

# L'eau dans le sol : amie ou ennemie ? (3<sup>ème</sup> partie)

## ABSTRACT

### The water in the ground: friend or enemy? (1st part)

*In terracing and construction work, water generally constitutes a hindrance or obstacle that is difficult to combat. Water flows over ground surfaces (examined in the study of hydrology) and underground (hydrogeology).*

*In this article, Christian Archambault and Francis Bardot exclusively focus on hydrogeology, initially summarizing the natural water cycle and describing water as having been in permanent circulation between the sky and the land over millions of years. Then, through a brief summary of French hydrogeology, the two authors present us with a science that, in its modern inclination, developed at the end of the last century at the same time as the emergence of water resource management (replenishing groundwater, catchment areas...). Lastly, Christian Archambault and Francis Bardot examine the laws on groundwater flows, with a specific focus on measuring permeability and ground soil properties.*

« **L'** eau coule de ville en ville, les bateaux la labourent, elle rend la terre fertile et, sous le soleil brûlant, tu te jettes dans ses bras et elle apaise ta soif. Elle sait aussi tuer avec une sûreté infail- lible. Insaisissable et changeante, l'eau est à l'image de la vie: elle est cruelle comme elle et enchanteresse comme elle »<sup>1</sup>.

## Les sinistres ou dysfonctionnements liés à l'hydrogéologie

### Préambule

Comme déjà vu dans les parties précé-

<sup>1</sup> La création du monde, Jean d'Ormesson.

**Christian Archambault**

Ingénieur hydrogéologue ENSG (École nationale supérieure de géologie)

Expert honoraire près la Cour d'appel de Lyon

**Francis Bardot**, Ingénieur civil des Mines

Expert honoraire agréé par la Cour de cassation

Lors des travaux de terrassement et de construction, l'eau constitue généralement une gêne, voire un obstacle contre lequel il est difficile de lutter. L'eau s'écoule à la surface du sol (l'eau est alors l'objet d'étude de l'hydrologie) et à l'intérieur du sol (elle est l'objet d'étude de l'hydrogéologie). Dans cet article, Christian Archambault et Francis Bardot s'intéressent exclusivement à l'hydrogéologie, en retraçant d'abord le cycle naturel de l'eau. Ils décrivent ainsi cette eau en circulation permanente, depuis des milliards d'années, entre ciel et terre. Puis, les deux auteurs nous présentent grâce à un bref rappel historique l'hydrogéologie française, une science qui s'est développée, dans son acception moderne, à la fin du siècle dernier en même temps que l'essor de la gestion des ressources d'eau (réalimentation des nappes, bassin versant...). Enfin, Christian Archambault et Francis Bardot exposent les lois d'écoulement de l'eau dans le sol, en s'intéressant notamment aux mesures de la perméabilité ou aux propriétés des sols vis-à-vis de l'eau.

dentés, les problèmes liés à la présence d'eau affectant les chantiers de génie civil, bâtiments et travaux publics, ainsi que les ouvrages finis en service sont très nombreux. Nous n'évoquerons ici que quelques cas particuliers mais, toutefois, souvent rencontrés dans la pratique et liés à la circulation d'eau souterraine. Nous excluons donc les problèmes liés à l'hydrologie de cours d'eau et les inondations qui s'en suivent, étant rappelé qu'il existe bien évidemment des communications et des échanges entre l'eau de surface et l'eau souterraine et donc des interactions.

### Terrassement des plateformes

Qu'il s'agisse de la construction d'un

ouvrage d'art ou d'un bâtiment, quelle que soit sa destination, ou de tous autres travaux qui nécessitent de modifier la surface du terrain naturel (création de route, voie ferrée, etc.), on commence par des travaux de terrassement, en déblai si on retire des terres ou en remblai si, au contraire, on apporte des terres.

Le bon déroulement des travaux sera étroitement lié à la nature des sols qui seront entaillés ou rapportés, ainsi qu'à leur teneur en eau.

Dans tous les cas, bien sûr, les plateformes ainsi constituées devront être conçues de telle sorte que les eaux de surface d'origine

Mots-clés: Argile; Cycle de l'eau; Débit; Écoulement; Évacuation; Hydrogéologie; Hydrologie; Intensité; Nappes souterraines; Perméabilité - ST, C, 18, 03.

météorique ne stagnent pas et soient évacuées vers l'extérieur.

Dans le cas de mise au jour de sols rocheux ou gravelo-sableux, la présence d'eau n'est pas très gênante car, compte tenu de leur perméabilité qui est souvent élevée, ces sols sont quasiment insensibles et auto-drainants.

Il n'en est pas de même pour les sols argileux susceptibles de retenir une quantité d'eau importante qui va conditionner leur comportement mécanique, comme nous l'avons vu précédemment dans le chapitre 3 du présent article.

