

SOURNOISERIES DE L'EAU DANS LE SOL SUR LE SITE DE LA 4^{ÈME} ÉCLUSE DE LANAYE À VISÉ (BELGIQUE)

SLYNESSES OF WATER INTO THE SOIL AROUND THE 4TH LOCK OF LANAYE IN VISÉ (BELGIUM)

Philippe Welter¹

¹ *Service Public de Wallonie, Direction Générale Opérationnelle des Routes et des Bâtiments, Département des Expertises Techniques, Direction de la Géotechnique, B – 4000 Liège, Belgique*

RESUME - Le Canal Albert, à vocation essentiellement économique, relie le bassin industriel de Liège à la zone portuaire d'Anvers. Inauguré en 1939 au gabarit de 2000 tonnes, il a fait l'objet de nombreux aménagements ultérieurs pour le porter au gabarit de 9000 tonnes. Tout au long de son histoire, des travaux de drainage et de canalisation des eaux souterraines autour et sous le canal ont été menés.

Au travers de différents épisodes rencontrés ces dernières années, au "Bouchon de Lanaye" et liés aux sournoiseries des écoulements souterrains, l'article illustre le combat souvent délicat et permanent que nos infrastructures hydrauliques nécessitent pour tenter de réguler les effets de l'eau dans le sol.

ABSTRACT - The Albert Canal is a link between the industrial zone of Liège and the harbour of Anvers. Unveiled in 1939, with a weight clearance for barges of 2000 tons, it has been redesigned up to a weight clearance of 9000 tons. Along its life, a lot of drainage and canalizing works of underground waters around and below the canal have been carried on.

Through some problems encountered the last years, due to slynesses of underground waters, the paper illustrates the fastidious and permanent battle against the effects of the water into the soil.

1. Le Canal Albert dans sa section mosane

Le Canal Albert est un canal à vocation essentiellement économique. Il relie le bassin industriel de Liège à la zone portuaire d'Anvers et traverse le bassin houiller de la Campine (Figure 1). Partant de Liège vers le nord, il double le cours sinueux et étalé de la Basse Meuse qui est difficilement navigable. Arrivé à la hauteur du village de Lanaye (Commune de Visé – Province de Liège), son tracé s'oriente vers le nord-ouest et la Campine pour rejoindre l'Escaut au niveau du Port d'Anvers.

Inauguré en 1939, après 9 ans de travaux, le Canal Albert a été conçu, dès le départ, pour un gabarit de barges de 2000 tonnes. Il augmentait, dans le secteur mosan, les capacités de transport fluvial de l'ancien Canal Liège-Maastricht.

Durant les années 1960-1970, des travaux d'aménagement sont entamés pour le porter au gabarit actuel de 9000 tonnes.

