Digues Maritimes et Fluviales de Protection contre les Inondations, 2019
Version finale
DOI : 10.5281/zenodo.2530678

Bief de Montambert : analyse de mécanismes de rupture de digues dans les argiles à silex du bassin parisien

Montambert channel: failure mechanisms of embankment structure in flint clay of Parisian Basin

S. Mével[1], T. Noblet[2], R. Clavel[3]

[1] ISL Ingénierie, Lyon, mevel@isl.fr
[2] ISL Ingénierie, Angers, noblet@isl.fr
[3] VNF DTCB, Dijon, robert.clavel@vnf.fr

Résumé

Le bief de Montambert, long de 8,4 km, est situé sur le canal de Briare au Sud de Montargis. Depuis l'hiver 2002, des incidents à répétition ont été observés principalement sur deux zones du bief : la zone « des Fourneaux » et la zone « de la Step ». Les objectifs de cet article sont de présenter l'ensemble des pathologies observées lors des incidents, de détailler les reconnaissances géotechniques et géophysiques mises en œuvre dans le but de mieux comprendre le contexte géologique et géotechnique puis de présenter les mécanismes de rupture qui semblent être les plus adaptés aux incidents observés. Au niveau de la zone « de la Step » le mécanisme de rupture présenté est une initiation des écoulements depuis le canal au contact avec les palplanches (mécanisme initié par les fissures de retrait de l'argile) ou en plafond de canal par l'ouverture d'une cavité verticale, puis une circulation d'eau dans un réseau de vides naturels dans la fondation de la digue menant par érosion à la formation d'une brèche. Pour la zone dite des « Fourneaux » deux mécanismes de rupture sont proposés. Le premier est le développement d'érosion de conduit dans des fissures de retrait de l'argile. Le second est la mise en pression de la digue par la nappe de rive et la formation de « geyser » par soulèvement hydraulique de l'ouvrage. Afin d'éviter ces incidents, il est proposé d'équiper ces ouvrages de piézomètres afin de contrôler le niveau de la nappe dans l'ouvrage. La réalisation de puits de décompression pourrait rabattre la nappe de rive. Un couplage entre reconnaissances géotechniques et géophysiques permettrait de définir les zones potentiellement problématiques, par exemple par l'absence d'une couche argileuse saturée sous l'ouvrage ou sous le canal.

Mots-Clés

Digue, brèche, érosion de contact, érosion de conduit, argile à silex.

Abstract

The Montambert channel is located on the Briare Canal stationed in the south of Montargis and has a length of 8.4km. Since the winter of 2002, repeated incidents have occurred in two following areas: in the zone known as "les Fourneaux" and in the one called "la Step". This article's main purpose is to present the different disorders and their characteristics, whilst detailing the geotechnical and geophysical investigations in order to present the mechanisms that were found to be the most suitable to the given circumstances. Regarding the "Step" zone, the flows coming from the channel along the sheet pile wall (mechanism triggered by the clay's shrinkage cracks, following an emptying period) initiated the failures observed. Furthermore, the circulation of water in a network of natural voids, in the embankment's foundation, leads to the creation of a cavity until the opening gap. Concerning the so-called "Fourneaux zone", two failure mechanisms are highlighted. The first one is the development of conduct erosion in the cracks of shrinkage of the clay. The second mechanism is the consequence of the pressurization of the embankment by the water from the bank with the formation of a "geyser". In order to avoid these kinds of incidents, it is proposed to enhance monitoring system with piezometers, in order to control water level. To reduce the water pressure under the embankment, relief wells could be drilled. Combined geotechnical and geophysical investigations could help to build the maps of hazardous sectors (for instance where no clay layer is detected under the dike or under the channel).

Key Words

Embankment, failure, contact erosion, conduct erosion, flint clay.

Introduction

Le bief de Montambert, long de 8,4 km, est situé sur le canal de Briare au Sud de Montargis. Il s'agit d'un des plus anciens canaux de France, puisque sa construction date du 17e siècle. Certaines parties ont été remaniées à la fin du 19e siècle lors de l'application du gabarit Freycinet. Il est construit en déblais et remblais contre le coteau naturel en rive Ouest. Les matériaux utilisés sont vraisemblablement des matériaux du site : argiles, argiles à silex et sables argileux.

Depuis sa construction, le canal a subi plusieurs accidents, dont certains ont provoqué la vidange accidentelle du bief. Quatre de ces accidents ont eu lieu ces vingt dernières années, et ont concerné deux zones de la digue. À la fin de l'hiver 2002, après une période de chômage, une brèche d'environ 18 mètres s'est ouverte dans la zone dite « des Fourneaux », provoquant la vidange du canal. En 2011, à nouveau après une période de chômage, la digue s'est ouverte dans la zone dite « de la Step » en contournant un voile de palplanches et provoquant à nouveau la vidange accidentelle. En 2015, dans la même zone de la Step, des *sand boils* (cônes de sable) ont été constatés en aval de la digue, en même temps qu'une cavité était aperçue en fond de canal. Au printemps 2016, durant les crues du Loing, une brèche d'une vingtaine de mètres s'est ouverte dans la zone des Fourneaux, à proximité immédiate de l'accident de 2002. À ces accidents bien documentés, il faut ajouter des traces dans les archives de travaux d'injection, et des témoignages d'accidents datant des années 1960, aux mêmes endroits. Devant la fréquence des accidents et leur impact sur la navigation, le gestionnaire Voies Navigables de France a souhaité lancer une réflexion générale sur l'état du bief, afin de rechercher une éventuelle cause commune.

L'objectif de cet article est de présenter les conclusions de l'analyse des différents évènements de rupture qui ont affecté le bief. Des reconnaissances géotechniques et géophysiques ont été mises en œuvre afin de définir au mieux les conditions géologiques et géotechniques du bief.

