

Rupture des remblais routiers causés par l'infiltration de l'eau

E. STILGER-SZYDŁO

*Institut de géotechnique
et hydrotechnique
Université technique
de Wrocław
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
Pologne*

Résumé

Cet article présente des problèmes de glissement survenus pendant la construction de chaussées et provoqués par l'infiltration des eaux souterraines et pluviales, ainsi que par l'érosion fluviale. Plusieurs exemples de glissement de talus et de remblais routiers illustrent l'application des dernières avancées technologiques dans le domaine de la construction et de la réparation.

Transportation engineering embankment landslides caused by water filtration

Abstract

In the paper a characteristic of landslides due to ground water filtration, falling water destruction as well as influence of river erosion is presented. Selected examples of landslides of slopes and road embankments are simultaneously illustration of the application new geoen지니어링 achievement in the process of construction of embankments as well as their renewal.

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 1^{er} avril 2007.

Introduction

En Pologne, le problème de la prévention des glissements des ouvrages routiers en terre, causés par l'infiltration de l'eau, reste d'actualité. Des travaux de grande envergure, réalisés dans le domaine du génie civil de transport, touchent de plus en plus des terrains caractérisés par des conditions géologiques compliquées. Il est alors indispensable d'appliquer des méthodes spéciales de renforcement des sols et des ouvrages. Il faut aussi proposer de nouvelles technologies de fondations. On observe aussi de nombreuses destructions et catastrophes concernant les ouvrages routiers en cours d'exploitation. Elles sont provoquées par l'action destructrice des eaux phréatiques, pluviales, des inondations, ainsi que par l'érosion fluviale. Les éboulements et les glissements des talus et des remblais routiers (survenus sous forme de glissements, de fluage, de niches d'arrachement) entraînent l'apparition de grandes zones à l'état limite, ce qui provoque le tassement irrégulier de la plate-forme du remblai, des effondrements locaux et des mouvements latéraux de la chaussée. Enfin, cela risque d'entraîner des éboulements locaux des talus et des dommages au revêtement de la route.

Les dispositions légales et les règlements ne sont toujours pas élaborés, tout comme les normes se rapportant aux travaux de conception, pour l'étude ainsi que pour l'exécution des ouvrages garantissant la sécurité des talus situés dans les terrains à risque géodynamique ou à leur proximité. Cela concerne surtout les terrains glaci-tectoniques, exposés aux déformations dues à l'infiltration d'eau. Ce problème n'a pas été résolu par les Eurocodes (Eurocode 7, 1997 ; Orr et Farrell, 1999).

Dans cette étude, on présente des cas d'éboulement dans la construction de chaussées qui ont été provoqués par l'infiltration des eaux souterraines et pluviales ainsi que par l'érosion fluviale.

Causes des glissements routiers

Les glissements et les éboulements de talus peuvent survenir durant les travaux de terrassement, pendant l'exécution des remblais ainsi que pendant l'exploitation des ouvrages routiers. Ces phénomènes apparaissent lorsque, le long d'une surface continue de forme quelconque du talus, la valeur des efforts de cisaillement dépasse la résistance au cisaillement du sol. La diversité des formes d'éboulement est fonction de la complexité des facteurs qui les entraînent. Incontestablement, l'augmentation de la fréquence des phénomènes d'éboulement est liée à la morphologie et à la structure géologique du terrain. En Pologne, les zones les plus exposées à l'éboulement sont les régions des montagnes et à proximité des montagnes (région des flysch des Carpates, des enfoncements avant les Carpates), les talus des grandes vallées fluviales, les falaises de la côte Baltique. Les éboulements surviennent le plus souvent dans les terrains argileux, en zones de contact entre des argiles d'éluvion et des limons, dans les éluvions et les formations de loess ainsi qu'en zone de contact loess et marnes.

Les ruptures de talus et de remblais routiers surviennent sur la totalité du territoire national, et ils ne sont pas toujours causés par la morphologie et la structure géologique. Citons d'autres causes fréquentes de rupture :

- le voisinage des processus géodynamiques intenses, surtout glaci-tectoniques et des processus d'éboulement ainsi que des terrains miniers ;
- la structure géotechnique défavorable de l'assise et des talus artificiels et des pentes naturelles avec présence d'argiles stratifiées (souvent avec inclinaison dans la direction du pied du talus ou vers la rivière limitrophe), après quoi surviennent, en règle générale, les glissements et l'évacuation des eaux souterraines et pluviales ;
- l'impact de l'infiltration des eaux souterraines et des eaux d'inondation, ainsi que de l'érosion fluviale ;
- l'érosion des surfaces des talus causée par les conditions atmosphériques et l'influence du climat (des précipitations intenses, des gels, ainsi que l'imbibition et la dessiccation du sol) ;
- des charges dynamiques (trafic routier) ;
- des erreurs de conception lors de l'élaboration des projets d'ouvrages en terre : fondation des remblais constitués de sols pulvérulents sur des argiles, des alluvions, sur sols compressibles, des karsts, des terrains exposés aux déformations dues à l'infiltration, manque d'assainissement correct et d'évaluation globale de la sécurité des ouvrages (stabilité des talus, charge limite et tassement de l'assise et du corps de l'ouvrage) ;
- l'exécution défectueuse (emploi de sols non appropriés pour ériger des remblais, compactage insuffisant, inclinaison des talus trop raide, choix des technologies de travaux incompatible, inexistence du système de drainage) ;
- des négligences durant l'exploitation (mauvaise exploitation et réparation, désordres entraînés par l'activité humaine, impact dévastateur des ouvrages érigés - construction des ouvrages qui modifient les conditions d'hydrogéologie, configuration et charge du terrain, systèmes d'assainissement non étanches).