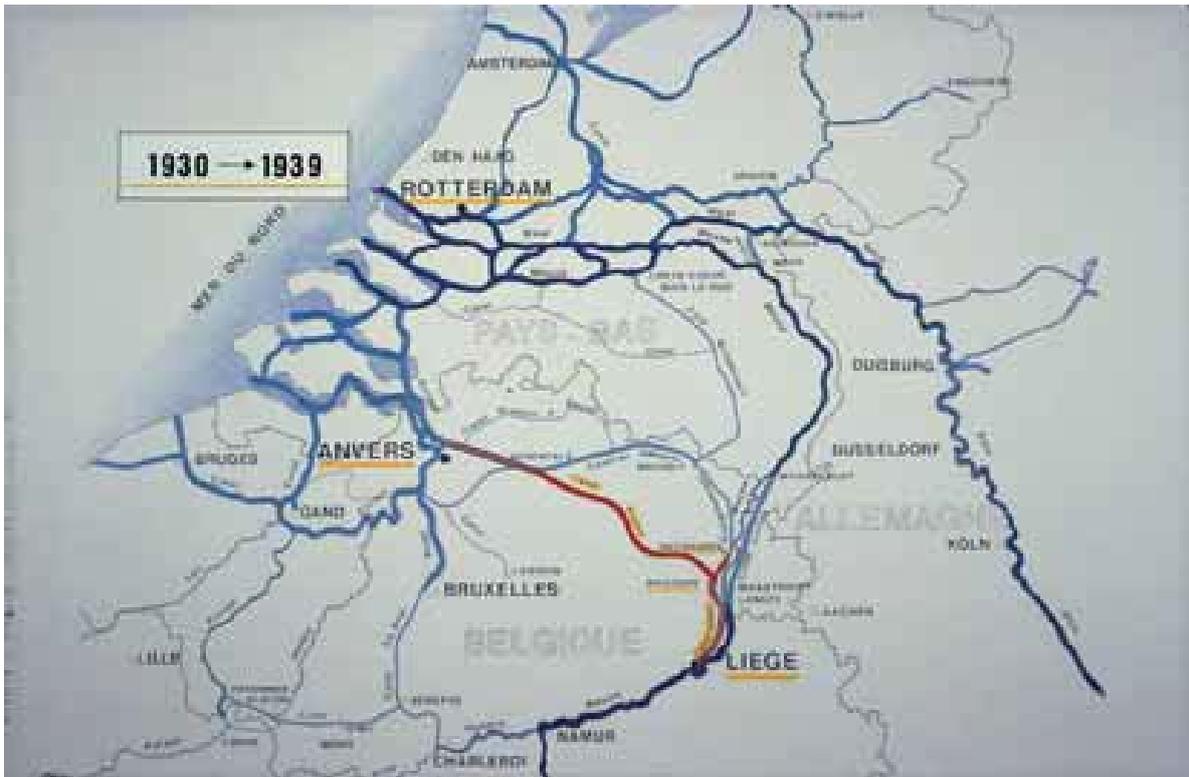


Figure 1. Tracé du Canal Albert entre Liège et Anvers

2. Le site de Lanaye

2.1. Contexte fluvial

Le complexe éclusier de Lanaye (souvent dénommé "Bouchon de Lanaye") est situé dans la commune de Visé à 25 km au Nord de Liège, à cheval sur la frontière belgo-néerlandaise. Il relie le Canal Albert à la Meuse néerlandaise via le Canal de Lanaye (bief de l'ancien Canal Liège-Maastricht).

Les écluses permettent la connexion fluviale entre la Wallonie et les Pays-Bas. Elles sont empruntées également par des bateaux en provenance des zones industrielles campinoise et anversoise de la Région flamande. Par extension, ce carrefour fluvial stratégique donne aussi accès aux réseaux des voies navigables belge et français, d'une part, et néerlandais, allemand et centre européen, d'autre part, via le Rhin et le Danube.

Le complexe éclusier, composé aujourd'hui de 4 écluses (Figure 2), permet à la navigation commerciale et de plaisance de franchir une chute de près de 14 mètres pour rejoindre l'ancien canal Liège-Maastricht (actuellement Canal de Lanaye) et le réseau fluvial hollandais:

- deux écluses construites en 1934-1936 au gabarit de 600 tonnes,
- une écluse construite à la fin des années 1950 au gabarit de 2000 tonnes (136m x 16m),
- une écluse, inaugurée en 2015, au gabarit de 9000 tonnes (225m x 25m).



Figure 2. Vue perspective du complexe éclusier de Lanaye

Entre Liège et le Bouchon de Lanaye, le Canal Albert est réalisé entre le pied du versant ouest de la vallée de la Basse Meuse et le fleuve.

Les relèvements de son plan d'eau au cours des aménagements successifs qui ont suivi sa construction pour le porter au gabarit de 9000 tonnes, ont conduit à un profil transversal mixte déblai (rive gauche) – remblai (rive droite) et à la réalisation d'importants murs-digues en rive droite, notamment pour l'aménagement de zones portuaires et la protection des villages situés entre le Canal Albert et la rive gauche de la Basse Meuse.

2.2. Contextes géologique et géotechnique

A l'approche du "Bouchon de Lanaye" en venant de Liège, le Canal Albert court au pied du versant ouest de la vallée de la Meuse. Ce versant très abrupt qui atteint plus de 40 mètres de hauteur à proximité du complexe éclusier de Lanaye, offre un affleurement géologique particulièrement détaillé. Une coupe lithostratigraphique est présentée à la Figure 3.

Sous les remblais et autres modifications anthropiques, la couverture cénozoïque est constituée du haut vers le bas :

- de loess (LIM) : limon éolien dont l'épaisseur peut atteindre plus de 10 mètres sur les plateaux,
- de dépôts sablo-argileux (SBL) : sable comprenant des lentilles d'argile sableuse. Ils sont localisés, dans les poches de dissolution de la craie sous-jacente ou sont mélangés avec le conglomérat à silex qui est le résidu d'altération des couches de craie,
- d'alluvions anciennes (ALA) : ce sont d'anciennes terrasses de la Meuse, constituées de limon sableux à galets, de sable et d'argile.