Situation hydrogéologique

Le bief de Montambert est situé en rive Ouest de la rivière le Loing. Comme le montre la Figure 1, les constructeurs ont profité de la pente du terrain naturel pour placer le canal entre le talus naturel en rive Ouest, et la digue en rive Est.

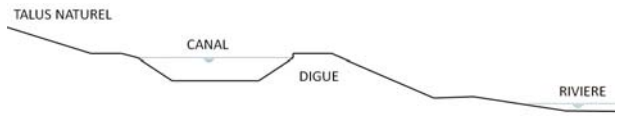

FIGURE 1 : ALLURE GENERALE DU BIEF : COUPE OUEST-EST

Hydrogéologiquement, le Loing est la limite Est de la nappe de Beauce dont l'aquifère est formé par des calcaires fracturés et karstiques. Cette nappe, qui couvre presque 10 000 km², est le plus grand réservoir français. La ligne de séparation des eaux est représentée sur la Figure 2, qui donne aussi l'allure de la nappe, le sens d'écoulement des eaux, et les principales rivières qui la bordent.

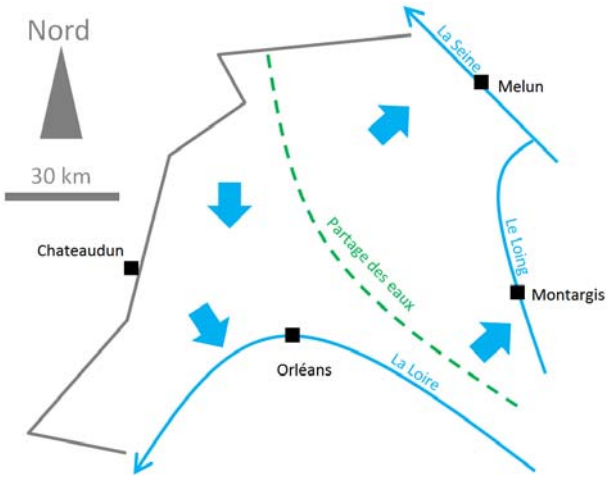

FIGURE 2 : DIRECTION DES ECOULEMENTS DANS LA NAPPE

Du côté NE, les eaux s'écoulent vers la Seine, tandis que du côté SO, les eaux s'écoulent vers la Loire. La partie orientale de la nappe de Beauce se jette donc partiellement dans le Loing. La suite de cet article met en effet en évidence des circulations d'eau dans le sous-sol de la digue.

Les forages de la Banque de données du Sous-Sol (BRGM) permettent de donner une idée de la géologie générale aux alentours du bief. Trois formations s'y trouvent presque systématiquement, et correspondent aux trois formations de l'aquifère :

- du calcaire d'Etampes ;
- des argiles et des argiles à silex ;
- de la craie.

Une coupe Ouest-Est en est donnée sur la Figure 3 : la nappe est étanchée par un horizon argileux à silex, imperméable.
Le bief de Montambert se trouve à l'extrémité Est de la nappe de Beauce. Dans cette zone, la couche de calcaire est faible (inférieure à 10 m), les argiles à silex peuvent atteindre des épaisseurs au maximum de 50 m. Ensuite le faciès crayeux peut atteindre 300 m de profondeur (voir figure 3).

Les zones étudiées sont présentées dans les paragraphes suivants, avant de donner les résultats et les conclusions des investigations.

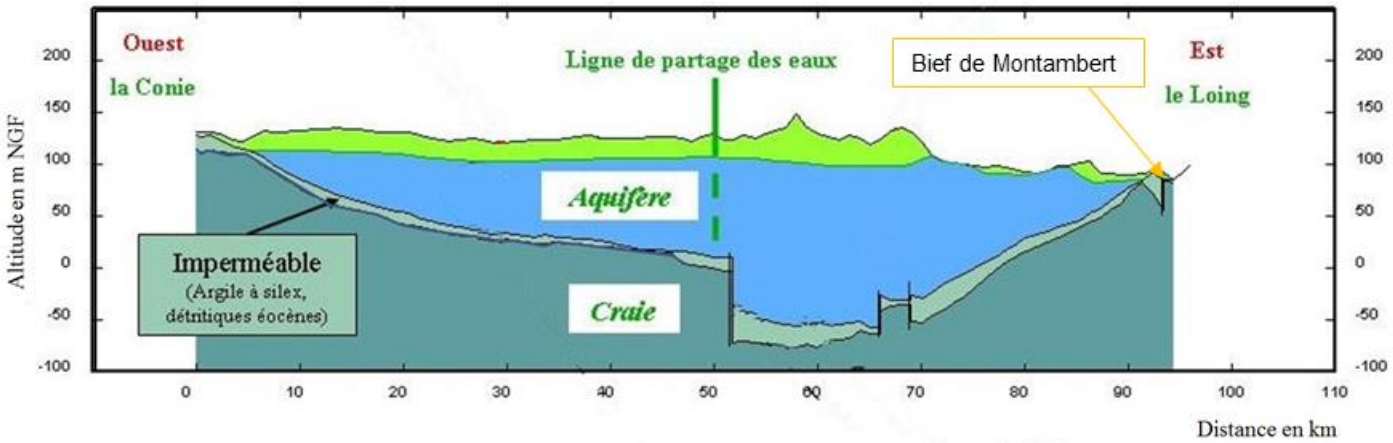

FIGURE 3 : COUPE OUEST-EST DE LA NAPPE DE BEAUCE, D'APRES [1]

Zone dite « des Fourneaux »

La zone des Fourneaux a été le lieu de deux ouvertures de brèches, respectivement en 2002 et en 2016. Ces deux accidents sont bien documentés. Au contraire, un incident de 1958 a été rapporté « de mémoire » par le personnel de VNF et les habitants, mais aucun document n'a été mis à jour. La digue semble s'être globalement et soudainement affaissée d'environ 1 m sur plusieurs dizaines de mètres de linéaire.