La teneur en eau va donc constituer un paramètre extrêmement important pour réaliser les travaux aussi bien en déblai qu'en remblai de manière satisfaisante. Nous allons examiner les deux cas.

#### **Cas du déblai**

Si le sol argileux est sec, il aura une consistance solide et les travaux vont pouvoir se dérouler de manière satisfaisante, les engins de terrassement pourront se déplacer et évoluer sans problème.

Si la teneur en eau augmente, l'argile va acquérir un comportement plastique et le passage des engins de terrassement va aboutir à la formation d'ornières difficiles à maîtriser, ce que l'on appelle l'effet de matelassage.

Si la teneur en eau augmente encore plus, alors l'argile va acquérir un comportement liquide et une consistance de boue. Le chantier va rapidement devenir complètement impraticable.

#### **Cas du remblai**

Le matériau argileux qui va être apporté sur le terrain naturel doit être mis en place en procédant à des opérations de compactage. Leur objectif est, d'abord, d'obtenir la meilleure densité possible pour éviter tout risque de tassements dans le temps sous l'effet du poids propre et de surcharges d'exploitation, et aussi de diminuer la perméabilité du remblai et les risques d'infiltration d'eau.

On procède alors à un essai extrêmement important dénommé Proctor qui consiste, en laboratoire, à trouver la teneur en eau optimale, dite Optimum Proctor, qui aboutit à la densité sèche optimale.

Pour les sols argileux, la forme de la courbe est très pointue, ce qui signifie que, dès

que l'on s'éloigne de la teneur en eau optimale d'1 ou 2 % par exemple, alors la densité sèche correspondante n'est pas satisfaisante.

À titre comparatif, pour un matériau gravelo-sableux, on s'aperçoit que la forme de la courbe est beaucoup plus plate, ce qui signifie que, même si l'on s'éloigne de la teneur en eau optimale de plusieurs points, on obtient encore une densité sèche satisfaisante.

En conséquence, si la réalisation de travaux de terrassement dans le cas de sols rocheux ou gravelo-sableux perméables dépend peu des conditions météorologiques, en revanche, il n'en est pas de même pour les sols argileux. Pour ces derniers, soit on évitera de travailler au cours de périodes météorologiques défavorables, soit, si l'on n'a pas le choix, il faudra procéder à des opérations permettant de diminuer la teneur en eau naturelle par traitement de l'argile à l'aide de liants hydrauliques tels que la chaux ou le ciment qui absorbent une partie de l'eau excédentaire.

#### **Effets de la sécheresse sur les sols argileux**

Pour toutes les raisons exposées déjà ci-avant, la teneur en eau d'un sol argileux influe sur son comportement, de solide si elle est faible, à liquide, au contraire, si elle est trop élevée.

Ces changements d'état s'accompagnent de variations volumétriques. L'argile va gonfler si la teneur en eau augmente et, au contraire, va se rétracter si celle-ci diminue.

Ce phénomène de gonflement-retrait en fonction de la teneur en eau peut donc provoquer des mouvements des fondations de bâtiments légers posés en surface. En effet, ces variations de volume s'effectuent

de manière non uniforme sur la surface du bâtiment et il s'ensuit des mouvements différentiels des fondations et l'apparition de fissures dans la construction.

Ce phénomène était bien connu dans les régions tropicales. Mais, du fait du changement climatique, il affecte aussi maintenant les régions tempérées et notamment la France depuis 1976, surtout depuis le début des années 1990. Ce phénomène peut aboutir à un classement en catastrophe naturelle dans le cadre de la loi du 13 juillet 1982. Pour cela, il faut que le sinistre fasse l'objet d'un arrêté ministériel, à la suite de la demande émanant d'abord du maire de la commune sinistrée, puis du préfet. L'assureur multirisques habitation doit alors indemniser les victimes à la suite d'une expertise amiable ou, éventuellement, judiciaire en cas de refus motivé. En cumulé, depuis le début des années 1990 et à ce jour, le montant total versé par les compagnies d'assurance s'élève environ à plus de 6 milliards d'euros, ce qui constitue le plus important sinistre dans le domaine de la construction.

On remarquera que, bien souvent, d'autres causes que le phénomène de retrait-gonflement des argiles ont joué dans la survenance du sinistre et que le classement en catastrophe naturelle peut être contestable. On se reportera pour cet aspect à l'excellent article de notre confrère Paul Vandangeon paru dans la Revue Experts n° 119 (avril 2015).