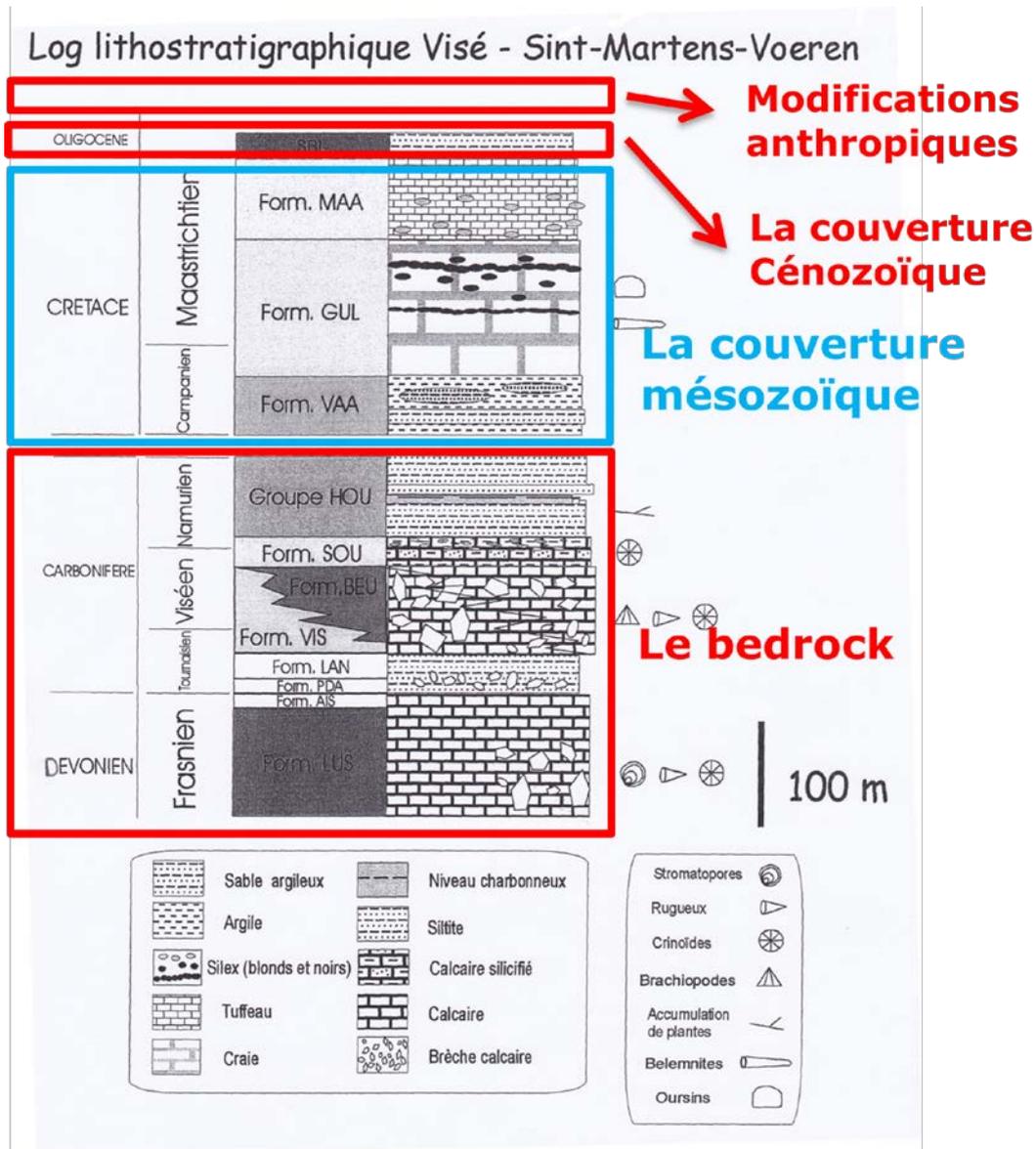


Figure 3. Coupe lithostratigraphique à Lanaye

Les dépôts sédimentaires mésozoïques, datant du Crétacé, sont constitués du haut vers le bas :

- du conglomérat à silex (Sx); résidus de la dissolution et du lessivage des formations carbonatées mésozoïques. Son épaisseur peut atteindre 10 mètres,
- de la Formation de Maastricht (MAA) : calcaire bioclastique poreux (tuffeau), brun crème à blanc crème avec des bancs continus de silex à la base,
- de la Formation de Gulpen (GUL) : craie blanche et grossière à niveaux continus de silex noirs qui surmonte une craie grise, plus argileuse,
- de la Formation de Vaals (VAA) : argile et siltite, glauconifères, gris-vert. La glauconie est une association de minéraux argileux, dont la smectite qui possède un comportement de gonflement-retrait très marqué, en relation avec son état hydrique.

Plusieurs niveaux sont encore ou ont été exploités : les silex dont la taille permet la réalisation de pierres ornementales ou de pavés, les bancs de tuffeaux pour la réalisation de pierres de construction et la craie pour la fabrication du ciment.

Ainsi, au cœur de la Montagne Saint-Pierre, entre la Tranchée de Caster (début de la branche campinoise du Canal Albert) et le Canal de Lanaye, un important réseau d'anciennes exploitations souterraines, encore circulable aujourd'hui, parcourt le massif.

Les dépôts mésozoïques sont localement altérés et présentent des traces de phénomènes karstiques, bien visibles sur les flancs de la vallée et dans les anciennes exploitations souterraines.

Dans la vallée, au pied des parois crayeuses, sous les remblais éventuels, les alluvions modernes (AMO) composent les dépôts récents de la plaine alluviale de la Meuse. Elles sont constituées d'un horizon sablo-graveleux, surmonté d'un niveau limono-argileux, pouvant être tourbeux. Ces alluvions ont une épaisseur qui peut dépasser les 10 mètres. Elles reposent directement sur les craies blanches de la Formation de Gulpen.

Au droit du site éclusier de Lanaye, la nouvelle Carte Géologique de Wallonie indique que le socle paléozoïque est constitué de roches calcaires de la Formation de Visé (VIS, Tournaisien-Viséen, Carbonifère) (Figure 4).

