montrent que des zones de circulations d'eau peuvent être détectées par contraste de température. Un modèle

physique de digue à l'échelle réduite (1/3 environ) a aussi été testé dans le canal du Lirigm. Les résultats sont prometteurs sur la validité de la méthode.

Le projet a consisté à instrumenter un tronçon de digue de l'Isère en rive gauche au niveau du Domaine Universitaire en bénéficiant de la logistique de la station de mesure hydrométrique du LTHE. Des piézomètres et des sondes de températures ont été mis en place dans la berge et le corps de la digue. Le suivi des températures et des niveaux piézométrique hors période de crue permettra de caler le modèle numérique et de tester la méthode d'évaluation du risque en période de crue.

En parallèle, initialement prévu sur les digues de l'Isère, un prototype pilote utilisant des fibres optiques (projet Hydrodetect) a été réalisé dans l'enceinte du Cemagref d'Aix-en Provence : ce site, sécurisé, a été retenu car présentant des facilités d'implantation, de connexions aux réseaux, électriques et internet, et à l'approvisionnement en eau à fort débit. Il permet de tester la faisabilité, la mise en œuvre, le suivi, l'interprétation, la validité de la modélisation sur digues « fuyardes » et d'évaluer le débit de fuite en fonction des singularités hydro-thermiques observées.

# 6 Partenaires de l'étude

***Organisme pilote :***
LIRIGM, Université Joseph Fourier de Grenoble.
Responsable scientifique : Yves-Henri Faure, Maître de Conférences
Personnes concernées : Cyril Guidoux, Doctorant, et André Baudoin, Maître de Conférences.

***Organismes associés :***
LTHE, Université Joseph Fourier de Grenoble et INPG (ENSHMG) : Jean-Paul Laurent, Directeur de Recherche CNRS, Responsable au LTHE de l'atelier Capteurs, Instrumentation, et Mesures pour l'Environnement (CIME)
AD IDR (Association Départementale Isère Drac Romanche) : Michel Pinhas, Directeur, organisme gestionnaire des digues de l'Isère.

# 7 Expérimentation sur un tronçon de digue de l'Isère

## *7.1 Description*

Le choix du site pour l'expérimentation sur digue réelle a été guidé par la présence de la station hydrométrique gérée par le LTHE sur la digue de l'Isère en rive gauche le long du campus à proximité de l'ENSHMG (voir plan de situation Figure 3, Photos 1 et 2, et coupe type Figure 4). Cette station, avec un bâtiment « en dur » est un site sécurisé, avec une alimentation électrique, une liaison téléphonique et un certain nombre de mesures hydrologiques concernant l'Isère (niveau, température, etc..).

A cet endroit, la digue a une hauteur de 3 m environ au-dessus de la berge.

Deux sections de digues, Pr10 et Pr20, situées respectivement à 10 m et 20 m en aval de la station ont été instrumentées avec des piézomètres et des thermistances. Un schéma de principe (Figure 5) présente le dispositif.

- Chaque section est équipée de deux piézomètres placés en crête de digue, en bordure de la piste cyclable goudronnée, un côté berge et un côté campus. Ils sont descendus jusqu'à 7 m de profondeur, crépinés sur 1.50 m à partir du fond , travaux réalisés par IMS-RN (38).
- A la base des piézomètres, un transmetteur de pression permet de collecter automatiquement la hauteur d'eau dans le piézomètre.
- Le long de chaque piézomètre sont fixées à distances régulières des thermistances (n°5 à 9 côté campus et n°10 à 14 côté berge, Figure 6) qui vont permettre de connaître la température dans le sol à différentes profondeurs.
- Des thermistances (n°1 à 4) sont placées sur le talus coté campus à 0.50 m de profondeur, et deux autres sont placées sur la berge (n°15 et 16), aussi à 0.50 m de profondeur.

Des tranchées équipées de regards en surface ont été réalisées par l'entreprise Perino-Bordone (38) pour connecter les thermistances et les transmetteurs de pression aux dispositifs d'alimentation et à la centrale d'acquisition installés dans la station. Les données sont collectées périodiquement par liaison modem depuis laboratoire.
Les données météorologiques sont fournies par la « Station de Test d'Instruments et de Capteurs" (STIC) du LTHE installée à proximité immédiate du campus sur le terrain du CSTB.
Les travaux, assemblage et câblage des capteurs, réalisation des tranchées et forages des piézomètres, ont commencé en janvier 2006. Les premiers tests des capteurs ont eu lieu début mars 2006 et les mesures n'ont effectivement commencé qu'à la fin mars 2006. De nombreux problèmes d'instrumentation ont été rencontrés et ont été résolus au fur et à mesure avec la collaboration du LTHE.

## *7.2 Résultats globaux*

Identification des sols :

Le corps de la digue est constitué de matériaux graveleux (sablo-limoneux) analogues à ceux observés dans la courbe de Grangeage (Figure 2) tandis que le sol de la berge est, jusqu'à la profondeur atteinte par les piézomètres, formées des sablons gris habituels dans la vallée du Grésivaudan.
Les panneaux électriques réalisés suivant des profils en long depuis la crête de la digue, côté berge et côté campus, confirment cette différentiation (Figure 7) :
- résistivité supérieure à 700 O.m jusqu'à 3,5 m de profondeur,
- faibles résistivités ensuite avec apparemment une nappe phréatique vers 6,00 m (<100 O.m).

*Ordres de grandeur de la résistivité des sols :*
*- 40 O.m : argile limoneuse*
*- 80 O.m : limon sableux*
*- 160 O.m : sable*
*- 320 O.m : tout-venant graveleux*
*- 640 O.m : graves*
<100 *O.m : nappe phréatique*

Niveaux piézomériques et niveau de l'Isère :

La Figure 8 montre l'évolution des mesures piézométriques au cours de la période de mesure de mars 2006 à novembre 2006 en relation avec le niveau de l'Isère. Compte tenu de la proximité de la digue, l'écart est faible avec en général un niveau de l'Isère légèrement plus

bas que les niveaux piézométriques, ce qui correspond à un écoulement de la nappe phréatique vers l'Isère sauf en période de crue (Figure 9).
Durant cette période, de mars 2006 à novembre 2006, on observe trois périodes de crues moyennement intenses :
31 mars à 17h00 : cote 381 cm
19 mai à 16h30 : cote 476 cm
30 août à 9h00 : cote 326 cm
La crue du 19 mai, la plus forte ne dépasse pas la berge (0.50 m en deçà) et n'atteint donc pas non plus le pied de la digue. C'est cette période que nous examinerons plus précisément au § 7.3.

Températures dans la digue et la berge :
Les températures mesurées de mars à novembre 2006 sont représentées pour les profils Pr10 et Pr20 (Figures 10 et 11). Pendant cette période on note un fort réchauffement global des températures du sol en surface, de 7°C au début mars jusqu'à 25-30°C fin juillet, tandis que les températures en profondeur, dans le sol sous la digue, évoluent peu (12 à 15°C).
D'une manière générale, pendant cette période printemps - été, la température du sol (comme celle de l'air en moyenne journalière) est supérieure à celle de l'eau de l'Isère.

## *7.3 Etude de la crue du 19 mai 2006.*

Lors de la crue du 19 mai 2006, le niveau de l'Isère est monté jusqu'à la cote 476 cm. Les niveaux piézométriques ont suivi le mouvement et pendant 3-4 jours, l'Isère a alimenté la nappe : les niveaux piézométriques étaient plus bas que celui de l'Isère du 16 au 20 mai.