La zone concernée est une transition entre deux étanchéités : corroi d'argile en amont, et béton de chaux en aval. La raison pour laquelle l'étanchéité n'est pas homogène n'est pas connue ; les dalles de béton de chaux semblent dater de 1889.

Brèche de l'hiver 2002

En novembre et décembre 2002, le bief est mis à sec pour entretien. Pendant la phase de remplissage, alors que la cote n'atteint que 1,5 m (contre 2,35 m à retenue normale) une brèche s'ouvre en rive droite, laissant une ouverture d'environ 18 m de long.

Le remplissage après un chômage semble être la cause évidente de l'accident. La réparation de 2003 a consisté à reconstruire la digue en grave argileuse. De fortes venues d'eau de la rive gauche ont incité le maître d'œuvre à soigner le dispositif de drainage, en installant un double drain de diamètre 100 mm sous le corps de digue et le plafond, se prolongeant en tranchées drainantes sous la rive gauche vers l'amont, et sous la rive droite vers l'amont et l'aval. Enfin, sur 100 ml à l'amont et à l'aval, le canal est étanché par un DEG (Dispositif d'Étanchéité par Géomembrane) protégé par géotextiles et cages de gabions. Un croquis est disponible dans les archives de VNF avec l'implantation des drains réalisés sur ce secteur (Figure 4).

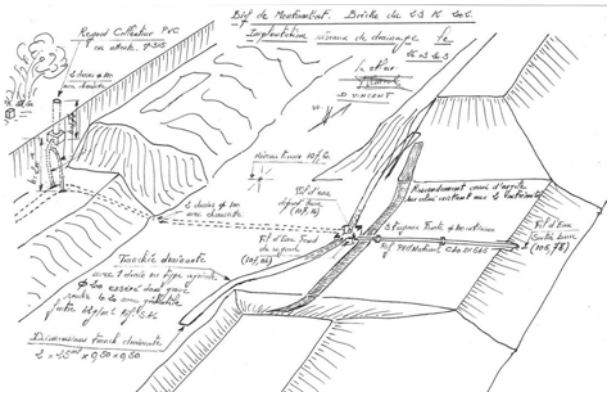

FIGURE 4 : CROQUIS DE LA REPARATION DE 2003, PAR VNF

Après ces réparations, la zone n'est plus une transition d'étanchéité, et elle est protégée par DEG sur 200 ml. Le drainage installé est efficace quelques mois, puis se bouche.

Brèche du printemps 2016

Suite à la crue du Loing du printemps 2016, crue historique supérieure à sa crue de 1910, une brèche s'ouvre en rive droite du canal. La brèche est située immédiatement à l'aval de la brèche de 2002, et donc au milieu de la zone étanchée par DEG. Sur la Figure 5, l'étendue de la brèche de 2002 est schématisée, immédiatement à l'amont de la brèche de 2016.

Deux événements peuvent être notés :

- un riverain a indiqué avoir vu une « sorte de geyser » au droit de l'emplacement de la brèche, quelques instants avant que celle-ci ne s'ouvre ;
- sur la digue, quelques traces de surverse (végétation couchée) ont été observées dans les deux sens d'écoulement canal-Loing et Loing-canal ;

FIGURE 5 : VUE DEPUIS L'AVAL DE LA BRECHE DE 2016

Cette rupture a été l'occasion de voir l'allure de la fondation de la digue. Elle est composée d'argiles à silex, parfois roulés et parfois anguleux. La matrice argileuse a une consistance variable, de très molle à légèrement indurée. Ces matériaux sont représentés sur la photographie de la Figure 6.

FIGURE 6 : ALLURE DE L'ARGILE A SILEX VUE EN 2016

Les travaux de l'été 2016 ont consisté à réparer la digue, son étanchéité et sa protection de gabions, et surtout à conforter largement le système de drainage. En effet, le chantier a été gêné par la venue de grandes quantités d'eau par la fondation en rive gauche. Après une purge locale de la fondation argileuse, l'ensemble du plafond de canal a été réalisé en grave drainante. Un premier drain de diamètres 300 mm a été installé, proche de la cote de la rivière. Un peu plus haut en plafond de canal, a été installé un second drain de même diamètre, prolongé de deux ailes vers l'amont et l'aval. Depuis 2016, le premier drain débite sans discontinuer.

Le programme de reconnaissances, ses résultats et les interprétations sont donnés après la présentation de la deuxième zone d'étude.

Zone dite « de la Step »

La zone de la Step est située dans le village de Montcresson, à proximité immédiate d'une station d'épuration. Elle a été le lieu de deux incidents, respectivement en 2011 et en 2015. Aujourd'hui, des résurgences sont encore visibles côté rivière.

Brèche de l'hiver 2011

En décembre 2011, quelques jours après la fin d'un chômage, une baisse anormale du niveau du bief est constatée. Une large ouverture verticale contre le rideau de palplanches en rive droite est découverte. Le talus aval de la digue présente une ouverture béante en pied (la partie haute du flanc de digue n'étant alors tenue que par la végétation et les palplanches), par laquelle le canal se vidange. La crête est alors ouverte par une brèche d'environ 10 m de long par 10 m de profondeur. La Figure 7 ci-dessous montre l'ouverture, ainsi que le rideau de palplanches de 6 m (à l'arrière-plan) et le rideau de petites palplanches (1,5 m) au premier plan.