#### **Stabilité des versants naturels et des talus**

Sous l'effet de la pesanteur et de l'action des phénomènes d'altération physico-chimique et d'érosion, tout terrain en pente tend vers l'horizontale ! Lorsque l'on étudie la stabilité d'un talus artificiel, en déblai

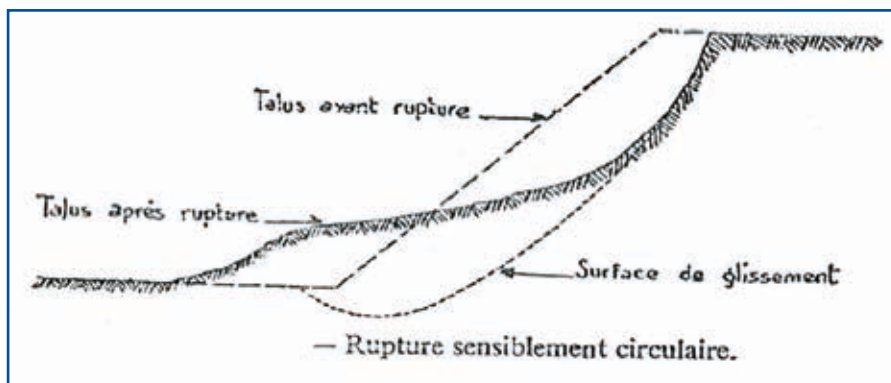


Figure 20.

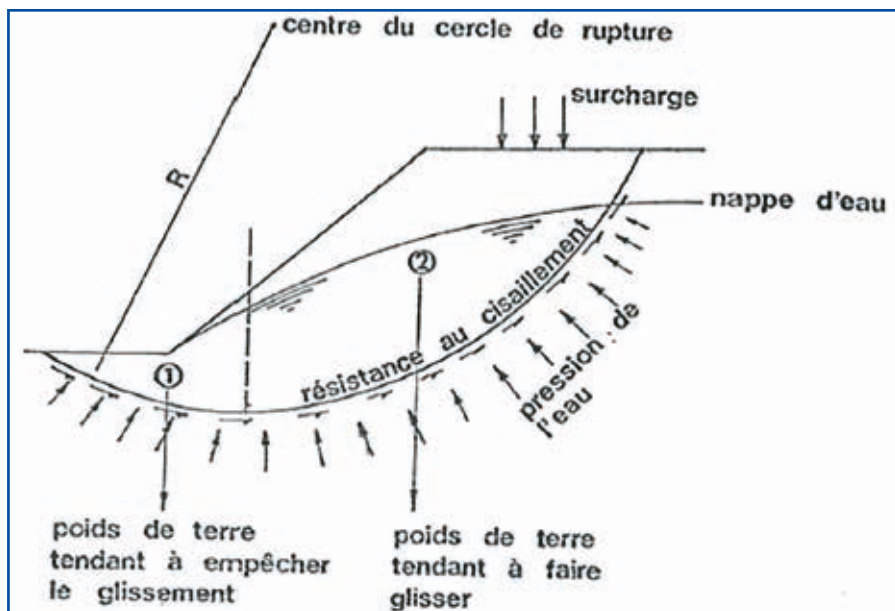


Figure 21.

ou en remblai, ou d'un versant naturel, on considère qu'un volume de terrain en mouvement ou susceptible de l'être est délimité par une surface de rupture souvent de forme grossièrement circulaire (figure 20). Ce volume, qui va avoir tendance à glisser en fonction des forces qui lui sont appliquées, peut être divisé en deux parties séparées par la verticale qui passe par le centre du cercle supposé (figure 21). Ces deux parties vont alors se comporter comme les deux plateaux d'une balance en fonction des poids qui seront ajoutés ou soustraits à droite ou à gauche. Si l'on apporte une surcharge en tête de talus, ceci aura un effet déstabilisateur, de même

si l'on retire une partie du pied du talus pour créer une plateforme horizontale, par exemple. En revanche, si l'on apporte du poids au pied du talus (banquette de terre ou risberme), ceci aura un effet positif. Mais, il ne faut évidemment pas oublier le rôle de l'eau qui, notamment par l'effet des pressions interstitielles et le ramollissement des couches argileuses, a tendance à accroître le risque de glissement. Dans ces problèmes de stabilité de pente, les circulations d'eau souterraine jouent donc un rôle essentiel. L'expérience du tonneau de Pascal (figure 22) consiste à remplir d'abord d'eau un tonneau de 200 litres de contenance. Puis, on dispose au sommet du tonneau un tube de 10 m de hauteur et de 1 cm<sup>2</sup> de section que l'on remplit progressivement d'eau. Il apparaît qu'à partir d'une certaine hauteur, le tonneau va éclater malgré l'apport d'une quantité d'eau

dérisoire, un litre maximum, par rapport à celle contenue par le tonneau lui-même. C'est ce qui se passe dans la nature lorsque le niveau de l'eau monte dans le terrain d'une manière uniforme dans un sol relativement perméable ou par circulation privilégiée dans les discontinuités affectant un massif rocheux (faille, fracture, diaclase...).