Selon les nouvelles données, les dépôts houillers, très présents dans la région liégeoise, ont été complètement érodés aux environs de la frontière avec les Pays-Bas.

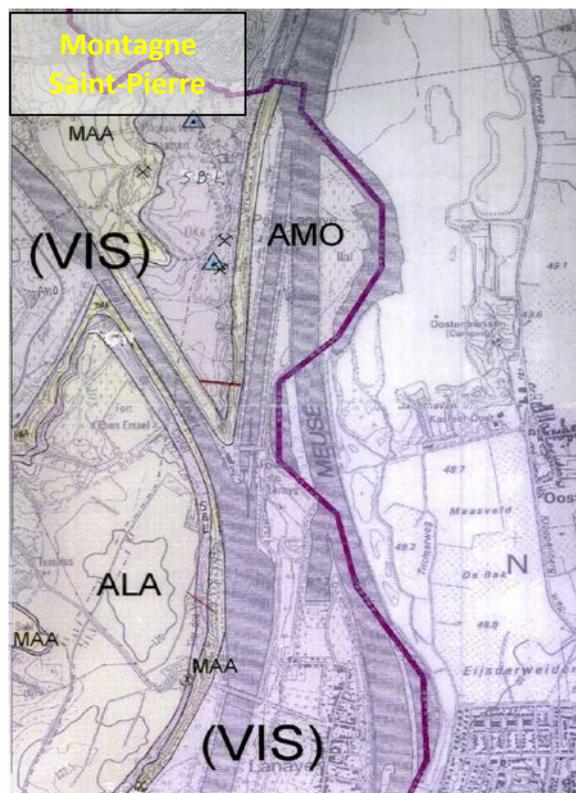


Figure 4. Extrait de la Nouvelle Carte Géologique de Wallonie

Sur le plan géotechnique, de nombreux sondages et essais sur site, complétés par des essais de laboratoire ont été exécutés au fil des travaux de creusement et d'aménagement du Canal Albert. Au "Bouchon de Lanaye", les études géotechniques pour la construction de la 4^{ème} écluse ont débuté en 1985 et se sont échelonnées jusqu'en 1997 (Tableau 1).

29 essais de pénétration statique 200kN	1986-1987
24 forages de reconnaissance d'une profondeur moyenne de 20m dont certains sont équipés de piézomètres	
10 sondages avec essais pressiométriques	
4 forages de reconnaissance avec essais de perméabilité type LEFRANC et diagraphies différées (gamma-gamma, gamma-ray)	
des essais de laboratoire sur les échantillons prélevés dans les forages de reconnaissance	1988-1989
la régénération des piézomètres	1993
des essais de pompage	1997

Tableau 1. Synthèse de la campagne géotechnique pour la 4^{ème} écluse

Par ailleurs, des essais géotechniques sur site ont été réalisés pour des aménagements et travaux périphériques (Tableau 2).

3 essais de pénétration statique 200kN pour l'étude des fuites du Canal Albert	1986
3 forages de reconnaissance avec diagraphies différées (gamma-gamma, gamma-ray) pour l'étude des fuites du Canal Albert	
6 forages de reconnaissance d'une profondeur moyenne de 15m pour la création d'une zone de remblais	

Tableau 2. Etudes géotechniques annexes

A l'issue de la première phase de l'étude géotechnique (1986-1989), le rapport de synthèse présentait les conclusions suivantes :

- Une géologie générale assez simple avec les caractéristiques géotechniques décrites ci-après :
 - Remblais : ils sont localement présents et de nature fort hétérogène. Les résistances à la pointe (essais CPT) varient entre 2 et 6 MPa. On observe toutefois localement des pointes entre 10 et 30 MPa, liées à la présence d'hétérogénéités locales telles que des pierres et des blocs. Peu de mesures pressiométriques sont disponibles dans cet horizon. Les modules pressiométriques E_M varient entre 2 et 5 MPa. Localement, ils dépassent 50 MPa,
 - Alluvions limono-argileuses : elles sont généralement présentes sur plusieurs mètres d'épaisseur. Les résistances à la pointe sont souvent inférieures à 2 MPa, voire à 1 MPa. Les modules pressiométriques E_M varient entre 1 et 2 MPa. Localement, ils atteignent 5 à 6 MPa. Leur perméabilité k (déterminée sur site par essai type Lefranc) est de l'ordre de 10^{-7} m/s,

- Alluvions sablo-graveleuses : On observe de fortes teneurs en limon et en argile. Leur niveau de base qui surmonte les craies est très irrégulier. Les résistances à la pointe sont généralement comprises entre 20 et 30 MPa, avec localement des pointes jusqu'à 50 MPa. Certains essais révèlent des valeurs proches de 10 MPa. Les modules pressiométriques E_M varient entre 5 et 20 MPa. Localement, ils dépassent 70 MPa. Leur perméabilité k (déterminée sur site par essai type Lefranc) est de l'ordre de 10^{-5} m/s, parfois de l'ordre de 10^{-6} m/s,
- Substratum crayeux : La partie supérieure de cet horizon est généralement très déconsolidé, parfois sur près de 10 mètres d'épaisseur. Les résistances à la pointe sont généralement comprises entre 6 et 10 MPa, avec localement des pointes jusqu'à 14 MPa. Les modules pressiométriques E_M varient entre 20 et 50 MPa. Dans les zones particulièrement déconsolidées, on mesure des modules pressiométriques E_M de l'ordre de 6 MPa. Dans les zones très compactes, ils atteignent 200 à 300 MPa. La perméabilité k (déterminée sur site par essai type Lefranc) est de l'ordre de 5×10^{-4} m/s.