Impact des forces d'infiltration sur la stabilité des ouvrages

Méthodes d'évaluation de la stabilité des talus

L'évaluation de la stabilité des ouvrages routiers en terre constitue une tâche complexe. En effet, il est très difficile de déterminer les paramètres qui caractérisent le talus (physiques, mécaniques, géométriques) ; les méthodes de calcul existantes sont également imparfaites. Parmi les méthodes théoriques de dimensionnement des talus, basées sur la théorie de la plasticité, les méthodes de l'état limite des contraintes et de l'équilibre limite sont prédominantes. Parmi les méthodes de première catégorie, les solutions statiques apportent une valeur inférieure de la charge limite et du coefficient de stabilité d'un ouvrage en terre (Stilger-Szydło

et Kisiel, 1980). Les solutions fondées sur la cinématique conduisent à des valeurs supérieures ; c'est cette dernière approche qui a été choisie dans cette étude (Stilger-Szydło, 2003).

Dans la pratique courante, on applique des méthodes d'approximation qui placent l'état limite sur certaines surfaces du glissement localisé. Ces méthodes permettent une évaluation de la stabilité des talus qui serait comprise dans l'intervalle des limites inférieure et supérieure. Ces méthodes admettent un certain mécanisme de déformation ou de rupture et analysent le système de forces lié à ce mécanisme, par exemple méthode de Fellenius, Bishop, Janbu (Bishop, 1955 ; Bishop et Morgenstern, 1960 ; Janbu, 1987 ; Spencer, 1967). Dans les calculs, on utilise les caractéristiques géotechniques moyennes. Le coefficient de sécurité global, calculé comme une relation entre le moment résistant et le moment moteur, est la valeur qui permet d'évaluer la stabilité du talus.

Dans la méthode des tranches de Fellenius, élaborée pour une surface de glissement cylindrique, le coefficient de sécurité de remblais est donné par la relation :

$$F = \frac{\sum [W_i(\gamma) + W_i(\gamma_{sr})] \cos \alpha_i \tan \phi'_i + \sum c'_i l_i}{\sum [W_i(\gamma) + W_i(\gamma_{sr})] \sin \alpha_i} \quad (1)$$

$W_i(\gamma)$ est le poids de la tranche « i » au-dessus de la nappe phréatique ;

$W_i(\gamma)$ et $W_i(\gamma_{sr})$ désigne le poids de la tranche « i » au-dessous de la nappe phréatique ;

c'_i , ϕ'_i sont les paramètres effectifs de résistance ou cisaillement (cohésion du sol et l'angle de frottement interne du sol) ;

γ , γ' et γ_{sr} sont les poids volumiques du sol au-dessus la nappe (γ) et au-dessous de la nappe (γ' et γ_{sr}) ;

l_i est la longueur de la surface de glissement dans la tranche « i » ;

α_i désigne l'angle d'inclinaison entre la base de la tranche et l'horizontale.

Dans la méthode de Bishop, on considère que les forces agissantes sur les faces latérales des tranches délimitées sont horizontales et par conséquent leurs projections sur le plan vertical sont nulles. En prenant en compte les moments résistants et les moments moteurs (pour la totalité des tranches), le coefficient de sécurité du massif est calculé d'après la formule :

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n [c'_i b_i + (W_i - u_i b_i) \tan \phi'_i] \cdot \left[\frac{1}{M_i(\alpha)} \right]}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i} \quad (2)$$

$$M_i(\alpha) = \left[1 + \frac{\tan \phi'_i \tan \alpha_i}{F} \right] \cos \alpha_i$$

où :

u_i désigne la pression interstitielle déterminée au centre de la longueur de la base de la tranche i,

b_i est la largeur de la tranche.

Puisque le coefficient de stabilité apparaît dans les deux côtés de l'équation (2), il est déterminé à l'aide de la méthode d'approximations successives jusqu'à ce que les résultats convergent. Une longue pratique de l'auteur de cette étude a démontré que les valeurs minimales des coefficients de stabilité obtenues grâce à

l'équation (1) sont inférieures de quelques pourcents aux valeurs fournies par l'équation (2).