Pour toutes les raisons exposées ci-avant, il n'est pas étonnant que, dans la plupart des cas, les sinistres liés à la stabilité des versants (effondrements de talus, glissements de terrain, etc.) se produisent au cours ou à la suite de périodes météorologiques très défavorables. C'est le cas du grand glissement de terrain survenu en Guyane en avril 2000 et qui a provoqué la mort de 10 personnes (voir la figure 23). Et, en conséquence, l'amélioration de la stabilité d'un versant ou d'un talus implique des travaux de drainage pour extraire le maximum d'eau du terrain, en complétant si nécessaire par la réalisation d'ouvrages mécaniques (mouvements de terre, substitution de matériaux argileux par des matériaux gravelo-sableux, tirants d'ancrage précontraints ou clous passifs).

### Barrages en terre

Comme les barrages en béton, les barrages en terre permettent de stocker de l'eau aux fins de différents usages: stockage d'eau pour alimentation humaine, industrielle ou irrigation, énergie hydroélectrique, bassins de loisirs, écrêtement de crues, etc. Ces ouvrages ne sont pas rigoureusement

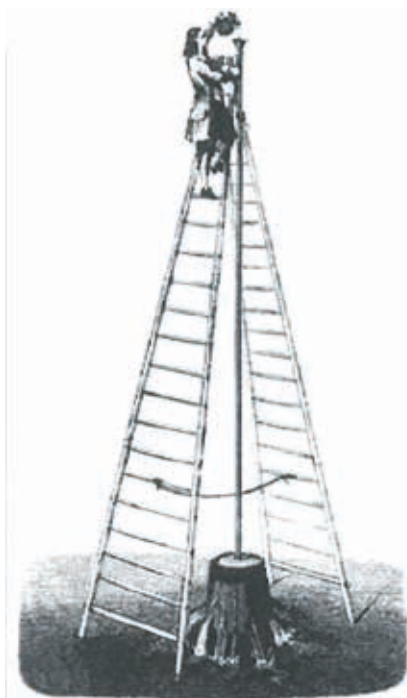


Figure 22. Une illustration du tonneau de Pascal tirée de "Les Forces de la nature" d'Amédée Guillemine.



Figure 23. Grand glissement de terrain survenu en Guyane en avril 2000.

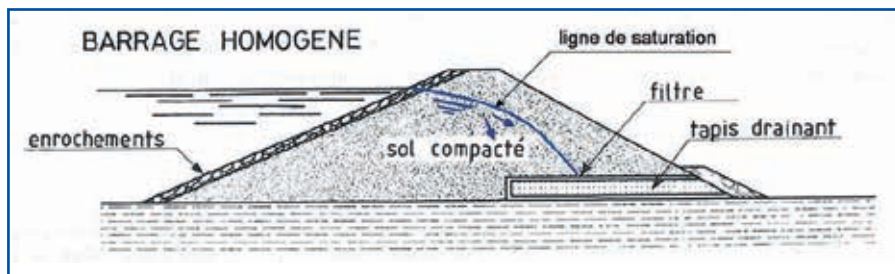


Figure 24.

étanches sauf en cas de mise en œuvre d'un noyau ou d'un parement amont en matériaux imperméables. En conséquence, de l'eau va pouvoir percoler à travers le corps du barrage de l'amont vers l'aval et il va ainsi s'instaurer un réseau d'écoulement. Il faut éviter que la surface piézométrique intercepte le talus aval au-dessus de sa base à l'aide de dispositifs de drainage tels qu'un tapis drainant par exemple (figure 24). En cas d'absence d'un tel dispositif, ou de son inefficacité, les lignes de courant vont intercepter le talus. La force d'écoulement s'exerçant sur les grains du sol va alors produire un entraînement des particules les plus fines, aboutissant à la création de vides évoluant de plus en plus vers l'amont. C'est le phénomène de renard évoqué ci-avant qui peut évoluer très rapidement, en quelques jours, voire en quelques heures, et aboutir à la ruine de l'ouvrage. C'est ce qui s'est passé en décembre 2000 sur le barrage de la figure 25 construit sur le Territoire de Belfort et intégré dans un système de bassins d'écroulement de crues. Il s'est rompu au cours de la première mise en eau, provoquant l'inondation à l'aval de trois villages et de sites industriels très importants. Remarquons que le cas des barrages en terre est intéressant puisqu'au droit du même ouvrage l'eau est à la fois amie à l'amont, stockage d'eau, et ennemie à l'aval, si le risque de renard n'est pas pris en compte et se réalise!