Selon l'endroit, certaines entités sont absentes. La figure 5 montre une coupe géotechnique schématique à l'entrée du site éclusier de Lanaye.

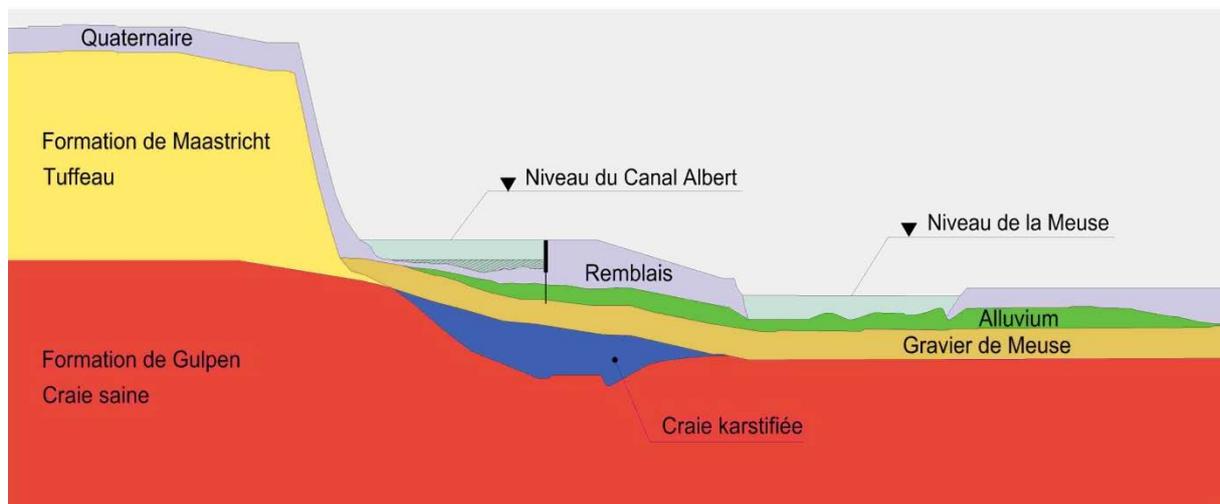


Figure 5. Coupe géotechnique schématique à l'entrée du site éclusier de Lanaye.
Niveau du Canal Albert : +61m – Niveau de la Meuse : +46,32

- Beaucoup de variations lithologiques et topographiques des différents sols :
 - hétérogénéités des remblais liées aux phases successives d'aménagement du site,
 - hétérogénéités des alluvions liées à leurs modes de dépôt (anciens cours de la Meuse) et/ou d'extraction (exploitations des graviers),
 - hétérogénéités du substratum crayeux liées à l'érosion et aux phénomènes d'altération (ex: conduits karstiques, altération du toit, fissuration).
- D'autres problèmes géotechniques :
 - hétérogénéités des nappes et écoulements souterrains (hydrogéologie),

- difficultés d'accès à certains endroits (anciens bras de Meuse et présence d'ouvrages existants).

Alors que les essais de perméabilité de type Lefranc indiquaient que le substratum crayeux était plus perméable que les alluvions sablo-graveleuses, des essais de pompage, réalisés en 1997 sur une période de 40 jours, avec 2 puits de pompage (un puits dans les alluvions sablo-graveleuses et un puits dans la craie) entourés de 7 piézomètres ont révélé un comportement très différent des aquifères :

- l'aquifère des graviers est libre, avec une transmissivité T élevée :
 $T_{\text{gravier}} = 0.5 \text{ à } 3 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$,
- l'aquifère des graviers peut être considéré comme un réservoir permanent et infini. L'alimentation des graviers est supérieure à ce qui est transmis vers la craie,
- l'aquifère des graviers alimente en permanence les craies,
- l'aquifère des craies est semi-captif, avec une transmissivité T assez faible:
 $T_{\text{craie}} = 4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$,
- un rabattement dans la craie n'induit pratiquement pas de rabattement dans les graviers,
- l'aquifère crayeux doit être considéré:
 - comme semi perméable,
 - en communication avec une nappe à niveau constant (celle des graviers),
 - avec une éponte de transfert semi-perméable à emmagasinement négligeable,
 - durant un pompage, avec un écoulement dans les craies augmenté d'un débit venant des graviers,
 - avec un écoulement de l'eau à travers un réseau de fissures plus ou moins développé.
- un pompage dans les graviers induit une réaction (diminution de la pression hydraulique) similaire et immédiate dans les craies.