Pendant la période du 13 au 23 mai, la température de l'Isère a oscillé entre 6 et 10 °C, tandis que l'air ambiant oscillait entre 12 et 32°C (Figure 12).

Examinons les températures mesurées dans le sol pendant cette période, en particulier les températures au fond des piézomètres, (X_9 et X_14), ceux juste au-dessus (X_8 et X_13) et ceux près de la berge (X_15 et X_16).[(1)]
Les figures 13 et 14 montrent les variations de ces températures corrélées avec les niveaux d'eau dans l'Isère et dans les piézomètres.

Les points X_15 et X_16, « voient nettement passer la crue » avec une forte chute de la température. Mais on notera toutefois que la baisse de température commence à se faire sentir alors que le niveau de l'Isère est encore inférieur à celui des thermistances : est-ce par capillarité que l'eau absorbée refroidit le sol ? En ces points la baisse de température se fait sentir 3 à 6h avant que l'eau n'atteigne la cote des thermistances. A la décrue, leur température augmente dès que le niveau de l'eau devient inférieur (influence de la température de l'air).

Les points X_9 et X_14, baignés par la nappe en permanence ne voient pas, ou très peu, évoluer leur température.
Les points X_8 et X_13, au dessus du niveau de la nappe avant la crue se réchauffent lentement suivant la tendance générale comme les points du sol en partie supérieure, mais leur

[(1)] Remarque sur la notation : X_9 et X_14 représentent les n° des thermistances des profils Pr 10 ou Pr20 suivant la valeur de X égale à 10 ou 20 respectivement.

température continue d'augmenter même quand ils sont atteints par les niveaux d'eau dans les piézomètres et même largement submergés : l'eau qui pénètre dans la berge depuis l'Isère se réchauffe dans le sol.

## *8* Conclusion

Ces premières mesures permettent d'avoir des éléments sur les modifications thermiques liées aux fluctuations du niveau de l'Isère, et plus particulièrement en période de crue. Une analyse plus approfondie doit être menée sur une plus longue période, supérieure à un an voir deux ans, afin d'affiner l'interprétation.
La modélisation de ces variations thermo-hydrodynamiques de ce tronçon de digue par la méthode des éléments finis est en cours. Elle doit permettre :
- d'une part de valider le modèle et de vérifier que les phénomènes observés sont bien reproduits par le modèle numérique,
- et d'autre part de caler les paramètres du modèle avec des valeurs représentatives de ce tronçon de digue dont la structure est analogue à celle de nombreux tronçons de digue de l'Isère.

Ultérieurement, lors du suivi d'un site à risque, les températures mesurées seront comparées aux valeurs fournies par le modèle numérique. Cette comparaison devrait permettre de détecter et de localiser des anomalies hydrauliques, si elles existent, en période de crue.

### Bibliographie :

PINHAS M., 2004 : Confortement de digues étroites et boisées : Le cas des digues de l'Isère, Colloque « Sécurité des digues fluviales et de navigation », Orléans, Novembre 2004, Editions Cemagref, pp 569-578.

FRY J.J., 2004 : Détection de fuite sur les digues par acquisition de profils de température le long d'une fibre optique, Colloque « Sécurité des digues fluviales et de navigation », Orléans, Novembre 2004, Editions Cemagref, pp 377-391.

IREX, 2004 : Compte rendu des journées IREX- European Working Group : Internal Erosion du 26 et 27 avril 2004.



a) Barrage de Teton (Idaho, 1976)




b) Barrage de Hell Hole (Californie, 1964)

Figure 1 : Ruptures de barrages initiées par érosion interne

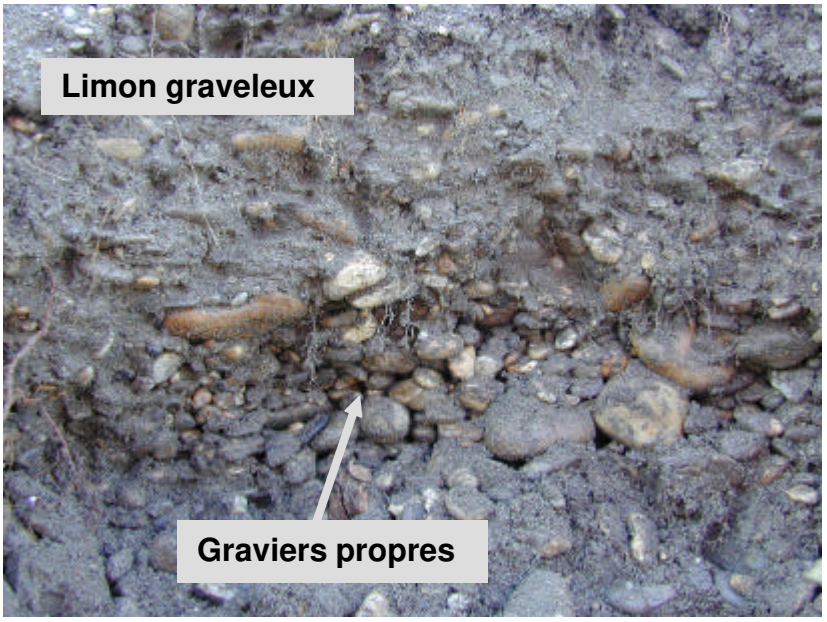



Figure 2 : Zone de graviers propres dans la digue de Grangeage (Isère) siège potentiel de fuite