### Barrages en béton

Malgré leur apparence de solidité inspirant confiance, ces ouvrages sont également sensibles aux phénomènes hydrogéologiques pouvant affecter leurs fondations. L'eau qui percole sous le barrage, si faible soit son débit, exerce une pression qui tend à le soulever, c'est la sous-pression, toujours le tonneau de Pascal. Ceci est vrai dans les sols, mais aussi le long des discontinuités naturelles pouvant affecter un substratum rocheux sous les appuis, voire à l'intérieur du corps des barrages. C'est ce qui s'est produit sous la fondation en rive gauche du barrage de Malpasset où



Figure 25.

le massif rocheux (gneiss) était découpé par deux discontinuités formant un coin et alimenté par l'eau de la retenue (figure 26). Cet accident dramatique a provoqué le 2 décembre 1959 la mort de 423 personnes et des dégâts matériels considérables. Les investigations effectuées après l'accident ont montré qu'il existait une structure géologique défavorable qui n'avait jamais été identifiée précédemment et donc passée inaperçue : sous l'aile rive gauche du barrage, la conjonction d'une faille mineure à l'aval et d'une foliation bien marquée de la roche a permis l'individualisation d'un dièdre susceptible de glisser sous les poussées combinées de la voûte et de la sous-

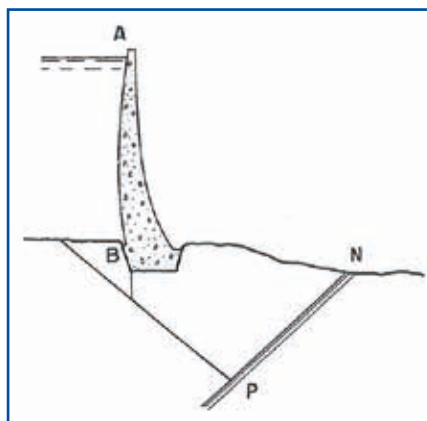


Figure 26. Barrage de Malpasset, coupe schématique du barrage et du sous-sol sur la rive gauche.

pression de l'eau.

Le scénario de rupture a fait intervenir aussi une propriété découverte au laboratoire sur la roche du site : la très forte dimi-

nution de la perméabilité lorsque l'éprouvette est confinée ; une barrière étanche se forme pour cette raison sous le barrage, qui va recevoir la quasi-totalité de la poussée des écoulements souterrains, un phénomène inconnu jusqu'alors.

En l'espèce, aucune faute ou erreur n'a été reprochée aux constructeurs à l'issue d'une longue procédure qui s'est terminée à la fois devant le Conseil d'État et la Cour de cassation. Depuis, évidemment, des études géologiques très approfondies sont imposées pour les chantiers de construction de barrages et l'État a créé le Comité technique des grands barrages qui instruit tous les dossiers pour des barrages de hauteur supérieure à 30 m, qu'ils soient en béton ou enterré.

### Fouilles profondes

La rareté et le coût des terrains dans les grandes villes, et les besoins croissants d'utiliser l'espace souterrain notamment pour le stationnement, amènent à creuser des fouilles de plus en plus profondes, parfois jusqu'à 10 niveaux de sous-sol enterrés, et ceci le plus souvent dans la nappe phréatique.

Ceci est le cas dans la ville de Lyon pour laquelle l'histoire des parkings enterrés est très intéressante.

On retiendra essentiellement que, dans la

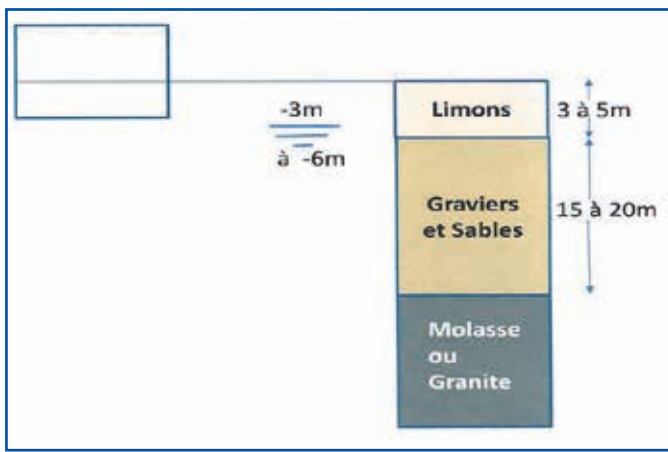


Figure 27. 1 sous-sol.