Pour caractériser l'hydrogéologie et le comportement des aquifères dans un contexte géotechnique complexe, il est toujours recommandé de privilégier les essais sur site qui intéressent un grand volume de sol. Les essais de pompage à grande échelle permettent ainsi de spécifier les types d'écoulement d'eau souterraine : perméabilité volumique ou de fissures, écoulement laminaire ou turbulent, aquifère libre, captif ou semi-captif.

3. Les circulations d'eau souterraine

3.1. Le drainage derrière les murs de rive

Depuis la construction du canal dans les années 1930, les ingénieurs ont été confrontés à des problèmes de fuite, particulièrement le long de la rive droite du Canal Albert entre Liège et Visé. En effet, sur une grande partie de son tracé, le Canal Albert est localisé dans la partie haute de la plaine alluviale et son niveau de flottaison est plus élevé que le niveau de la Meuse qui franchit deux chutes aux

barrages de Monsin (sortie de Liège) et de Lixhe (un peu à l'amont de Lanaye), avant de faire sa jonction avec le Canal de Lanaye, à l'aval du "Bouchon de Lanaye". Lors des travaux de mise au gabarit de 9000 tonnes, les nouveaux murs-digues en rive droite du canal (Figure 6), qui sont pour la plupart fondés sur des pieux battus et moulés dans le sol (type FRANKI) verticaux ou inclinés et traversant les alluvions compressibles de la vallée de la Meuse, ont été équipés d'un parafouille du côté canal, constitués d'un rideau oblique de palplanches en bois, en béton ou en métal, selon l'époque des travaux. Ces structures ont vieilli et nécessité régulièrement des travaux de réfection.

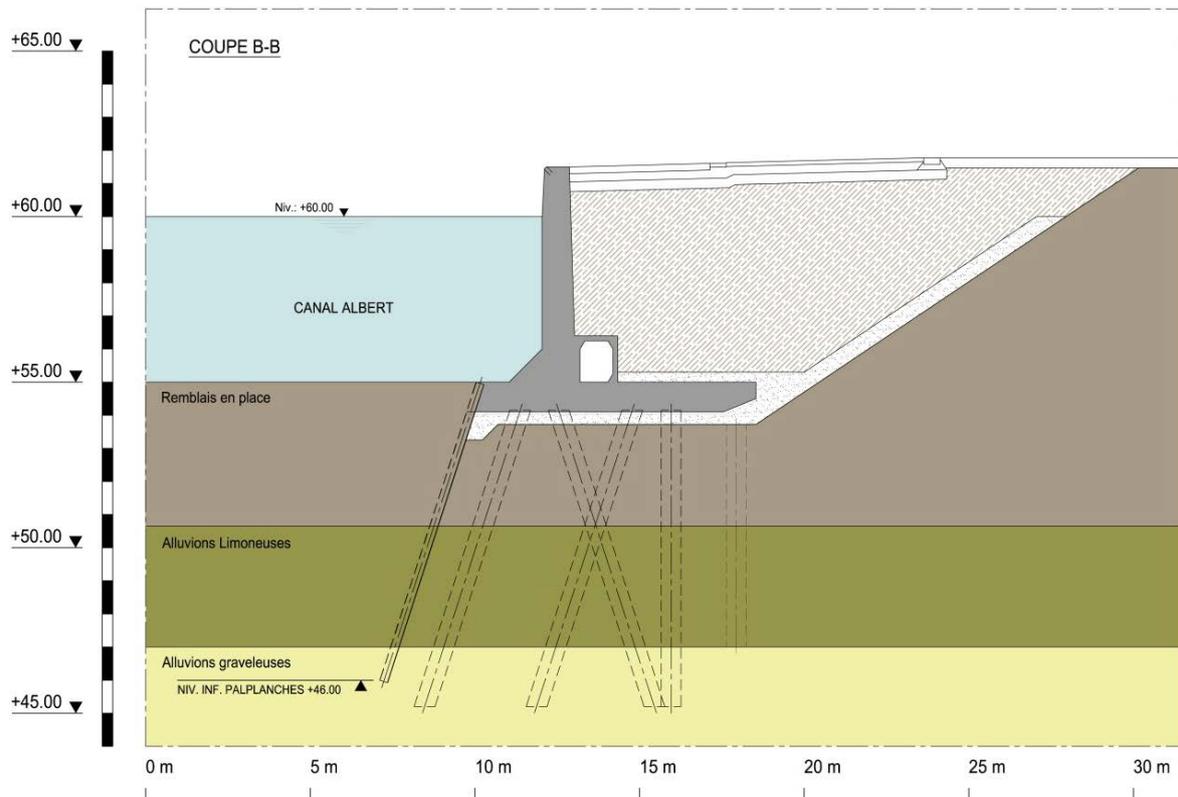


Figure 6. Mur de quai existant à l'amont

En rive gauche, entre Lixhe et Lanaye, le canal est creusé à la base du flanc ouest de la vallée (Figure 5). Il est pourvu d'un perré incliné ou de murs de quai en béton. Un parafouille incliné, du même type que celui de la rive droite, empêche la communication des eaux entre le canal et le sol.