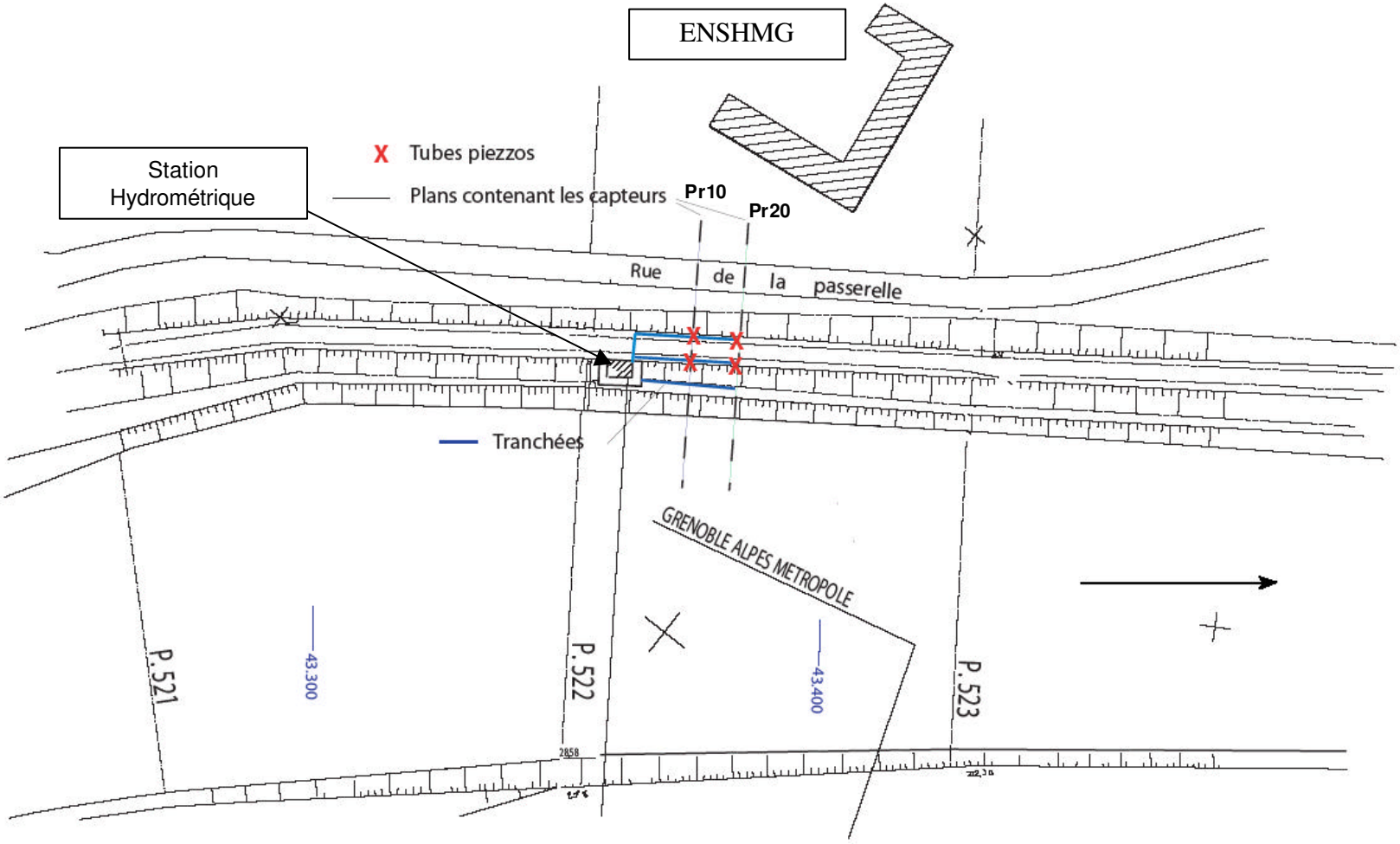



Figure 3 : Plan de situation des profils Pr10 et Pr20 instrumentés

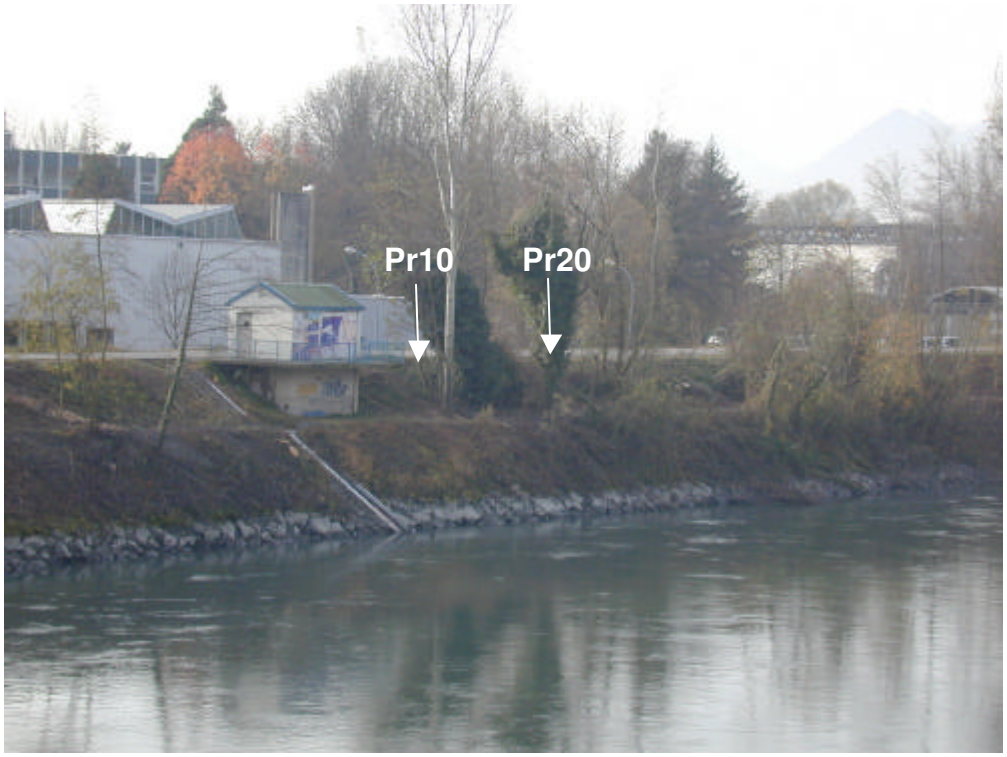



Photo 1 : Vue de la station depuis la rive droite




Photo 2 : Vue depuis l'aval, regards du profil Pr20, à 20 m de la station

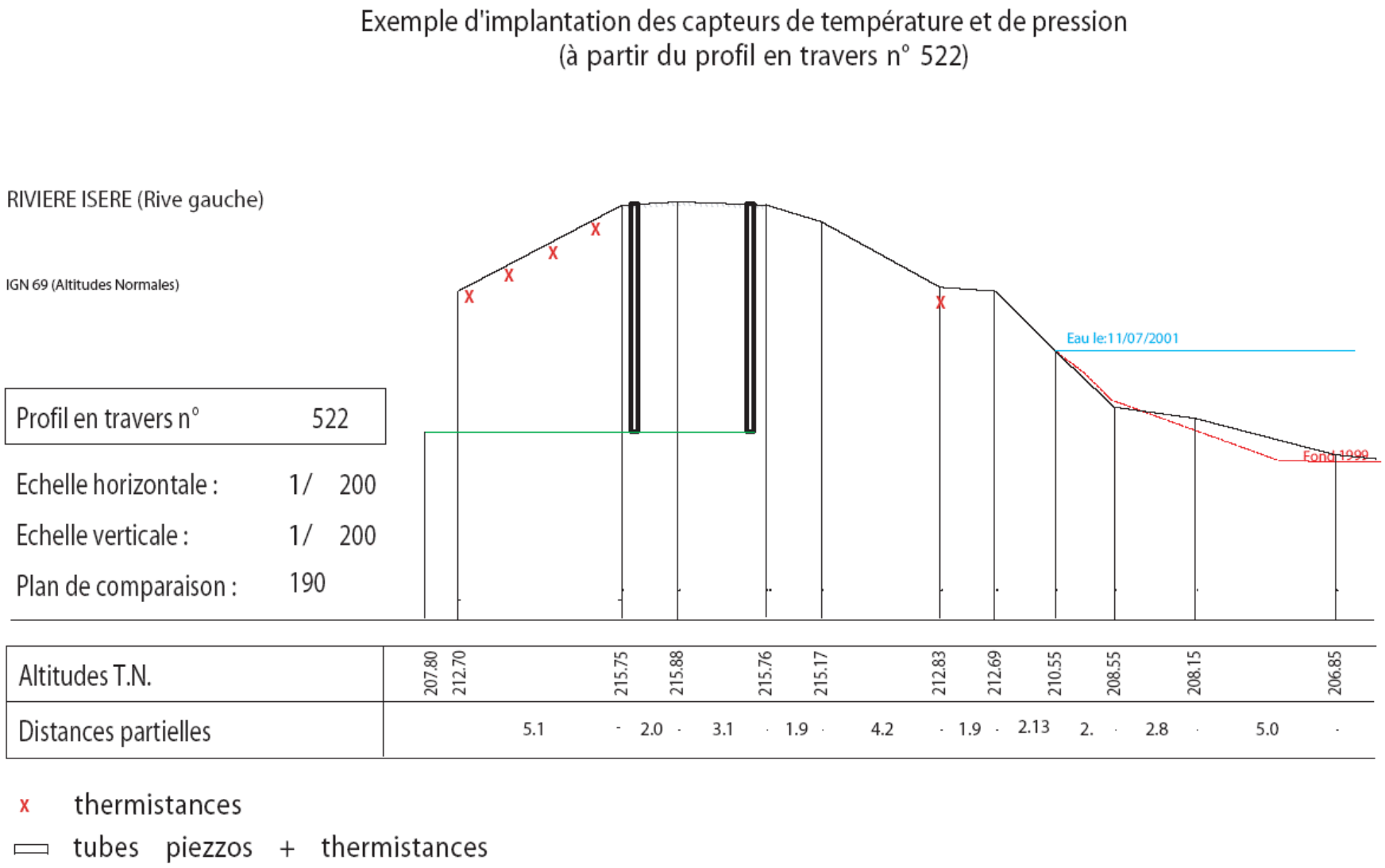



Figure 4 : Implantation des piézomètres dans la digue.