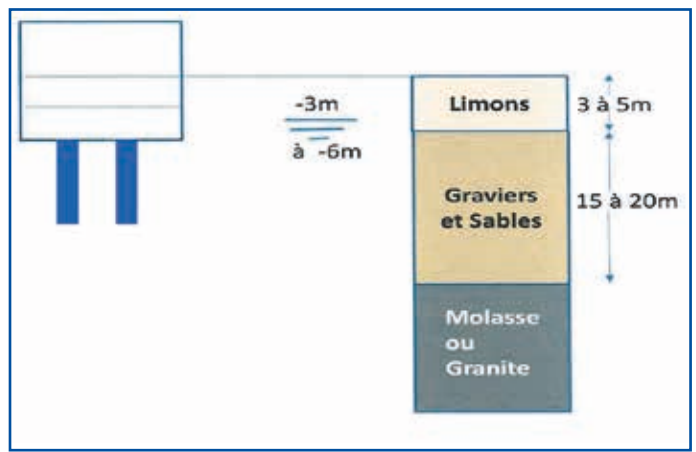


Figure 28. 2 sous-sols.

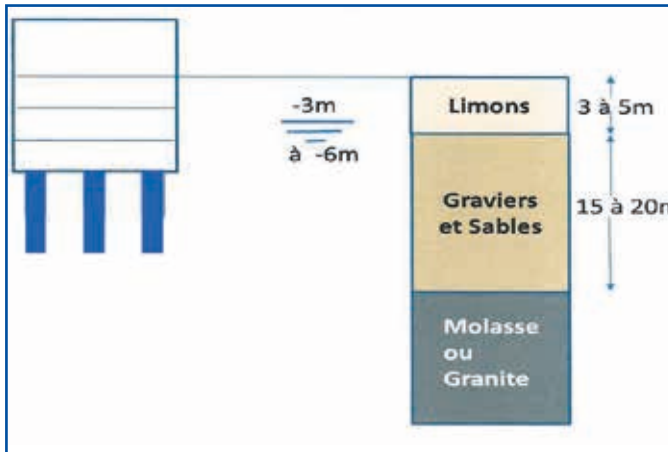


Figure 29. 3 sous-sols.

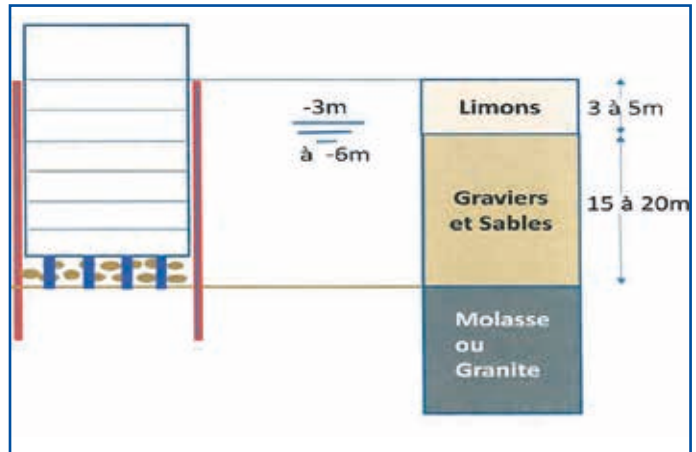


Figure 30. 4 à 6 sous-sols.

partie est de la ville au pied des collines de Fourvière et de la Croix-Rousse, la coupe de sol comporte 3 à 5 m de limons puis 15 à 20 m de graviers et sables, et enfin le substratum constitué par la molasse (sable fin plus ou moins consolidé), ou le granite. Le toit de la nappe phréatique fluctuant a une profondeur comprise entre 3 m et 6 m en fonction de la distance au Rhône.

Depuis le temps des Romains, on ne réalisait qu'un niveau de sous-sol à usage de cave situé au-dessus du toit de la nappe phréatique; il n'y avait pas de problème (figure 27).

Dans le courant des années 1950 à 1960, pour des besoins de stationnement, on a commencé à réaliser 2 sous-sols (figure 28). Si la nappe était atteinte, on pompait avec des puits traditionnels assez espacés car le rabattement pouvait être obtenu facilement du fait de la perméabilité des graviers et sables ( $10^{-2}$  à  $10^{-3}$  m/s).

Au début des années 1980, on a commencé à réaliser 3 sous-sols (figure 29). Le fond de la fouille était donc dans la nappe phréatique et on continuait à rabattre avec des gros puits et des débits élevés.

Puis, progressivement, compte tenu des débits très élevés et de la hauteur des terres qu'il fallait soutenir avec 4 à 6 sous-

sols, on a réalisé des parois moulées dans le sol fichées dans le substratum de molasse ou de granite afin de réduire les débits (figure 30). Mais il subsistait encore en fond de fouille un matelas de graviers et sables permettant un rabattement de nappe dans des conditions satisfaisantes.

Au début des années 1990, le nombre de sous-sols a encore augmenté pour atteindre 7 ou 8 et, en fond de fouille, on a mis au jour, dans le quartier de la Part-Dieu, la molasse (figure 31). Au début, on poursuivait le pompage à l'aide de forages (puits) de diamètre pluri-décimétrique creusés dans l'aquifère molassique, mais qui étaient très espacés comme dans les alluvions. Le premier parking d'une telle profondeur est celui du nouveau Palais de justice.