3.2

Analyse de stabilité des talus saturés

Le régime des eaux agissant sur les pentes dans le sous-sol des remblais et dans les corps de remblais constitue l'un des plus importants facteurs concernant la stabilité de ces ouvrages. Les précipitations, l'eau qui passe par le versant ou les eaux d'infiltration traversant le corps du talus, modifient les caractéristiques physico-mécaniques des terrains en entraînant une surcharge supplémentaire sur le squelette solide du sol dirigée dans la direction du courant, appelée forces hydrauliques. C'est surtout la composante horizontale de ces forces qui agit sur la partie non étayée du talus, et exerce une influence négative sur la stabilité. Théoriquement, la façon correcte de prendre en compte l'influence des forces hydrauliques consiste à introduire des composantes de cette pression dans les équations d'équilibre du sol. En règle générale, ces équations prennent la forme suivante :

$$\sigma_{jij} + \gamma_i + \gamma_w H_{,i} = 0, i, j = 1, 2 \quad (3)$$

où le premier terme concerne l'état de contraintes du sol, le deuxième les forces de volume et le troisième, les forces hydrauliques. Dans le cas d'une infiltration, la charge hydraulique H satisfait l'équation de Laplace ($\nabla^2 H = 0$).

Cette approche de détermination des interactions sol-fluide dans l'ouvrage en terre consiste à calculer les forces hydrauliques et le poids volumique du squelette solide du sol en prenant en compte la poussée d'Archimède dans la zone située au-dessous de la nappe phréatique. Une autre approche pour déterminer l'effet hydraulique le long de la ligne de cisaillement est fréquemment utilisée pour évaluer la stabilité à l'aide des méthodes approximatives des tranches. Elle consiste à déterminer la pression de l'eau dans les pores du sol en admettant que la saturation totale se situe au-dessous du niveau d'eau.

Le coefficient de sécurité des talus saturés est beaucoup plus faible que celui du sol sec. Ceci est confirmé par des résultats obtenus par l'auteur de cette étude pendant de nombreuses analyses de talus et remblais routiers dans la région de la Basse Silésie après l'inondation de 1997. Ils amènent l'auteur à constater que les talus sont stables pour une inclinaison $\alpha < \phi'_u = 0,9 \phi_u$ dans le cas des talus sans infiltration et $\alpha < 0,5 \phi_u$ dans les talus saturés (où ϕ_u est l'angle de frottement interne du sol, ϕ'_u - sa valeur effective).

Les conséquences de l'action des eaux d'inondation sur les talus et les remblais routiers sont beaucoup plus dangereuses que l'action exercée par les nappes phréatiques ou les précipitations. Ce qui est décisif dans ce cas, c'est la quantité, la vitesse et le temps pendant lequel l'eau reste sur un ouvrage routier. Il faut souligner aussi l'importance de la quantité des impuretés qui se déplacent avec une grande vitesse avec le courant des rivières. La sécurité des ouvrages routiers en terre est surtout compromise, pendant et après l'onde de crue, par les sous-sols susceptibles de subir des déformations dues à l'infiltration, processus variables (comme inféoflux, colmatage, érosion interne, liquéfaction, percement ou rupture par sous-pression, affaissement des fontis (karstiques) ou consolidation d'infil-

tration). Ces sols voient leurs caractéristiques mécaniques et physiques modifiées.

Durant les six dernières années, le Sud-Ouest de la Pologne a connu beaucoup de phénomènes de glissements de talus et de remblais routiers entraînant de graves détériorations des chaussées et des ouvrages de proximité.

4

Éboulement du remblai routier entraîné par infiltration d'eau

4.1

Localisation des éboulements

Nous présentons l'exemple d'une catastrophe provoquée par la présence d'eau dans un talus. Elle a eu lieu en avril 1997 sur le site de la centrale hydroélectrique de Dychów. Cette localité est située en aval de la rivière Bóbr, affluent gauche de l'Odra. Cette centrale de pointe à pompes comprend la chambre d'arrivée de la centrale (appelée « fermeture d'eau ») avec le canal d'arrivée d'eau, les tuyauteries de refoulement et local des machines ainsi que le canal d'évacuation de l'eau des turbines à eau. Les conditions géologiques difficiles du talus au bord de la rivière, où on a installé les ouvrages, nécessitaient une protection spéciale en pied de talus et de la « fermeture d'eau » (Von Pussel et Pester, 1938).

Le glissement du talus routier a eu lieu sur la route nationale Dychów-Lubsko-Żary (à partir du kilomètre 1,627 jusqu'au kilomètre 1,687). A l'emplacement de l'éboulement, un réservoir journalier est localisé, dont la capacité totale est de 4 000 000 m³ et la surface est de 1,0 km². Le fond de la cuvette de ce réservoir a été rendu étanche par une mince couche d'argile (0,2 m) à cause de l'existence de sous-sol perméable fait de sables et de cailloutis. Le glissement a eu lieu tout près du mur de la chambre d'arrivée et tout près du bord de la fondation de la tuyauterie. La profondeur de rupture était de 8 à 10 m. Le sol qui a glissé (environ 15 000 m³) a provoqué la destruction d'une soixantaine de mètres de mur de bâtiment abritant les turbines de la centrale hydroélectrique et a fait beaucoup de dégâts à l'intérieur du bâtiment et dans sa proximité.