FIGURE 7 : BRECHE OBSERVEE AU NIVEAU DE LA STEP EN 2011

La réparation a consisté à reconstruire immédiatement la digue en matériaux étanches puis en 2012 à battre des palplanches de longueur allant jusqu'à 15 m de profondeur (recépées à 3 et 5 m lorsque le battage était impossible). Durant les travaux, le chantier a été gêné par de fortes venues d'eau de la rive gauche, et une grande difficulté à battre les palplanches à partir du toit des silex.

L'ouverture du corps de digue a permis de visualiser les lithologies au droit de la brèche :

- environ 5 m de remblai (argile) ;
- un peu de silex ;
- puis une couche de calcaire ou de craie jusqu'à 10 m sous la crête.

Ces constatations ont été bien confirmées par des forages réalisés la même année par l'ancien CETE de Blois. En particulier, il faut remarquer qu'une frange calcaire

importante est mise en évidence.

***Sand-boils* de 2015**

En 2015, plusieurs *sand-boils* sont détectés entre la digue et la rivière. En même temps, un trou vertical de plusieurs mètres de profondeur est remarqué, en fond de canal près de la rive droite. Le canal est alors vraisemblablement en train de se vider. Le niveau du bief est abaissé en urgence, et le trou est comblé par un mélange de bentonite et de ciment, avant d'être protégé par une pastille de géomembrane. La position des résurgences est donnée sur la Figure 12.

En 2016, la zone est globalement étanchée par la pose d'une membrane étanche sur 140 ml autour de la zone problématique.

Programme de reconnaissances et résultats

Les informations ci-dessus permettent d'émettre une première hypothèse : l'ensemble des pathologies de la digue n'est pas dû à la conception de la digue elle-même, mais à la fondation qui est traversée par des écoulements dont l'origine n'est pas le canal mais la nappe de la rive gauche.

Ces écoulements pourraient provoquer dans la fondation la formation de vides, d'où par exemple des fontis, du transport ou de la dissolution de matériau, voire de la mise en pression de certaines zones. Pour étudier la pertinence de cette hypothèse, des reconnaissances géophysiques et géotechniques ont été menées. Ces reconnaissances ont été réalisées sur de nombreuses zones du bief mais, pour assurer la concision de l'exposé, seuls les résultats propres aux deux zones pathologiques sus-mentionnées sont décrits.

Zone des Fourneaux

Dans cette zone, 2 profils de tomographie de résistivité électrique et 5 sondages carottés sont réalisés. Le plan en est donné sur la Figure 8.

FIGURE 8 : PLAN DE LOCALISATION DES RECONNAISSANCES, ZONE DES FOURNEAUX

Les résultats des profils de tomographie sont donnés sur la Figure 10 : PG10 en rive gauche, PG9 en rive droite. Les sondages carottés sont, du Nord au Sud :

- SC8 et SC10 en rive gauche (Ouest) ;
- SC7 et SC11 en crête rive droite (Est) ;
- SC9 au pied de digue.

En rive gauche (SC8, SC10), la digue est composée d'argile orangée sableuse (Figure 9, en haut). La tomographie électrique montre une anomalie de faible résistivité entre 3 et 9 m de profondeur correspondant à une couche argileuse à silex saturée (n°4 sur la Figure 10). Sous cette couche on retrouve des zones avec une résistivité plus importante correspondant à une couche de silex avec une matrice argileuse plus ou moins présente en fonction des phénomènes de lessivage (Figure 9, en bas). À ceci s'ajoutent les pertes d'injection, toujours notées aux alentours de 10 m. Ces pertes dénotent des vides.

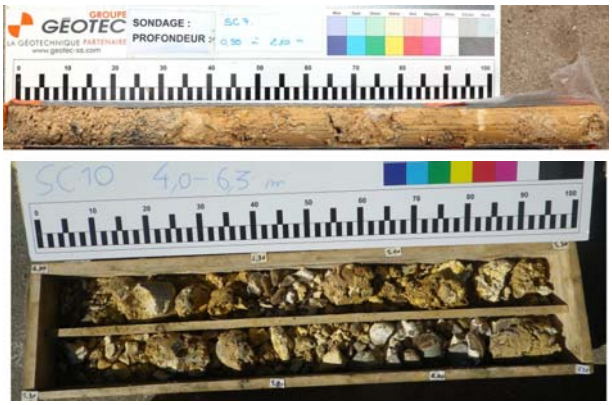

FIGURE 9 : REMBLAI ARGILEUX DE LA DIGUE (EN HAUT), ARGILE A SILEX (EN BAS)

Sur SC8, deux niveaux d'eau sont notés. En effet, le niveau mesuré s'est soudainement abaissé lorsque le forage a passé la cote 8 m environ (rencontre d'un niveau drainant).

La fondation sous la rive gauche présente donc :

- des venues d'eau de la rive gauche (Ouest) dans les argiles à silex ;
- des volumes de vides sous l'argile à 10 m de profondeur, où se trouvent des craies molles ou des silex sans craie.

En rive droite (SC7, SC11), la digue est composée des matériaux de reconstruction de 2003. L'anomalie (faible résistivité) vue sur la géophysique à 5 m de profondeur est corrélée avec une couche argileuse rencontrée sur SC11 (couche n°4 sur la Figure 10).