Des problèmes ont alors été rencontrés à cause de manifestation de boullance en fond de fouille qui s'explique par le fait que le réseau d'écoulement obtenu, avec une charge hydraulique importante supérieure à 15 - 16 m, entraînait en fond de fouille des gradients ascendants verticaux dépassant la valeur critique de 1 (figure 32). On avait oublié que la molasse, bien que beaucoup moins perméable que les graviers et sables, n'est néanmoins pas rigoureusement imperméable (perméabilité de  $10^{-4}$  à

$10^{-5}$  m/s au lieu de  $10^{-2}$  à  $10^{-3}$  m/s pour les alluvions constituées de graviers et sables). Les forages étaient trop espacés.

Cette première expérience a permis d'éviter le problème pour la fouille profonde suivante exécutée pour le parking de la gare Part-Dieu où, sur une surface de 8 000 m<sup>2</sup> environ, une centaine de forages de petit diamètre (de l'ordre de 15 cm), drainants et actifs avec pompage, ont été réalisés, ce qui permettait de rabattre la nappe phréatique sous le niveau du fond de fouille et donc d'éviter les gradients ascendants verticaux néfastes (figure 33).

Mais, la nature humaine étant ce qu'elle est, sur plusieurs fouilles profondes suivantes, les constructeurs, estimant que les forages drainants étaient trop chers et que le débit d'exhaure était légèrement augmenté, ont voulu abandonner les puits drainants (figure 34). À nouveau, des problèmes de boullance et de renard en fond de fouille ont été rencontrés! À ce jour, toutefois, les diverses expériences ainsi rencontrées ont amené les constructeurs à plus de prudence et à revenir à la solution des forages drainants (appelés aussi parfois drains de décharge).

#### Ouvrages de soutènement

Dans le cadre de travaux d'aménagement et

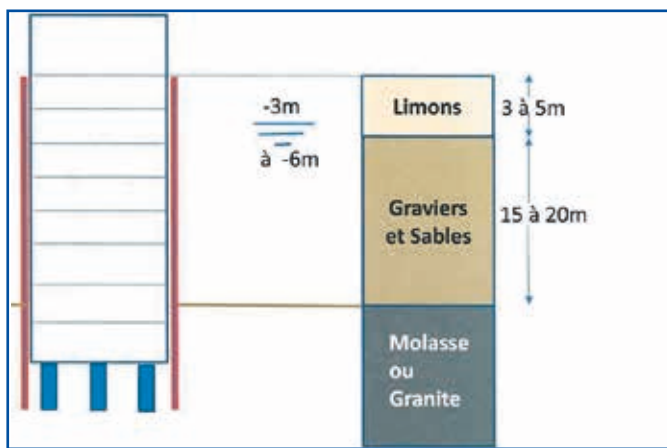


Figure 31. 7 à 8 sous-sols.

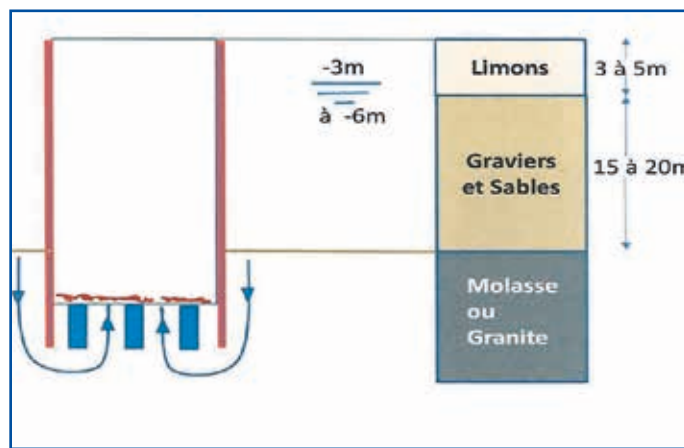


Figure 32. Boullance en fond de fouille.

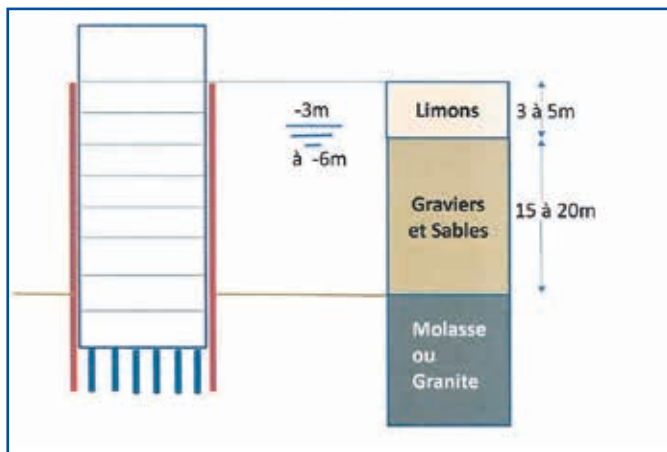


Figure 33. Forages drainants.