4.2

Structure géologique du terrain

Le terrain qui a glissé est situé morphologiquement sur la Wysoczyzna Gubińska (haut plateau de Gubin),

non loin du confluent de la rivière Bóbr et de l'Odra. La zone analysée est construite dans des formations tertiaires se trouvant à une petite profondeur sous les sédiments quaternaires ou situées sur la surface – dans la proximité des hauts plateaux ou dans des zones voisines avec des vallées de rivières. Le Tertiaire est représenté par des argiles, avec des couches stratifiées de glaises. Le Quaternaire est fait de deux niveaux d'argile de halde et des sables et cailloutis hydroglaciaires. D'importants changements de puissance des couches d'argiles à blocs sont associés aux perturbations glaci-tectoniques. A la surface du terrain, il y a une couche de sable. La disposition des niveaux des eaux phréatiques est complexe. Il y a eu deux niveaux d'eau, dans les formations tertiaire et quaternaire, présentant localement des contacts. Après la réalisation des ouvrages hydrotechniques et du rideau de palplanches, des perturbations supplémentaires locales du régime des eaux sont apparues.

On peut constater, d'une manière générale, que des ouvrages de la centrale hydroélectrique ainsi que des remblais de la route ont été implantés dans des conditions de sol défavorables. Les sols ont présenté une grande diversité et de nombreuses couches stratifiées. C'est l'infiltration de l'eau dans le talus routier, en provenance du réservoir journalier non étanche qui a été la cause directe du glissement. Elle a été amplifiée par les conditions défavorables des sols sous les fondations de la centrale, de la « fermeture d'eau » du réservoir et du remblai routier, notamment l'inclinaison défavorable des couches des sols perturbées du point de vue tectonique. Le plafond des couches de sols tertiaires cohérents, situés au pied du talus, formait ainsi une sorte de « gouttière » pour l'évacuation des eaux souterraines et des masses de sols d'éboulements quaternaires non cohérents.

4.3

Analyse de stabilité du remblai routier

Les valeurs moyennes des paramètres géotechniques, obtenues à l'aide de forages exécutés après la catastrophe, ont été retenues pour évaluer la stabilité du remblai (Tableau I).

Dans les calculs, on a pris en compte :

– deux hypothèses pour les paramètres de sols constituant le pied du talus : pour les sols cohérents de la couche 4 (Figs. 1 et 2), on a pris un angle de frottement de 18° (en accord avec les valeurs moyennes des paramètres, obtenues avec les forages réalisés après la catastrophe) et l'angle de frottement réduit de 30 % suite aux perturbations des sols dues à la tectonique (cet angle peut correspondre à la valeur constante ou résiduelle du paramètre) ;

TABLEAU I Paramètres géotechniques des sols dans la coupe transversale du glissement à Dychów.
Soil properties in landslide section in Dychów.

N° de la couche géotechnique	Nature du sol	Densité ρ (g/cm ³)	Teneur en eau w_n (%)	État du sol I_p/I_L	Angle de frottement interne φ (degré)
1	Sables de granulométrie variée	1,85	12	0,16	29
2	Sables saturés de granulométrie variée	1,95	16	0,16	32
3	Sables limoneux	1,75	28	0,10	28
4	Sols cohérents	2,05	22	0,20	18