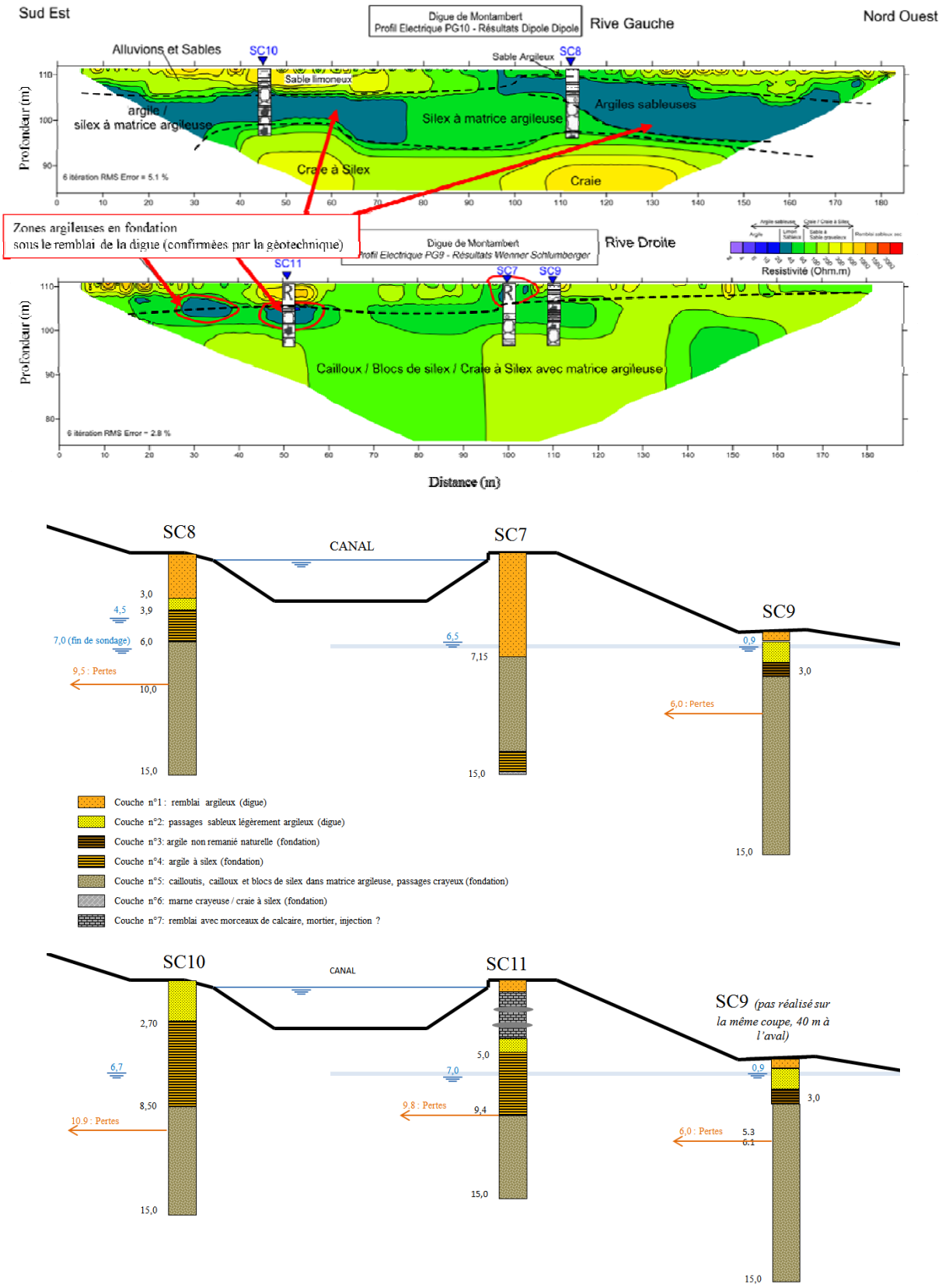

FIGURE 10 : RESULTATS GEOPHYSIQUES ET GEOTECHNIQUES, ZONE DES FOURNEAUX

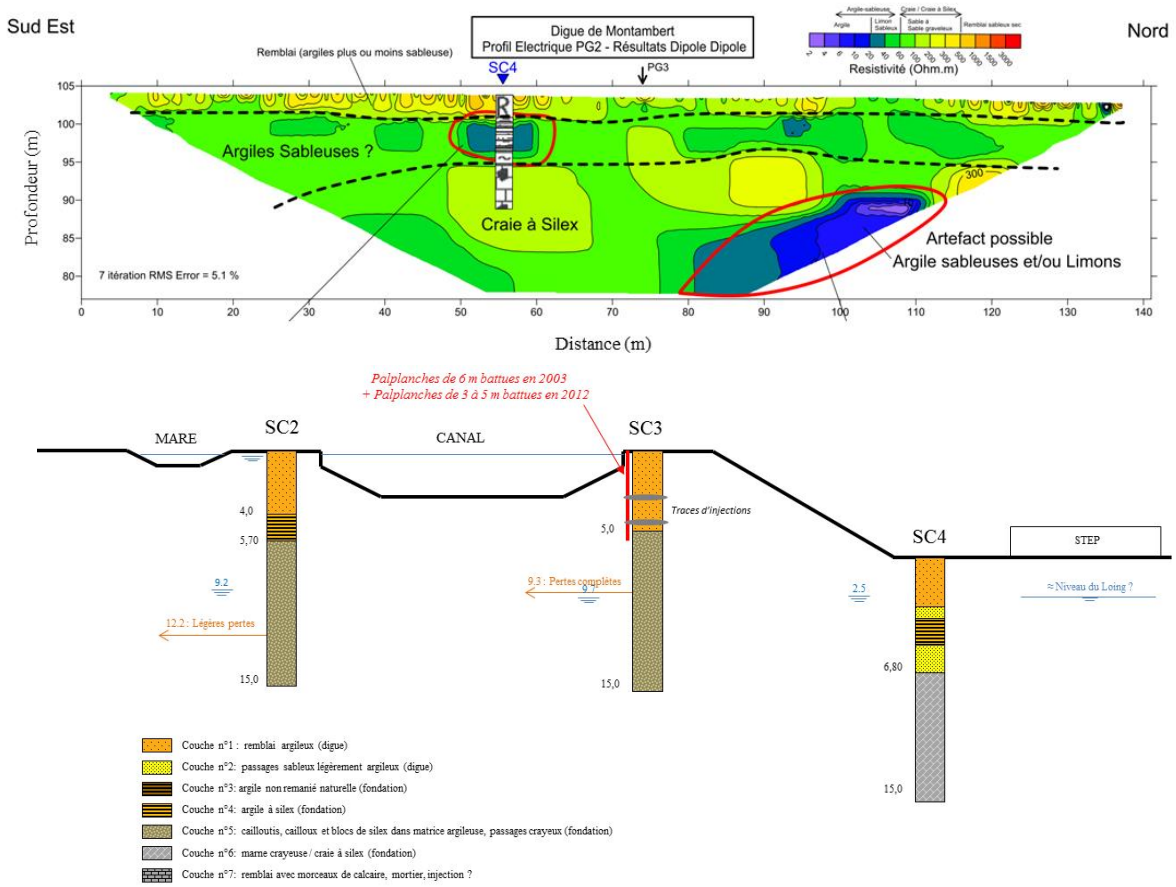

FIGURE 11 : RESULTATS GEOPHYSIQUES ET GEOTECHNIQUES, ZONE DE LA STEP

Cette couche d'argile à silex fait 5 m d'épaisseur sur SC11 mais est très mince sur SC7. À partir de la cote 10 m environ, des vides sont notables selon les mêmes indices qu'en rive gauche. Les pertes d'injection sont notées à la même cote. Sur les résultats de géophysique, la cote de 10 m correspond aussi à un changement de résistivité, mais moins flagrant qu'en rive gauche, car la digue est ici plutôt graveleuse.

La fondation sous la digue présente donc :

- une épaisseur d'argile variable : 5 m sous SC11 et nulle sous SC7 ;
- des volumes de vides sous l'argile.

En pied de digue (SC9), la fondation présente une couche relativement faible de matériaux argileux (moins de 3 m) avec un passage sableux au-dessus d'une couche de silex dans une matrice argileuse. Des pertes d'injection (lors du carottage) sont notées à peu près à la même altitude que pour les forages SC8, SC10 et SC11.

En conclusion, la zone des Fourneaux semble présenter des volumes de vides sous le canal, obtenus par migration d'argile ou dissolution de craie. Ces vides sont situés entre l'argile à silex et la craie. Dans la configuration « normale » de la nappe de Beauce, la craie est protégée par une forte épaisseur d'argile. Ici, l'argile est localement très mince, et de fortes arrivées d'eau ont été constatées depuis la rive gauche. Ces arrivées d'eau sont difficilement drainées naturellement, car aucune résurgence n'a été trouvée dans les environs, et le drain installé en 2016 débite sans discontinuer depuis, en toute saison. L'origine des venues d'eau en rive gauche peut être superficielle (eau de ruissellement) ou profonde (eau de la nappe de Beauce qui déborderait vers le Loing).

Zone de la Step

Dans cette zone, 2 profils de tomographie électrique (lignes jaunes sur la Figure 12) et 5 sondages carottés sont réalisés. L'implantation de ces reconnaissances est présentée sur la Figure 12 et les résultats sont présentés sur la Figure 11.

Les sondages carottés sont SC2 en rive gauche, à côté d'une mare, SC3 en crête rive droite, et SC4 en pied de digue. Sur la Figure 12, les résurgences observées sont notées.