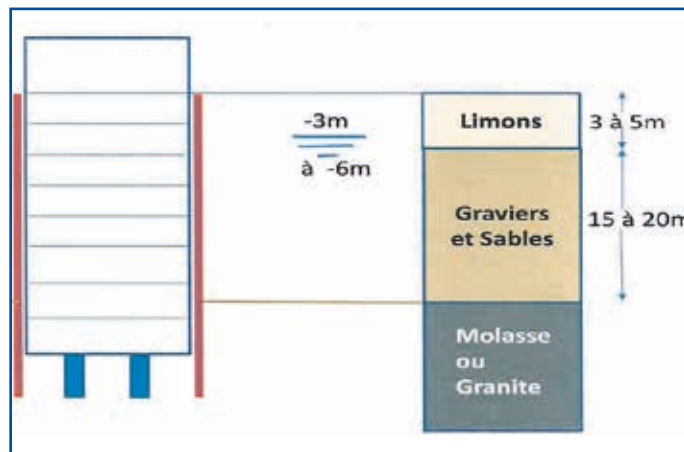


Figure 34. Retour en arrière.

de terrassement, aussi bien en déblai qu'en remblai, s'il ne s'avère pas possible de réaliser des talus trop raides pour des raisons de limites de propriété, d'emprise ou de stabilité, on réalise alors des ouvrages qui retiennent les terrains (sols, roches ou remblais) et éventuellement l'eau.

Cette grande famille comporte des ouvrages très variés allant de simples enrochements ou murs de soutènement en maçonnerie de pierre, jusqu'à des ouvrages très complexes tels que parois moulées, parois berlinoises, parois clouées, etc.

Certains de ces ouvrages sont conçus et exécutés pour résister à la poussée de l'eau en plus de la poussée des terres. C'est notamment le cas des parois moulées évoquées ci-avant.

En revanche, les ouvrages plus simples tels que les murs en maçonnerie de pierre ou en béton armé, seraient beaucoup trop volumineux s'ils devaient retenir aussi la poussée de l'eau et devenir ainsi des barrages.

En conséquence, ces murs doivent être équipés d'ouvrages de drainage, le dispositif le plus simple et le plus ancien consistant à aménager des ouvertures appelées barbacanes à travers le mur. En cas d'absence de dispositif de drainage, ou de son inefficacité à la suite de colmatage par

exemple, il existe un fort risque de déplacement, voire d'effondrement. L'étude préalable du contexte hydrogéologique est donc fondamentale pour aboutir à un projet satisfaisant.

#### Phénomènes de dissolution

Les roches calcaires ( $\text{CaCO}_3$ ) et les roches salines, gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) et sel gemme ( $\text{NaCl}$ ), sont dissous par l'eau tant que celle-ci circule.

Si ce phénomène est très lent pour les calcaires, en revanche il peut être très rapide pour le gypse et le sel gemme, notamment si la circulation de l'eau est provoquée par des pompages et rabattements de nappe importants. Il y a alors formation de vides en profondeur qui, par effondrement progressif du toit, peuvent atteindre la surface du sol : c'est le phénomène de fontis, bien connu notamment dans la région parisienne.

#### Conclusion

L'eau, cette amie indispensable, est très recherchée pour être domestiquée, soit en surface, soit dans le sol, afin de satisfaire les besoins de l'activité humaine.

Les moyens pour rechercher et capter l'eau souterraine sont nombreux et cer-

tains ont été mis en œuvre depuis des millénaires. Les développements récents de l'hydrogéologie et des techniques de forage permettent, aujourd'hui, de satisfaire des besoins de plus en plus importants.

Mais l'eau peut aussi provoquer des problèmes parfois dramatiques dans le domaine du génie civil, tant lors de la construction que pendant la période d'exploitation d'un ouvrage. L'eau souterraine peut devenir une ennemie. Il faut alors recourir à des techniques bien maîtrisées de drainage pour supprimer ou tout au moins circonscrire ces problèmes. Ces derniers sont particulièrement importants dans les sols plus ou moins argileux dont la consistance et le comportement mécanique varient énormément avec leur teneur en eau.

Les quelques exemples présentés dans le présent article permettent de se rendre compte de la complexité et de la difficulté rencontrées dans les expertises de génie civil où l'expert géotechnicien doit absolument, dans les cas les plus complexes, se faire assister par un expert hydrogéologue. Les auteurs de cet article ont une longue pratique de cette coopération fructueuse, qui a permis d'éclairer, entre autres, les magistrats dans de nombreuses affaires souvent délicates. ■