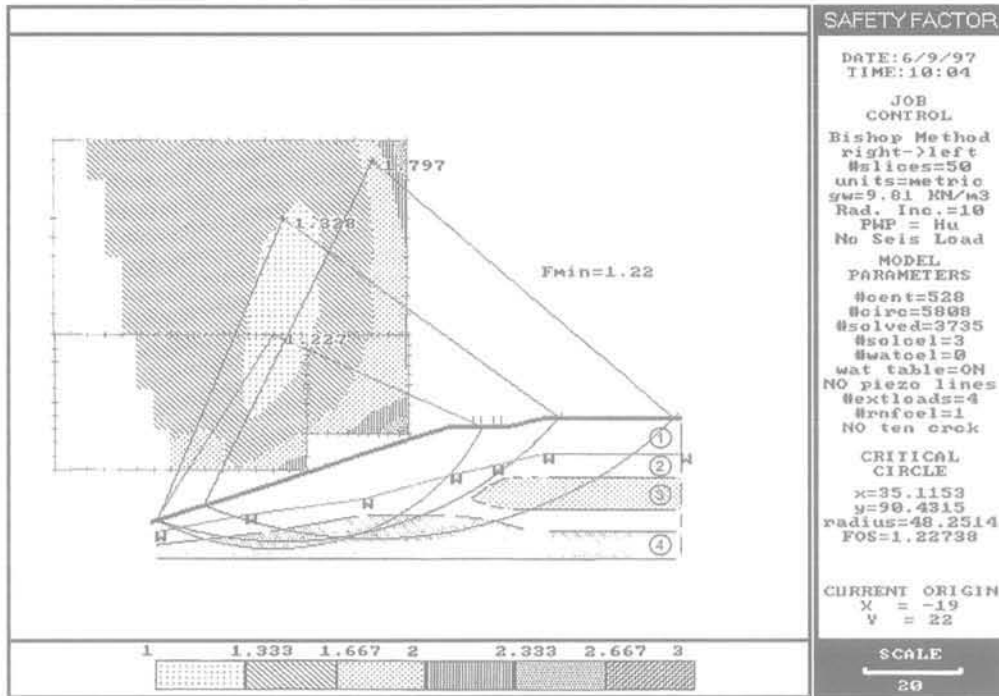


FIG. 1 Évaluation de la stabilité du remblai routier dans la coupe géotechnique I-I du glissement par la méthode de Bishop. 1, 4 : sable sec, 2 : sable humide, 3 : poussière, 5 : argile. Logiciel SLIDE v. 2.0 (HL).
Estimation of stability of road embankment by Bishop's method. Soil profile I-I (1, 4 : sand, 2 : saturated sand, 3 : dust, 5 : loam). Computer system SLIDE v. 2.0 (HL).

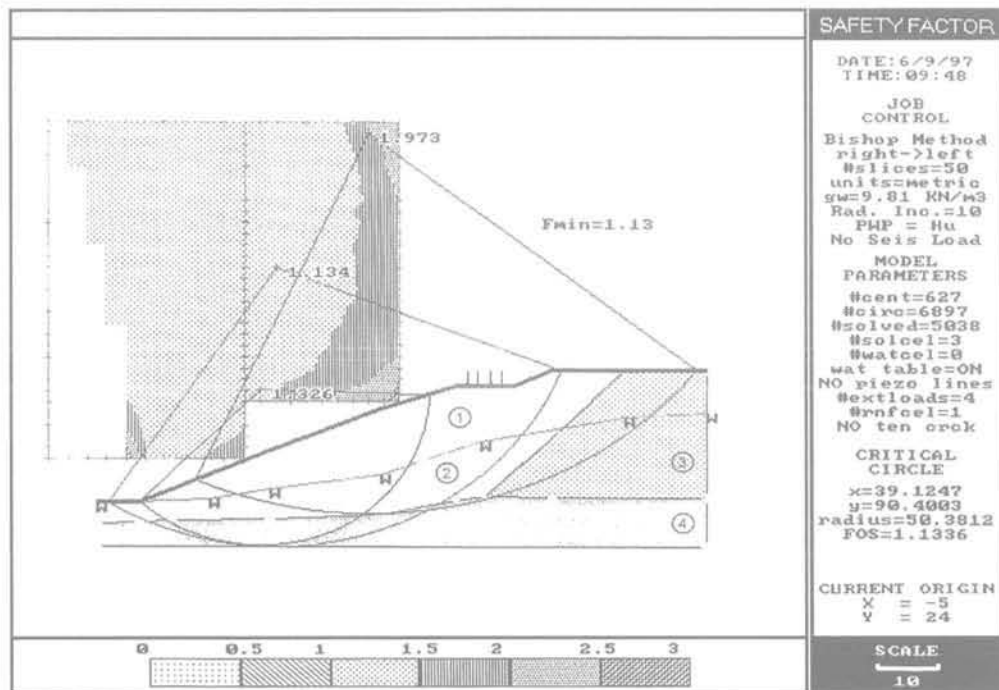


FIG. 2 Évaluation de la stabilité du remblai routier dans la coupe géotechnique II-II du glissement par la méthode de Bishop. 1, 4 : sable sec, 2 : sable humide, 3 : poussière, 5 : argile. Logiciel SLIDE v. 2.0 (HL).
Estimation of stability of road embankment by Bishop's method. Soil profile II-II (1, 4 : sand, 2 : saturated sand, 3 : dust, 5 : loam). Computer system SLIDE v. 2.0 (HL).

- la nappe phréatique dans la zone de recouvrement est considérée comme libre ;
- les sollicitations dues aux véhicules (à moteurs) sous forme de forces qui simulent les effets exercés par les roues de deux camions qui se croisent (la charge provenant d'une seule roue étant de 50 kN, et l'entraxe des essieux - 1,0 m) ;
- variantes de chargement : A) charge de départ, la charge extérieure n'est pas prise en compte tout comme la nappe phréatique ; B) on a admis la charge au niveau de la plate-forme du remblai et absence de l'eau ; C) on a admis le manque de charge au niveau de la plate-forme du remblai et influence de l'eau ; D) on a admis la charge au niveau de la plate-forme et influence de l'eau.