FIGURE 12 : PLAN DES RECONNAISSANCES, ZONE DE LA STEP

Sur SC2 en rive gauche, l'épaisseur de la frange argileuse est estimée à 6 m. Des pertes d'injection ont été observées vers 12 m. En dessous, la matrice argileuse est pauvre dans les silex, ce qui pourrait montrer un vide ou des circulations d'eau. Deux niveaux piézométriques différents ont été relevés : initialement, le niveau est celui de la mare et du canal. Une fois l'épaisseur d'argile forée (au-delà de 6 m), le niveau piézométrique tombe à 9 m, qui est environ la cote de la rivière, et la cote piézométrique dans SC3 et SC4.

En rive droite, la digue est composée d'argile avec des traces d'injections de coulis (travaux de 1961). En deçà, le silex se retrouve avec une matrice argileuse de plus en plus pauvre jusqu'à disparaître. À partir de la cote 13 m, les premières traces de craies sont notées. Il est étonnant que la frange calcaire vue en 2011 entre 5 et 10 m de profondeur environ n'a pas été retrouvée dans les sondages de 2018. D'après les sondages réalisés par l'ancien CETE de Blois en 2012, il s'agissait de calcaires tendres, de craies, voire de craies tendres. Il s'agissait peut-être d'une formation très locale, qui a disparu suite à la reconstruction de la digue avec des matériaux différents.

En pied de digue, une anomalie conductrice mise en évidence sur le profil PG3 (non-présenté) entre 4 et 7 m correspond sur SC4 en partie à l'argile à silex saturée (entre 3 et 5 m) et en partie à une couche sableuse entre 5 et 7 m. Cette couche, intercalée entre de l'argile au-dessus, et la fondation crayeuse en dessous, est composée de matériaux plus drainants.

La Figure 12 montre les principaux points de résurgence :

- le point « résurgence 1 » était la principale résurgence lors de l'incident de 2015. Depuis, il débite parfois, de façon variable ;
- le point « résurgence 2 » est une résurgence qui débite actuellement, aussi de façon variable.

Il faut remarquer le caractère variable de leur débit, sur des périodes où le niveau du canal est constant. La température de l'eau y est aussi sensiblement plus faible que celle de l'eau du canal. L'alimentation de ces résurgences ne doit donc pas être le canal.