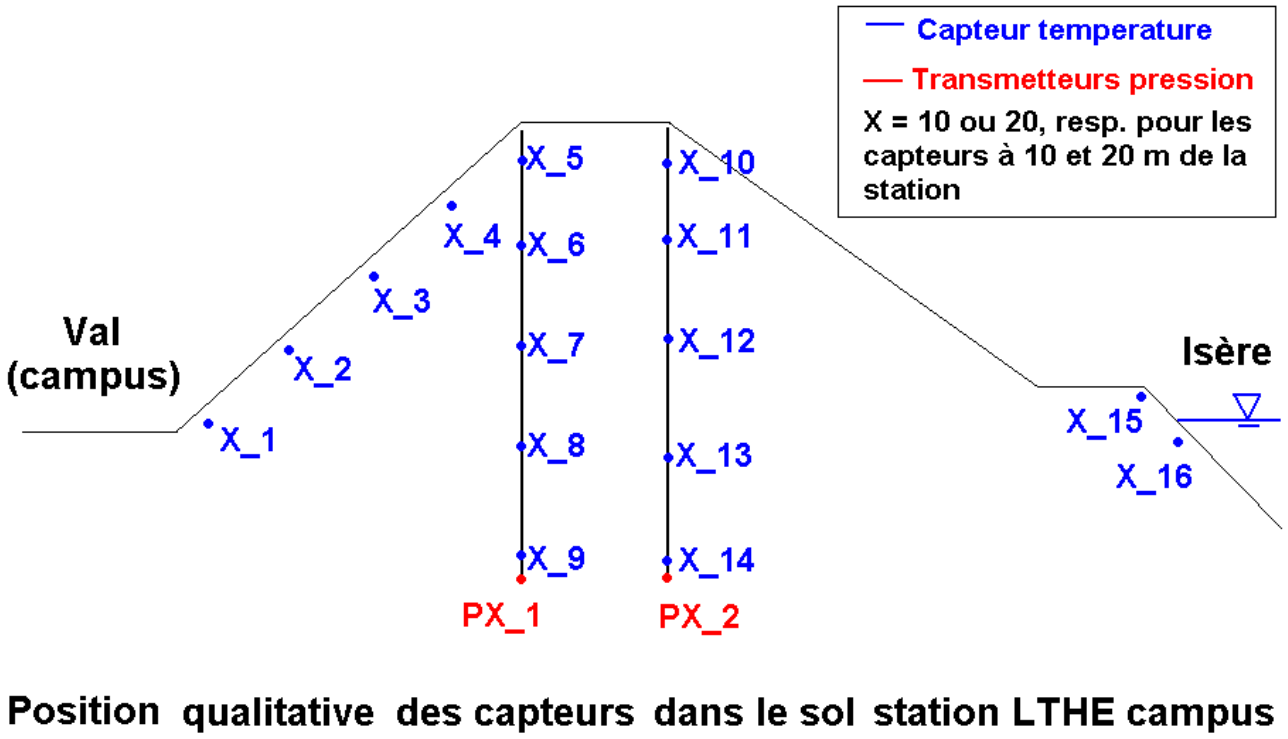
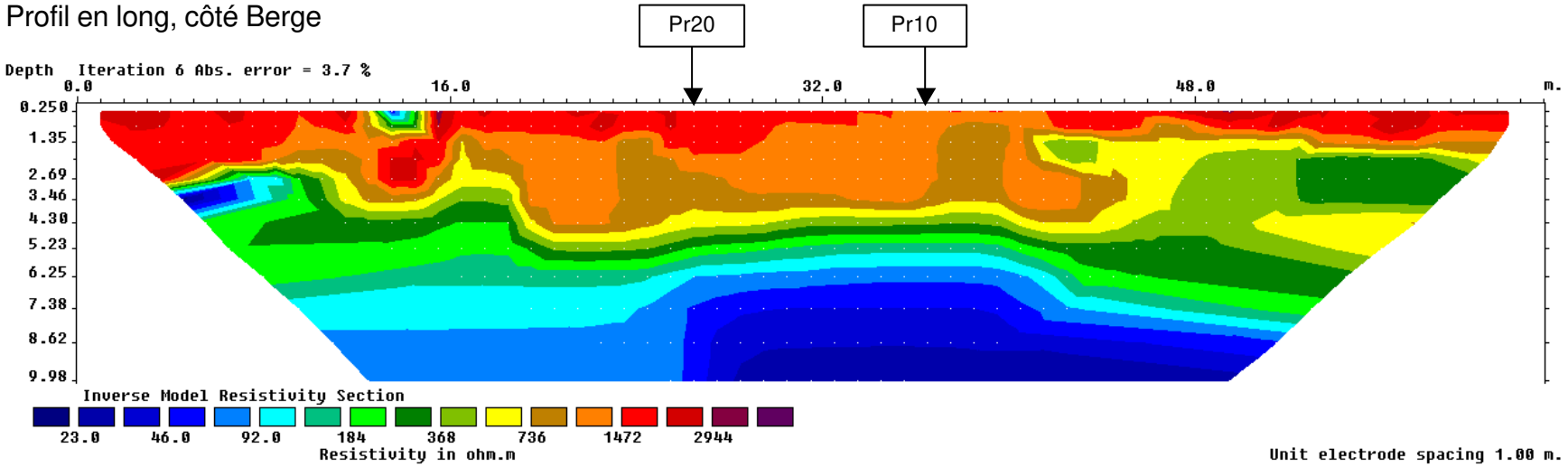