Les résultats de l'étude de la stabilité du remblai, réalisée avec le logiciel SLIDE v. 2.0 (HL), sont présentés dans le tableau II, pour les deux coupes les moins favorables de l'éboulement : I-I et II-II (Figs. 1 et 2). Il en résulte que l'influence de la présence de l'eau dans le talus n'est pas à négliger, tout comme la valeur du coefficient de sécurité et qu'il est fort probable que l'éboulement a été provoqué justement à cause de cela :

- les valeurs F_{min} pour la variante C laissent croire qu'avec ($F_{min} < 1,3$) l'éboulement est probable et qu'avec ($F_{min} < 1,0$) il est très probable. Le fait que l'éboulement a effectivement eu lieu confirme la validité de l'analyse qui avait été effectuée et prouve que les paramètres qui ont été retenus en ce qui concerne les matériaux étaient justes ;
- les valeurs déterminées pour F_{min} de la variante de charge C montrent que les marges de sécurité n'ont pas été conservées par cet ouvrage hydrotechnique ;
- la comparaison des valeurs F_{min} pour les variantes de charge A et B ainsi que C et D démontre que l'impact de la charge exercée par le trafic routier sur la valeur minimale du coefficient de sécurité est inférieur à 1,0 % ;
- la comparaison des valeurs F_{min} pour les variantes de charge A et C montre que la présence de l'eau, dans le talus, influence fortement la valeur du coefficient de stabilité, ce qui constitue souvent la cause principale d'instabilité.

Des phénomènes tels que : montée de la nappe phréatique de la ligne d'eau dans la proximité immédiate de la centrale hydroélectrique, imbibitions et inondations des terrains avoisinants, fuites importantes de la tuyauterie installée sur le talus, fuites d'eau dans les galeries situées au-dessous des conduites sous pres-

sion, suintements de l'eau et les inféoflux dans la proximité des talus, près du « château d'eau », grands débits de l'eau pompée des trois puits qui ont été percés après que l'éboulement a été constaté, portaient déjà à croire que l'impact défavorable de cet ouvrage hydraulique ne pouvait pas être nié.

Les travaux de remise en état ont confirmé le manque de l'étanchéité de la cuvette du réservoir au bout d'une soixantaine d'années de son exploitation (une a été utilisée pour assurer l'étanchéité du fond de la cuvette du réservoir). La présence des sols non consolidés en proximité des talus et l'impact des turbines et des pompes peuvent constituer la cause de leur fluage.

4.4

Protection du glissement et étapes de reconstruction du remblai routier

Sur les figures 3 et 4, on a présenté l'étendue du glissement et la protection provisoire du site qui consistait à bétonner la zone près du pied du remblai qui a glissé, à renforcer les murs de la zone située dans la proximité du talus à l'aide d'une grille en bois posée sur une feuille en matière plastique, à observer dans les piézomètres le niveau des nappes phréatiques ainsi que dans les puits creusés à proximité pendant le pompage de l'eau.



FIG. 3 Vue du glissement du remblai routier à côté du flanc de la chambre d'entrée (« fermeture d'eau »).

View of road embankment landslide near the water lock structure of the power plant.

TABLEAU II Évaluation de la stabilité du talus routier par la méthode Bishop et Janbu. Estimation of stability of road embankment by Bishop's and Janbu method.

Variante de charge	Versions des paramètres des sols du pied du talus							
	Couche géotechnique 4 (Figs. 1 et 2) $\phi = 18$ [degré]				Couche géotechnique 4 (Figs. 1 et 2) $\phi = 5,4$ [degré]			
	Coupe géotechnique				Coupe géotechnique			
	II-II		I-I		II-II		I-I	
	Méthode		Méthode		Méthode		Méthode	
	Bishop	Janbu	Bishop	Janbu	Bishop	Janbu	Bishop	Janbu
A	1,24	1,24	1,52	1,35	1,19	1,06	1,24	1,09
B	1,24	1,24	1,52	1,35	1,19	1,06	1,23	1,09
C	1,14	0,99	1,23	1,07	0,88	0,81	0,97	0,86
D	1,13	0,99	1,22	1,07	0,88	0,80	0,96	0,88



FIG. 4 Protection préliminaire du glissement.
Preliminary protected of the landslide.

Plus tard, on a réalisé :

- un batardeau en terre avec écran d'étanchéité vertical, séparant le réservoir supérieur du canal d'entrée (le canal d'entrée a été vidé) ;
- un nouveau dispositif de protection des bords du canal d'entrée et un écran d'étanchéité pour diminuer les gradients de filtration et la quantité de l'eau de filtration passant du canal d'entrée et du réservoir supérieur au réservoir inférieur de la centrale ;
- un drainage vertical à proximité du bâtiment de la centrale.