Les reconnaissances géophysiques à ce jour n'ont pas permis de déterminer la géométrie précise des circulations d'eau sous la digue et jusqu'aux points de résurgence. La couche de sable mise en évidence entre 3 et 5 m à la fois par le forage SC4 et par la géophysique, pourrait être un passage préférentiel. Le profil de tomographie électrique PG3 (non présenté) réalisé perpendiculairement à PG2 laisse suspecter des écoulements dans une frange superficielle de 1 à 2 m d'épaisseur, dans une large région située entre les deux points de résurgence de la Figure 12. Le réseau d'écoulements est probablement complexe.

En conclusion, la zone de la Step semble présenter, tout comme la zone des Fourneaux, des volumes de vides sous le canal, obtenus par migration d'argile ou dissolution de craie. Ces vides sont à nouveau situés entre l'argile à silex et la craie. Un fait différencie fortement les deux zones : aux Fourneaux, le drainage naturel semble difficile, aucune résurgence n'est trouvée au pied de digue. Au droit de la Step, plusieurs résurgences sont naturellement alimentées.

Interprétations des accidents

Ce paragraphe propose des explications de mécanismes de rupture ayant conduit aux accidents des deux zones décrites.

Zone de la Step

Dans la zone de la Step, les modes de rupture sont voisins : ouverture d'une cavité contre le rideau de palplanches ou en fond de canal.

FIGURE 13 : OUVERTURE DANS LA DIGUE DE 2011

En 2011 (voir Figure 13), le phénomène a pu être initié par le remplissage post-chômage. Les matériaux argileux asséchés permettent à l'eau de trouver un chemin de percolation dans les fissures de retrait ou contre le rideau de palplanches. L'eau du canal suit ensuite les circulations d'eau créées naturellement dans la fondation, et trouve comme exutoire les résurgences naturelles (étape 1). Par érosion de contact contre les palplanches, et par érosion de conduit dans des fissures, le trou grandit. Ce dernier atteint le pied des palplanches et enfin le pied de digue (étape 2). Une fois le pied de digue ouvert, le canal se vidange (étape 3).

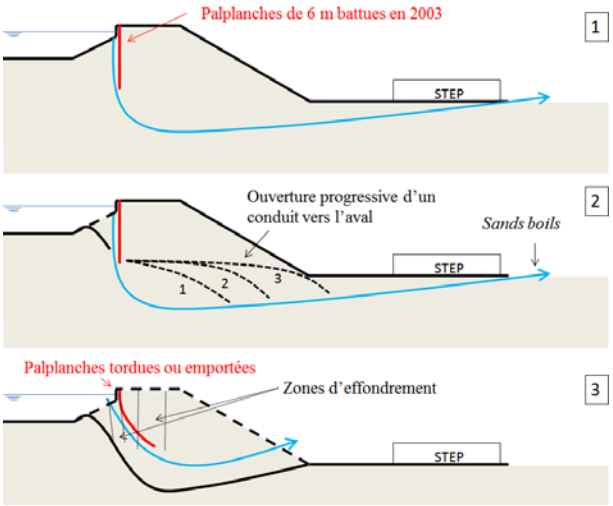

FIGURE 14 : MECANISME DE RUPTURE EN TROIS ETAPES PROPOSE POUR L'INCIDENT DE 2011, ZONE DE LA STEP

En 2015, un mécanisme identique a pu se mettre en place et a été arrêté à temps (à l'étape n°2). Il a pu être initié soit par un phénomène identique (d'autres palplanches ont été battues ici en 2012), soit par l'ouverture d'un fontis en plafond de canal.

Si une épaisse couche d'argile bien saturée et dépourvue d'inclusion de palplanche avait assuré l'étanchéité du canal, alors l'accident aurait peut-être été évité.

Zone des Fourneaux

Au contraire de la zone de la Step, aucune résurgence n'est visible dans les environs de la zone des Fourneaux. L'exutoire naturel des eaux venant de la rive gauche est soit lointain (d'où de fortes pertes de charges), soit inexistant.

Lors de l'accident de 2016, le drainage installé en 2003 est inopérant. L'accident ayant eu lieu en période de crues et de précipitations, la question se pose du devenir des eaux venant de la rive gauche. Celles-ci peuvent d'ailleurs avoir deux origines :

- des eaux proches de la surface, pouvant être alimentées par le coteau proche ;
- des eaux plus profondes, venant de la nappe de Beauce par exemple.

Dans les deux cas, le niveau piézométrique de la rive gauche est élevé, et il permet la mise en pression de la fondation, qui est mal drainée.

Un mécanisme est proposé en rappelant qu'un riverain a vu, quelques instants avant la rupture, une sorte de « geyser » sortir de la crête de la digue. Ceci suggère qu'un débourrage de circulation a eu lieu, et que le corps de digue était en pression au moment de la rupture. Si tel est le cas, alors l'éclatement peut concerner la crête de la digue comme la membrane ou encore sa fixation, avec dans tous les cas des façons simples d'expliquer la suite de la rupture.

Les Figures 15 et 16 illustrent les deux mécanismes qui sont jugés les plus probables à ce jour. La première possibilité fait état d'écoulements peu profonds alimentés par le coteau proche, qui circulent sous la membrane étanche, la mettent en pression, et font éclater la fixation à la crête. La seconde suppose que des écoulements plus profonds, en provenance par exemple de la nappe de Beauce, mettent en pression les vides sous le canal. L'épaisseur d'argile étant localement très faible, le corps de digue est lui aussi mis en pression, jusqu'à éclatement par exemple de la crête. Ces deux mécanismes expliquent le « geyser » vu par le riverain.