Figure 5 : Coupe type des profils Pr10 et Pr2



Figure 6 : Fixation des thermistances sur les piézomètres

Profil en long, côté Berge




Profil en long, côté Campus

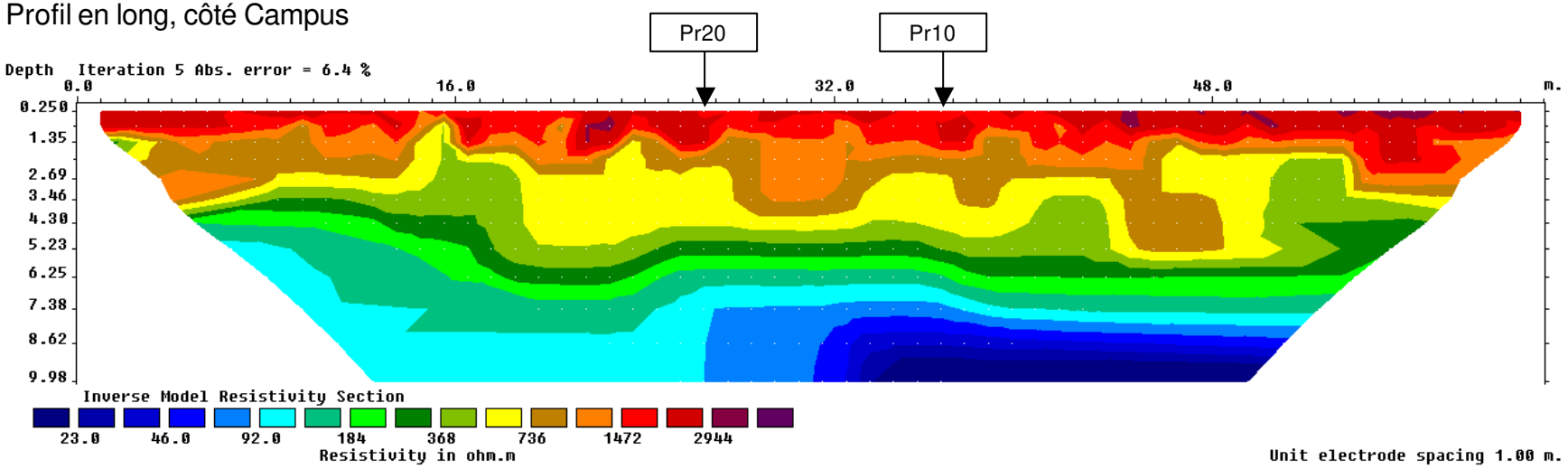



Figure 7 : Panneaux électriques réalisés sur la digue – Profil en long (Collaboration LGIT).