Le revêtement de la route a été démolé sur une longueur de 50 m environ avec l'enlèvement d'une partie du sol non consolidé du remblai ; le sous-sol a été compacté avec la méthode de vibroflottation jusqu'à une profondeur d'environ 10 m. Ensuite, on a reconstruit le remblai routier, renforcé par des géotextiles en forme de grilles et on a réalisé le nouveau revêtement de la route. Les étapes importantes de cette reconstruction sont présentées sur les figures 5, 6 et 7. Avant la mise en service de l'ouvrage hydrotechnique, on a effectué des mesures de vibrations provoquées par les turbines hydrauliques et la charge provoquée par le trafic des véhicules (à moteur) sur la « fermeture d'eau » et sur le talus du remblai. On a enregistré les variations dans le temps des déplacements dynamiques en certains points de l'ouvrage.

On a aussi effectué l'estimation de la stabilité du remblai routier reconstruit. Les calculs ont été réalisés avec la méthode de Fellenius. Cette méthode permet d'évaluer la stabilité du talus stratifié, de prendre en compte la position de la nappe phréatique et des charges extérieures (statiques et dynamiques). Pour effectuer les calculs, on a utilisé les paramètres de sol, en considérant que les travaux ont été réalisés avec soin et dans le respect des règles de l'art (Tableau III).

Les calculs de stabilité ont été effectués pour deux coupes géotechniques I-I et II-II (Figs. 8, 9) et pour cinq variantes de charge :

- 1) massif de sol est chargé uniquement avec son propre poids ;
- 2) poids propre du massif de sol et nappe phréatique ;
- 3) variante 2 modifiée, prenant en compte la charge supplémentaire du massif de sol causée par les forces d'inertie dues au travail de la turbine (les composantes verticales ou horizontales des forces de gravité ont été augmentées en considérant des coefficients appropriés



FIG. 5 Travaux de terrassement de la reconstruction du remblai routier.
Earthworks in reconstruction of the road embankment.



FIG. 6 Renforcements des talus du remblai.
Reinforced road embankment.

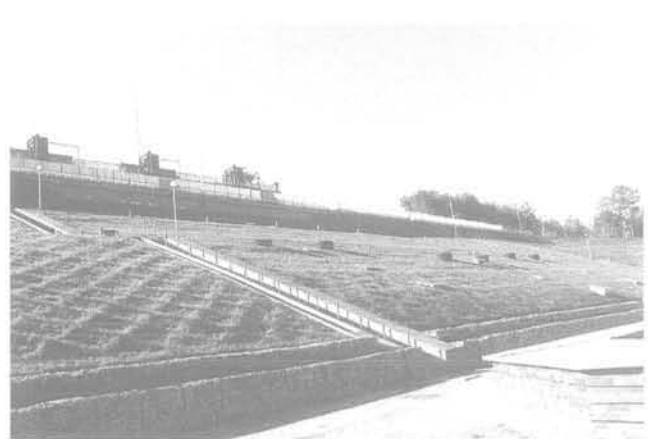


FIG. 7 Reconstruction du remblai routier et du revêtement de la route.
Embankment road after reconstruction and the road surface structure.

pour les composantes verticales et horizontales des vibrations obtenues par le biais des mesures de vibrations réalisées sur l'ouvrage) ;

- 4) poids propre, influence de l'eau, influence des forces d'inertie dues au travail de la turbine et charge de la chaussée (sous forme de quatre forces dont la valeur statique est de 50 kN disposées de la manière suivante, en partant du bord gauche de la route : 0,50 m ; 1,50 m ;

TABEAU III Paramètres géotechniques des sols dans la coupe transversale de la reconstruction du talus.
Soil properties of the embankment after reconstruction.

N° de la couche géotechnique	Nature du sol	Densité- γ (kN/m ³)	Angle de frottement interne ϕ' (degrés)	Cohésion du sol c' (kPa)
1	Sol non cohérent compacté (reconstitué)	19	38	-
2	Sol non cohérent (après vibroflottation)	19	30	-
3	Sol non cohérent en état naturel	17	30	-
4	Sol cohérent quaternaire	21	25	11
5	Sol non cohérent quaternaire	17	30	-
6	Sol cohérent tertiaire	19,5	11	50