Derrière les structures de rive, un drain-pertuis récolte toutes les eaux, en particulier celles des ruisseaux et rivières venant du plateau, e.a. le ruisseau de *La Loën*. Ce pertuis de rive gauche passe sous la branche campinoise du canal à l'entrée de la Tranchée de Caster pour aboutir dans le Canal de Lanaye, quelques dizaines de mètres à l'aval des deux petites écluses.

3.2. Les circulations d'eau souterraine entre le Canal Albert et le Canal de Lanaye

Entre la branche campinoise du Canal Albert et le Canal de Lanaye, sous le promontoire de la Montagne Saint-Pierre qui a été progressivement entaillé au cours

des travaux d'aménagement de la confluence et autour du complexe des deux petites écluses de 600 tonnes, des circulations d'eau dans le sol se sont très vite manifestées.

Les raisons essentielles de ces circulations sont les suivantes :

- le relèvement du plan d'eau à l'amont des deux écluses a accentué le gradient hydraulique de l'eau dans le sol entre l'amont et l'aval,
- l'étanchéité du fond du canal, en section courante, est constituée par un corroi en limon, qui peut s'avérer sensible à l'érosion.
- sous le corroi, les niveaux de craie, essentiellement subhorizontaux, facilitent les circulations d'eau souterraine,
- la craie plus ou moins altérée renferme un important réseau de fissures liées e.a. au développement de phénomènes karstiques,
- la présence du puits de la Loën, sous le Canal Albert, constitue un axe de drainage préférentiel des eaux souterraines.

D'importants désordres sont apparus :

- des tassements différentiels de plusieurs centimètres du sol et du dallage en surface aux abords des écluses,
- des déformations et des venues d'eau au travers des bajoyers des écluses, observées lorsqu'elles étaient en position basse,
- la formation périodique de trous au fond du Canal Albert, avec érosion du corroi, nécessitant des comblements par apport de béton pompé
- des venues d'eau au travers de l'imposant mur de berge aval, au pied de la Montagne Saint-Pierre.

Après une étude géotechnique détaillée comprenant des sondages géotechniques et de la prospection géophysique, d'importants travaux d'étanchéité ont été menés à l'amont du site éclusier (Figure 7).



Figure 7. Travaux d'étanchéité

Une fois la zone concernée mise à sec, sous la protection de batardeaux en palplanches, on a procédé successivement :

- à l'enlèvement du corroi existant,
- au remaniement du tuffeau et à l'enlèvement des silex apparents au fond du terrassement,
- à la pose d'une couche de sable,
- à la pose d'une membrane d'étanchéité,
- au bétonnage d'une dalle en béton au fond et sur les berges du canal,
- au confortement du sol autour des écluses,

Tous ces travaux ont été menés avec la contrainte d'assurer la navigation en permanence.

Ces travaux ont permis de solutionner durablement les phénomènes intempestifs de circulation d'eau souterraine à la confluence du Canal Albert et du Canal de Lanaye.

3.3. Les circulations d'eau souterraine entre le Canal Albert et la plaine alluviale

Les travaux de construction de la 4^{ème} écluse de Lanaye (2012-2015) ont été réalisés à l'abri d'enceintes étanches permanentes ou temporaires, fichées jusque dans la craie :

- rideaux provisoires ou définitifs (servant alors comme parafouille) de palplanches métalliques dans le bief amont et dans le bief aval,
- parois moulées dans le sol et tirantées pour le sas de la nouvelle écluse et la CHSP (Centrale Hydroélectrique et Station de Pompage) réalisée entre les 3^{ème} et 4^{ème} écluses.

L'épuisement des fouilles a été réalisé par un réseau de puits de pompage recoupant l'entièreté de la couche d'alluvions sablo-graveleuses. Ce dispositif était placé à l'intérieur des enceintes étanches.

Si le rabattement dans les fouilles s'est déroulé correctement par rapport aux prévisions, des venues d'eau localisées, parfois importantes, ont été observées :