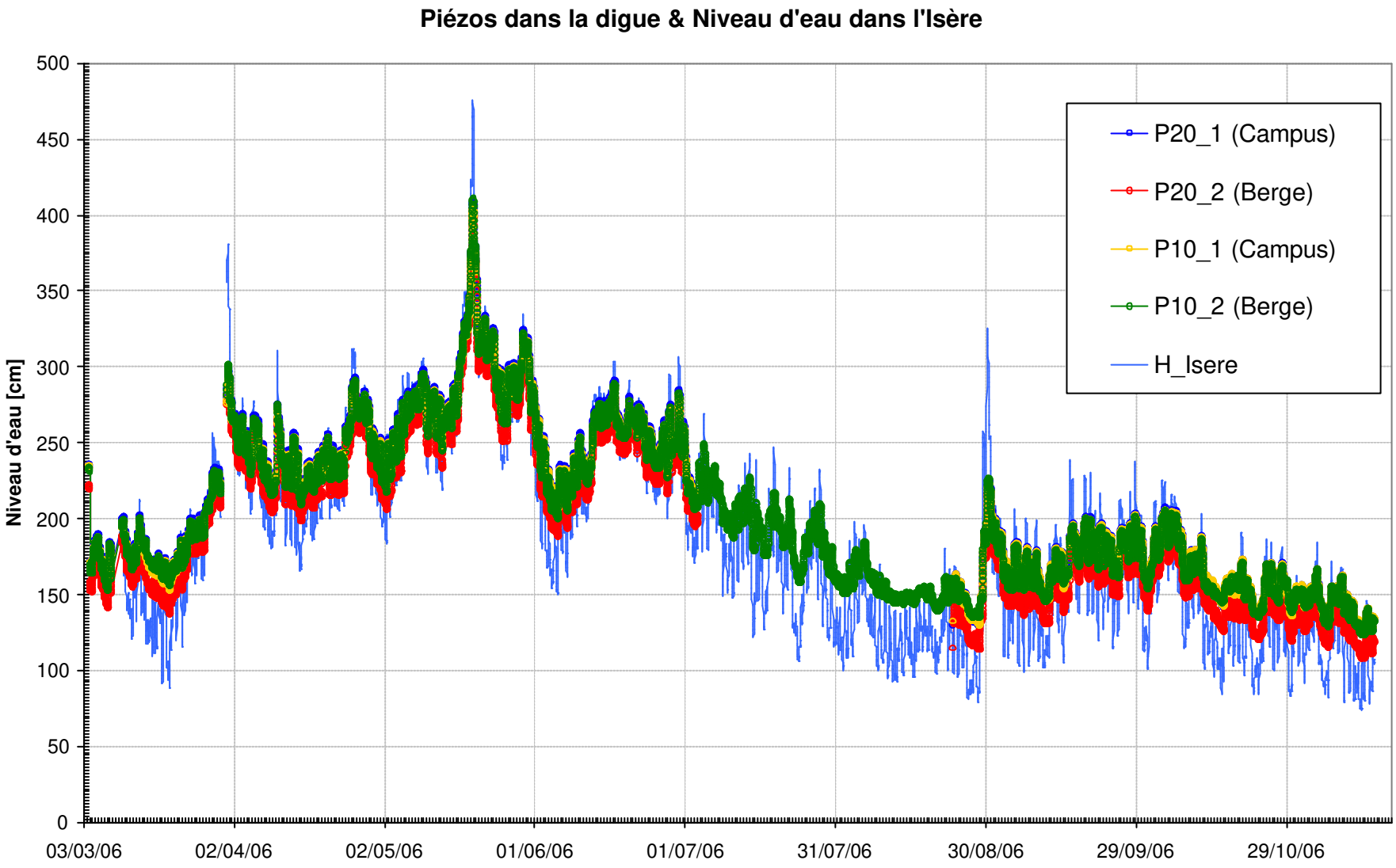



Figure 8 : Niveaux d'eau enregistrés dans l'Isère et dans les piézomètres

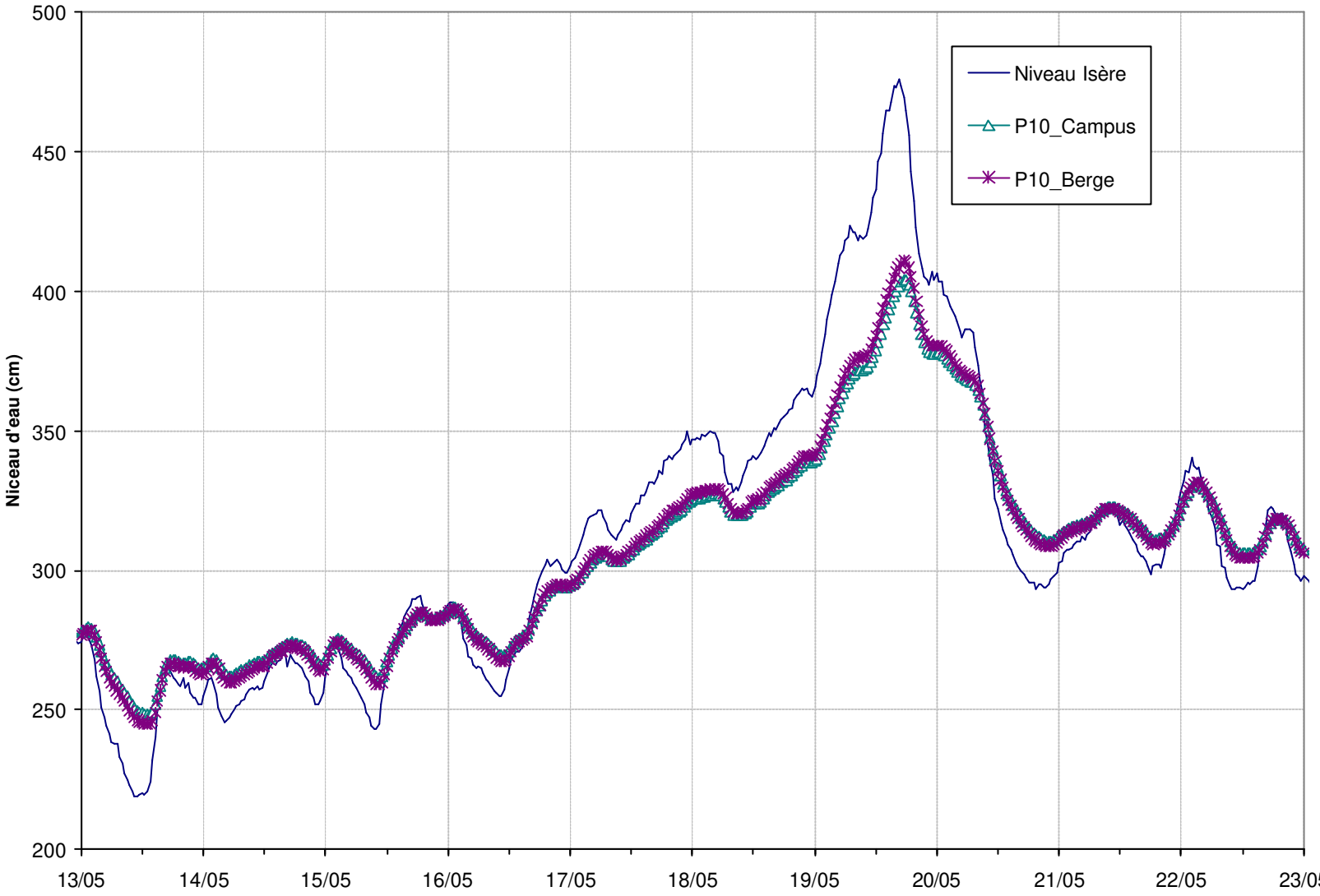



Figure 9 : Niveaux de l'Isère et dans les piézomètres au moment de la crue du 19 mai 2006

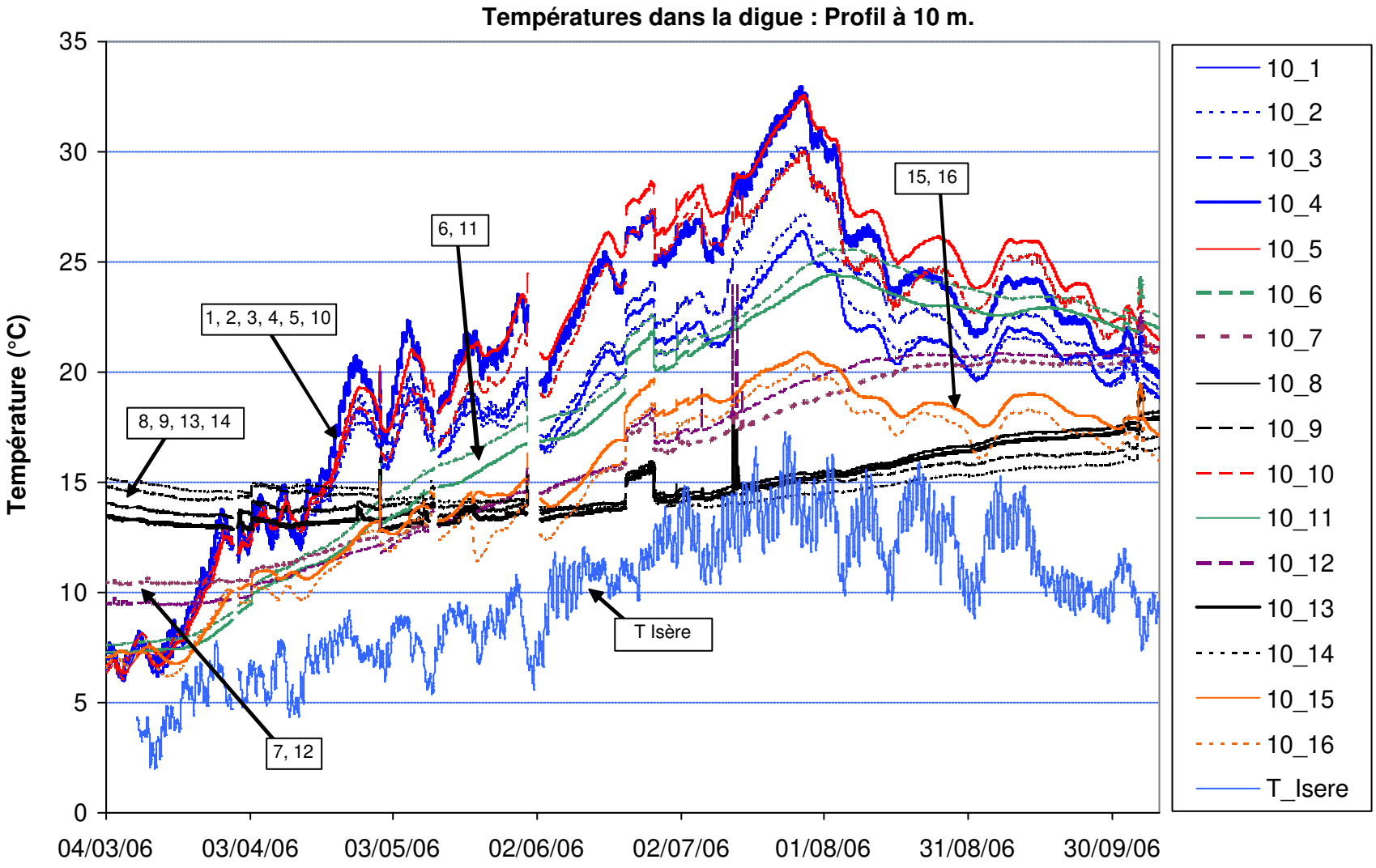



Figure 10 : Températures observées aux différents points du profil Pr10 de mars 2006 à septembre 2006.