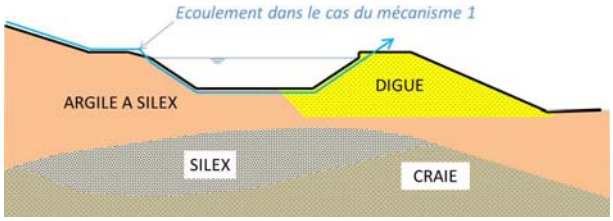

FIGURE 15 : MECANISME DE RUPTURE 1 PROPOSE POUR 2016

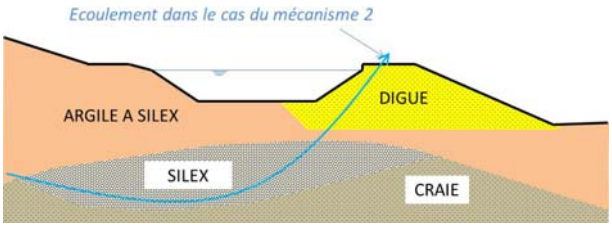

FIGURE 16 : MECANISME DE RUPTURE 2 PROPOSE POUR 2016

Une fois la crête détériorée, et puisque l'eau du canal était proche de la crête, une surverse mène à la rupture. Les mécanismes envisagés combinent alors deux phénomènes : le débourrage et la surverse.

Une remarque déjà écrite pour la zone de la Step est formulée : si une épaisse couche d'argile bien saturée avait assuré l'étanchéité du canal, ou l'étanchéité entre la digue et la fondation, alors l'accident aurait peut-être été évité.
Ces deux mécanismes ne semblent cependant pas être

transposables à la rupture de 2002. La rupture est peut-être expliquée par un mécanisme d'érosion qui se serait développé dans des fissures de retrait du remblai argileux, comme supposé à l'époque dans [2].

Auscultation et proposition de confortement

La campagne de reconnaissance a été l'occasion d'améliorer le système d'auscultation de la digue, la plupart des forages ayant été équipés en piézomètres à chambre. Celles-ci ont en général été placées en profondeur dans les zones drainantes, afin d'observer les fluctuations de la nappe basse, alimentée par la rive gauche. Deux phénomènes sont à surveiller. D'abord, les fluctuations du niveau de cette nappe basse sont à corréler avec les débits des résurgences. Ceci permettra de confirmer que cette eau ne vient pas du canal. Ensuite, ces piézomètres doivent permettre de détecter une mise en pression de la fondation pendant une crue.

La question du confortement sera à discuter sous peu. Les solutions couramment proposées pour des confortements de canaux ne sont pas forcément appropriées pour ce bief. Par exemple la pose d'une membrane étanche bloque le mécanisme de rupture proposé pour la Step mais, en rabattant les pressions interstitielles dans le corps de digue, elle aggrave la situation dans une zone analogue à celle des Fourneaux (pour la zone des Fourneaux elle-même, ceci ne pose pas de problème car la fondation y est bien drainée). De même, la mise en place de palplanches au droit de la crête va à l'encontre de la sécurité dans ces zones, puisqu'elle favorise l'initiation de percolation d'eau du canal vers la fondation par érosion de contact, et elle peut rabattre les sous-pressions dans le corps de digue.

Des puits de décompression en rive gauche pourraient améliorer la situation sans jamais l'aggraver, mais ils ne seraient pas utiles partout. La solution de confortement sera très certainement à adapter au cas-par-cas.

Conclusion et perspectives

Après quatre incidents ou accidents entre 2002 et 2016, Voies Navigables de France souhaitait comprendre les pathologies propres à ce bief. L'étude des deux zones où ont eu lieu ces accidents est présentée dans cet article.

La situation de la digue, au bord du Loing et à la périphérie de la nappe de Beauce, semble expliquer les problèmes de l'ouvrage. Les campagnes géophysiques et géotechniques ont permis de mettre en évidence la présence de vides sous l'ouvrage. Il s'agit de volumes où l'argile ou la craie ont été lessivées ou dissoutes, et où les cailloux de silex, très perméables, restent seuls. Les travaux de confortement passés et l'observation du canal mettent en évidence des circulations d'eau dans la fondation, et ces circulations ne sont, dans la majorité des cas, pas alimentées par l'eau du canal, mais par la rive gauche.

Mis-à-part un événement, dont le mécanisme reste flou (2002, zone des Fourneaux), les trois mécanismes proposés sont crédibles, et en rapport avec les particularités des zones étudiées.

Dans tous les cas, il semble que la rupture aurait été évitée si la couche d'argile entre la craie et la digue avait été plus épaisse et bien étanche. Si on veut poursuivre la recherche de zones dangereuses, il faut peut-être chercher les endroits où l'argile est peu épaisse. Dans la zone de la Step, les accidents ont été initiés par une circulation d'eau du canal vers la fondation au contact avec les palplanches. Au contraire dans la zone des Fourneaux, les écoulements problématiques sont dans l'autre sens : c'est la mise en pression de la digue par la nappe du coteau qui expliquerait la rupture.

Il est enfin rappelé que cet article ne s'est concentré que sur deux zones particulièrement pathologiques. L'étude complète du bief permettra peut-être d'en détecter d'autres.

Une question en filigrane est la suivante : pourquoi autant d'accidents depuis 2002 ? Si les vides et les circulations d'eau dans la fondation sont créés par l'eau de la nappe de Beauce, qu'est-ce qui a pu changer en 20 ans ? Pourquoi l'eau de la nappe de Beauce, une plaine agricole, aurait été plus nocive ces dernières années que durant les quatre siècles précédents ?

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le personnel de VNF présent sur site pour son aide, et en particulier M. Vincent pour sa mémoire de l'histoire du bief.

Références

[1] BRGM, Contexte géographique et géologique- Beauce, http://sigescen.brgm.fr/Contexte-geographique-et-geologique-Beauce.html

[2] CETMEF. (2015). *Digues et voies navigables : retour d'expériences sur les désordres et les réparations*, CETMEF-DRHG, Compiègne.