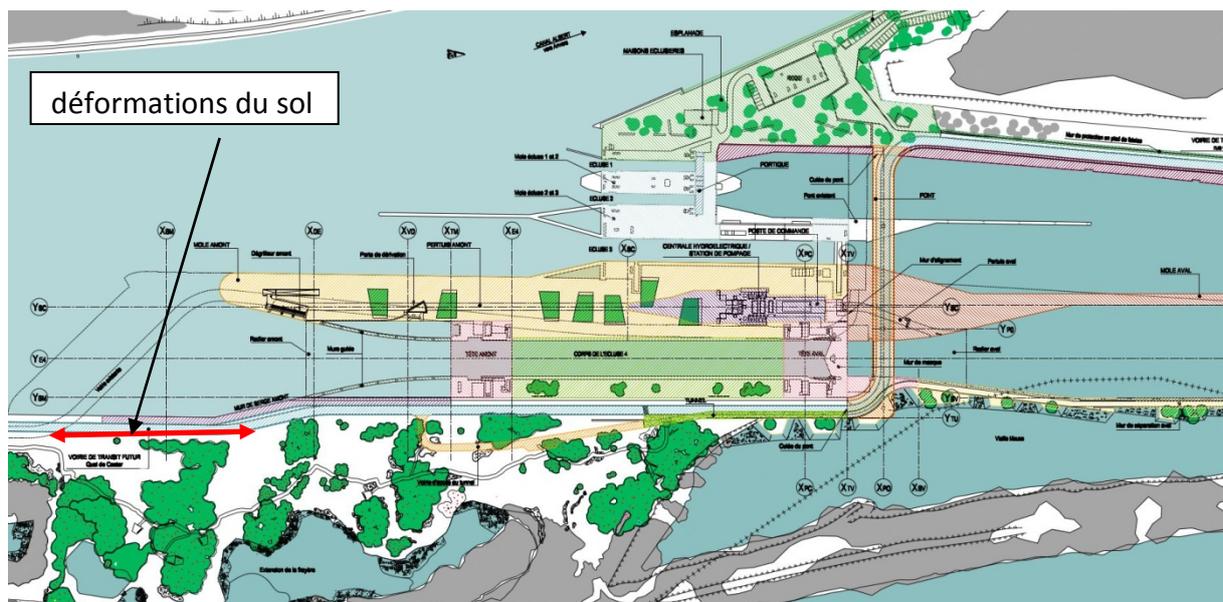
- lors de la réalisation de plusieurs tirants d'ancrage, il a été nécessaire d'injecter le sol au niveau des têtes d'ancrage pour arrêter les venues d'eau dont les débits atteignaient parfois, plusieurs litres par seconde. Ces phénomènes ont particulièrement été marqués en rive gauche, dans la paroi moulée la plus proche de la 3^{ème} écluse.
- lors de la réalisation de la CHSP, des venues d'eau ont été observées au fond de la fouille réalisée à l'abri de la paroi moulée d'enceinte. Pour réaliser le bétonnage correct du radier de l'ouvrage, il a été nécessaire de réaliser quelques puits de décharge, en fond de fouille.

Beaucoup de ces venues d'eau étaient localisées à proximité de la 3^{ème} écluse dont l'étanchéité des ouvrages (bajoyers, drains périphériques, parafouilles) s'était sans doute détériorée avec le temps, malgré des travaux réguliers de rénovation.

Durant tout le chantier, plusieurs piézomètres équipés de sondes automatiques de mesures à télétransmission, principalement localisés entre les ouvrages préexistants

et la 4^{ème} écluse, ont permis aux différents intervenants (Maître d'Oeuvre, Bureaux d'Etudes internes et externes et de Contrôle technique, Entreprises) de suivre en temps réel les évolutions des niveaux piézométriques et des écoulements d'eau souterraine et de prendre les mesures nécessaires pour la sécurité des travaux et des ouvrages. Le suivi piézométrique fut particulièrement utile et nécessaire pendant la phase de terrassement et de construction du bajoyer gauche de la 4^{ème} écluse au droit de la CHSP déjà réalisée, alors soumise à des poussées horizontales dissymétriques.

Immédiatement après la mise sous eau de la zone du Canal Albert à l'amont de la 4^{ème} écluse (juin 2015), des mouvements verticaux et horizontaux du sol se sont manifestés sous la nouvelle voirie longeant le mur de quai en rive droite à l'approche de l'écluse (Figure 8).



niveau de la voirie. La localisation de ces désordres, à proximité immédiate de la jonction entre le nouveau mur de quai conduisant à la 4^{ème} écluse et un ancien mur de quai, construit lors de la réalisation de la 3^{ème} écluse, en prévision déjà de la 4^{ème}, laisse supposer un point de faiblesse dans l'étanchéité du corroi et/ou des ouvrages de berge dans cette zone. Les solutions durables à apporter sont en cours d'étude.

4. Conclusion et remerciements

Dans un environnement complexe, en présence d'une géologie assez hétérogène et sur un site profondément remanié par l'homme au cours du temps, la modélisation précise des écoulements d'eau dans le sol est rendue très difficile.

Dans le cas présenté, les études géotechniques préliminaires ont été complétées par un suivi instrumental particulièrement adapté avant, pendant et après les travaux, en suivant les principes de la méthode observationnelle préconisée dans l'Eurocode 7.

Je remercie tous les intervenants sur ce projet, au niveau des travaux du génie civil :

- la Direction des Voies hydrauliques de Liège
- le Bureau d'Etudes Greisch s.a.
- l'Entreprise Besix s.a.
- le Bureau de Contrôle technique Semaco

et bien sûr mes collègues de la Direction de la Géotechnique pour m'avoir permis de rassembler ici les principaux éléments liés aux "sournoiseries de l'eau dans le sol sur le site de la 4^{ème} écluse de Lanaye à Visé (Belgique)".