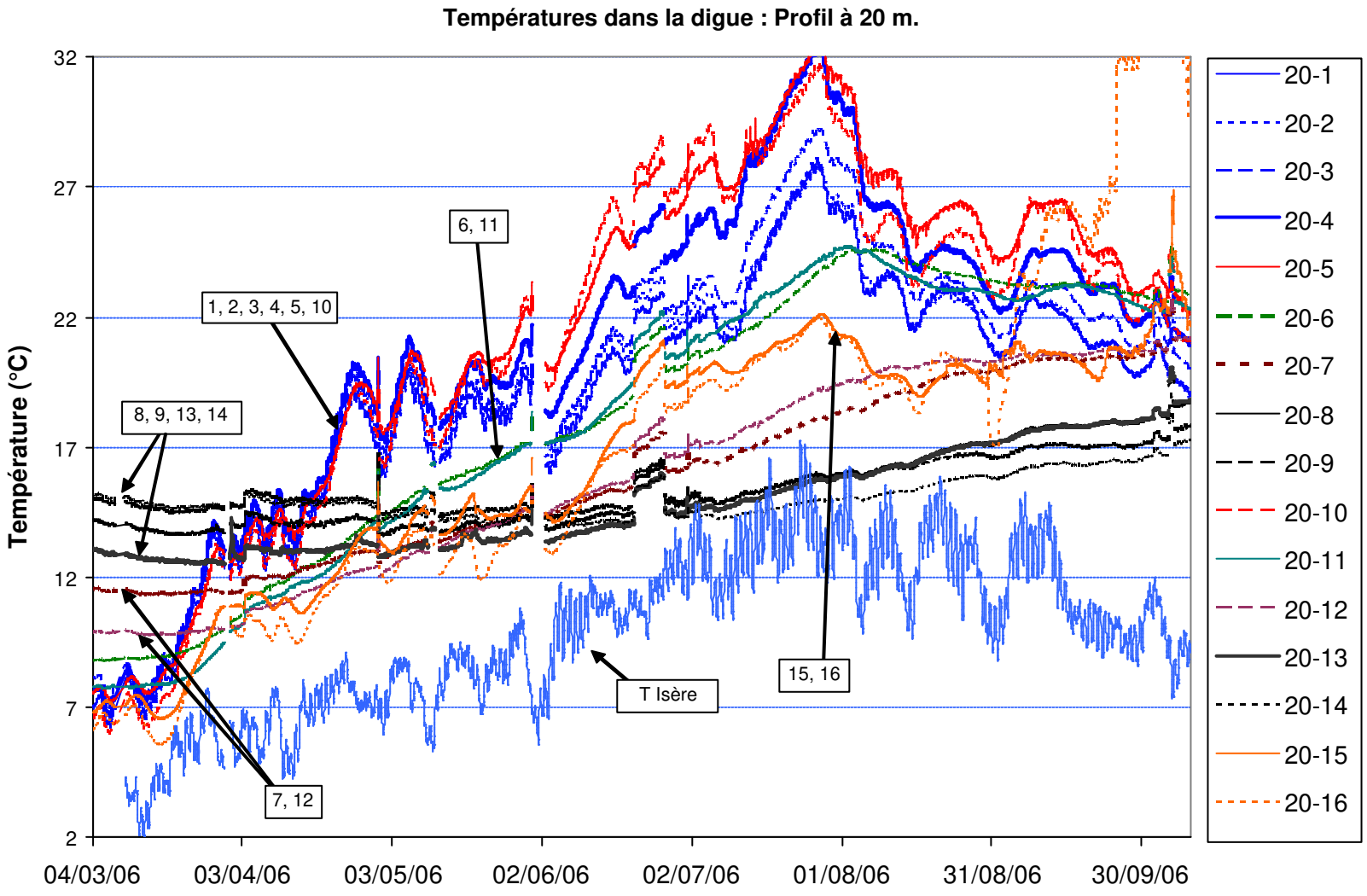



Figure 11 : Températures observées aux différents points du profil Pr20 de mars 2006 à septembre 2006.

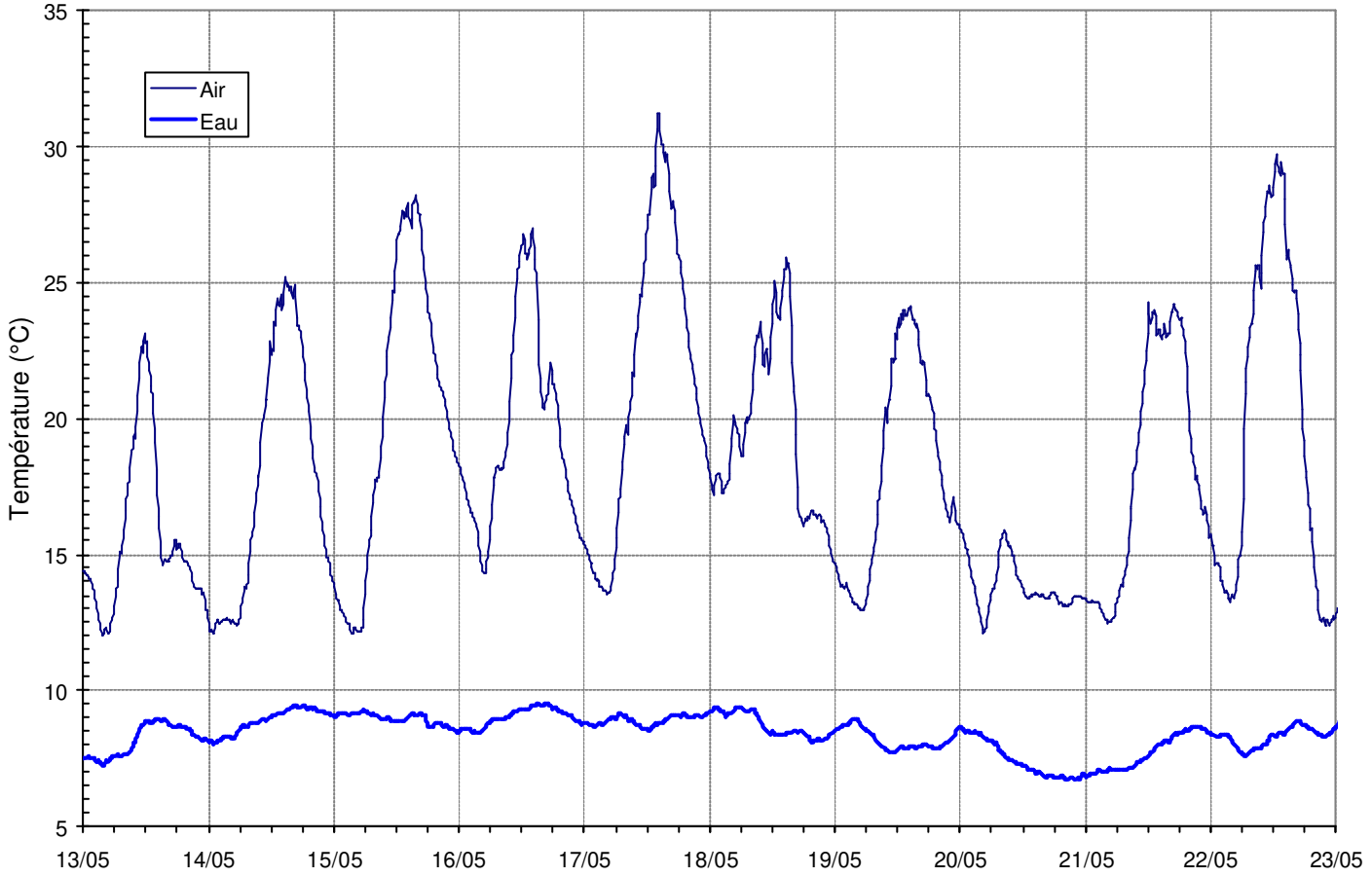



Figure 12 : Variation de la température de l'air et de l'eau de l'Isère pendant la période du 13 mai au 22 mai 2006 (Pic de crue le 19 mai).

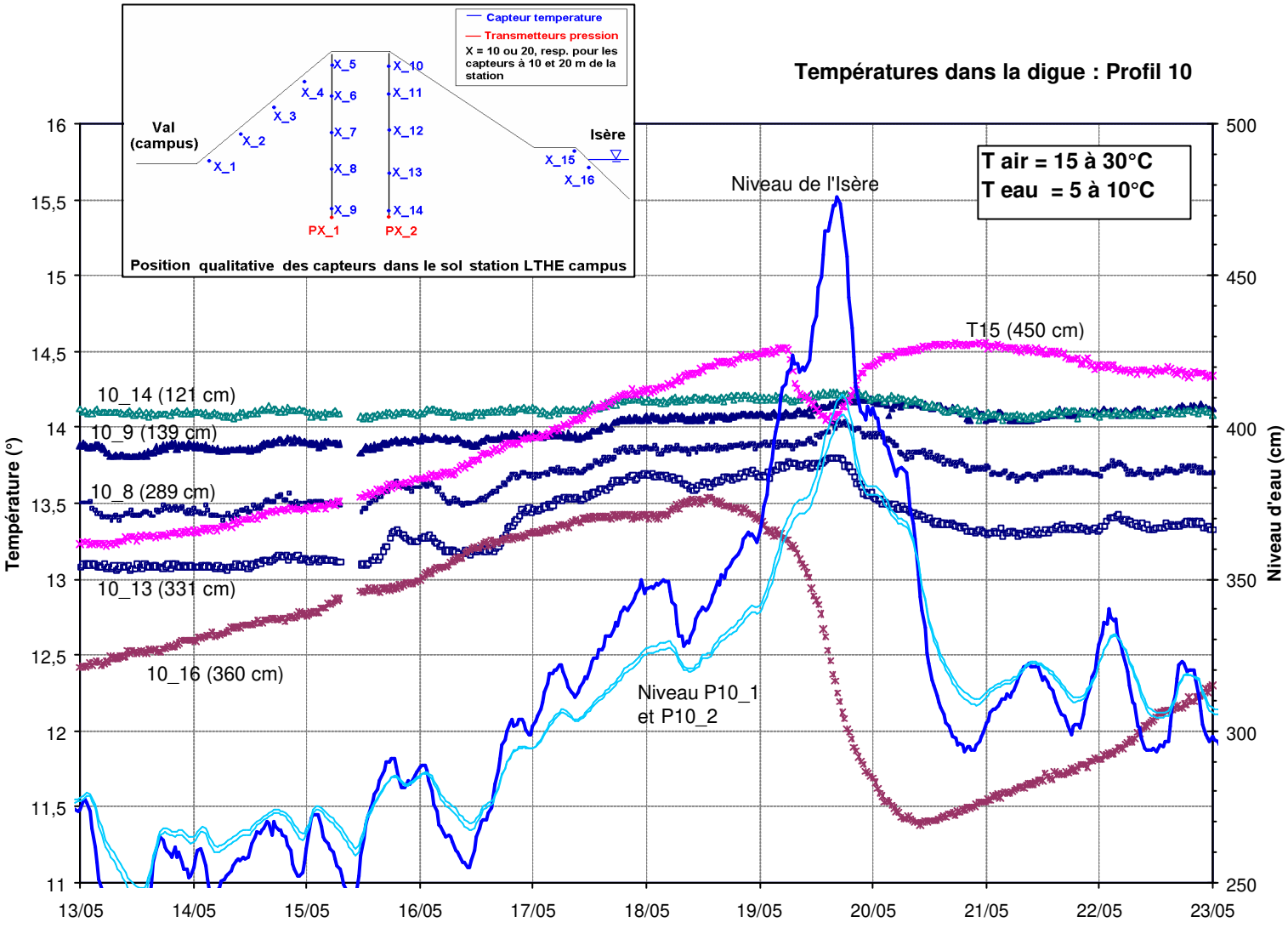



Figure 13 : Variations de la température dans le sol et des niveaux d'eau de l'Isère et dans les piézomètres au moment de la crue du 19 mai 2006
Profil Pr10

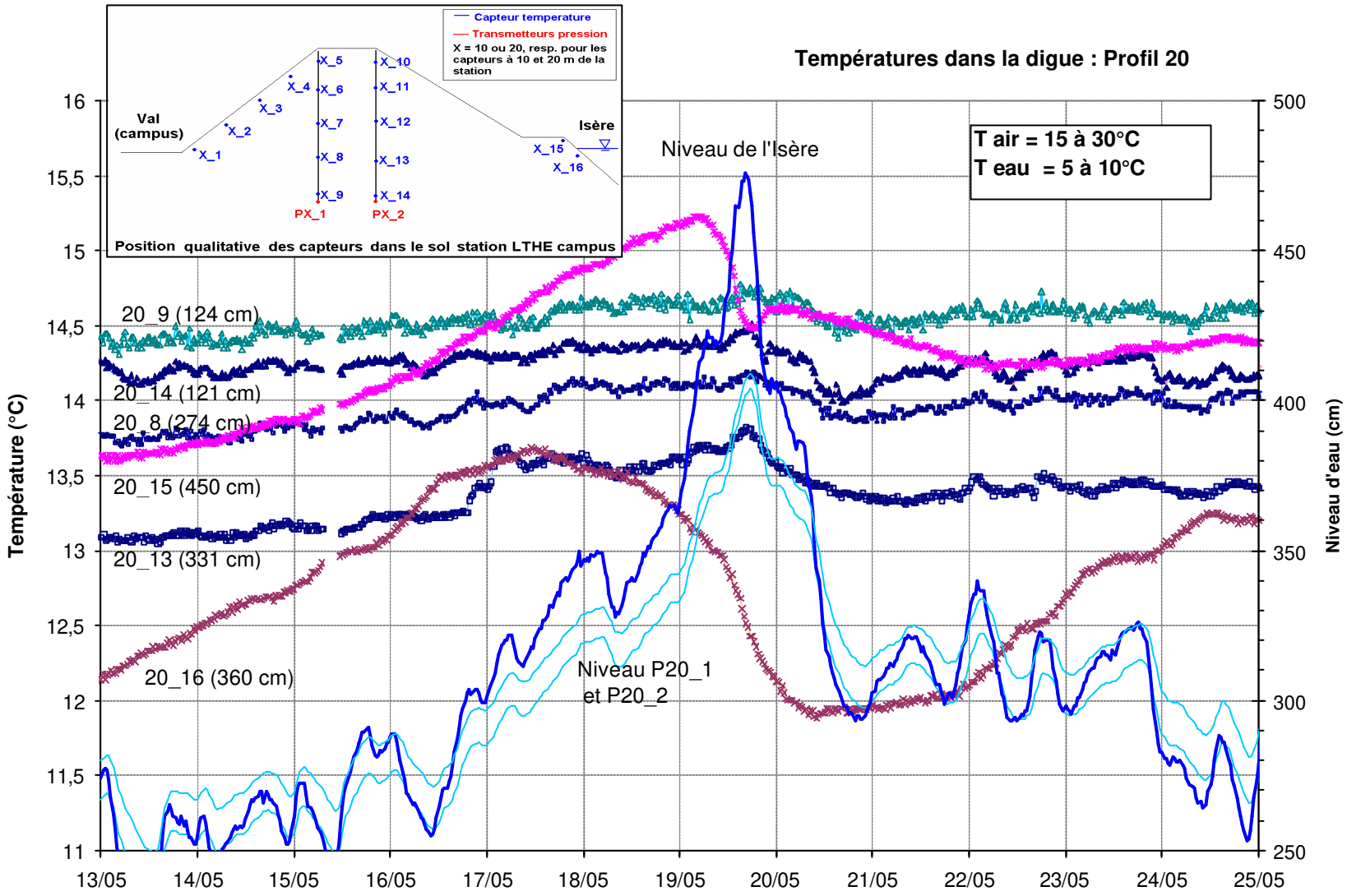



Figure 13 : Variations de la température dans le sol et des niveaux d'eau de l'Isère et dans les piézomètres au moment de la crue du 19 mai 2006
Profil Pr20