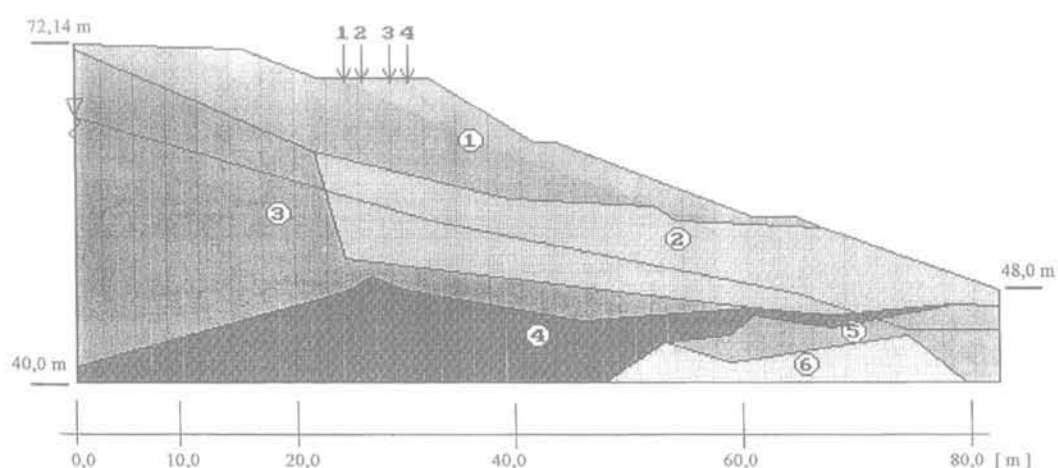


FIG. 8 Schéma de calculs pour l'estimation de la stabilité du remblai routier reconstruit (coupe géotechnique I-I).
Computational scheme for estimation of stability of reconstructed road embankment (soil profile I-I).

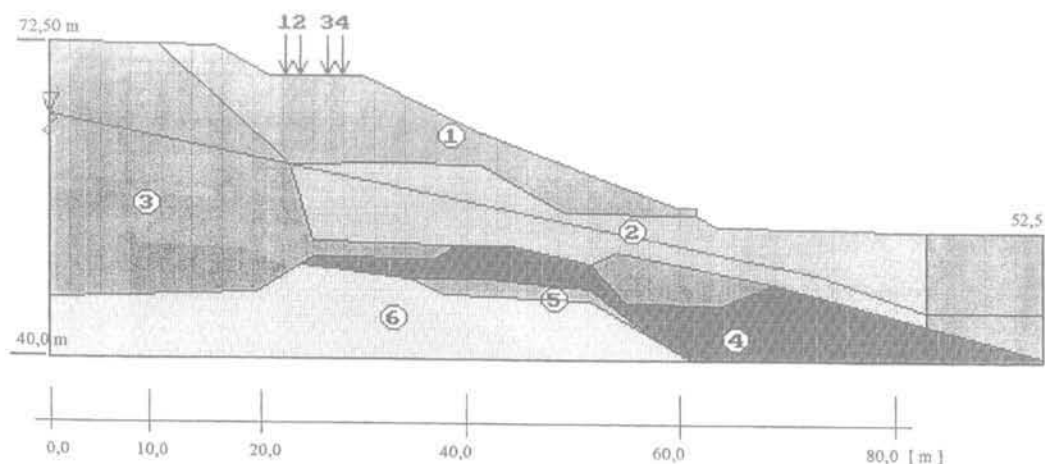


FIG. 9 Schéma de calculs pour l'estimation de la stabilité du remblai routier reconstruit (coupe géotechnique II-II).
Computational scheme for estimation of stability of reconstructed road embankment (soil profile II-II).

2,00 m ; 1,50 m ; 0,50 m ; ce qui simule deux camions qui se croisent) ;

5) variante 4 modifiée, prenant en compte la charge sous forme de quatre forces dynamique.

Les résultats des calculs sont présentés dans le tableau IV. Les études et analyses qui ont été réalisées permettent de constater ce qui suit :

- les déflexions mesurées du revêtement de la chaussée montrent que sa capacité de charge est suffisante pour pouvoir recevoir le trafic des véhicules ;
- les vibrations mesurées de « fermeture d'eau » provenant du trafic des véhicules à moteur ne sont pas ressenties par l'ouvrage ;
- les vibrations du talus provenant des camions ont été prises en compte dans l'analyse de la stabilité. L'impact de la charge routière sur les valeurs minimales du coefficient de stabilité F est inférieur à 2 ou 3 %, pour les charges dynamiques les moins favorables (passage d'un véhicule par un seuil modèle de 5 cm de hauteur simulant un revêtement qui n'est pas plan ; dans le cas du revêtement plus plat l'influence s'est avérée moins importante) ;
- avec les valeurs des paramètres de sol qui ont été prises en compte, le remblai chargé par son poids propre et par les véhicules (qui y circulent) a montré que le seuil de stabilité exigé par la réglementation des ouvrages hydrauliques est suffisant ;
- l'évaluation de la sécurité du remblai a montré que ce sont les forces hydrostatiques qui dominent et leur prise en compte (pour la nappe phréatique élevée) réduit les valeurs du coefficient de sécurité F , en dessous des valeurs autorisées par les règlements.

5

Exemples de glissements dus à l'inondation et leur protection

On présente ci-dessous quelques exemples de rupture de talus et de remblais routiers. Ils ont été sélectionnés parmi plusieurs glissements qui ont eu lieu pendant l'inondation de juillet 1997 en Basse Silésie.

5.1

Eaux d'inondation en montagne

Le glissement du talus de la route n° 45109 (à l'arrière dans la ville de Międzygórze, du côté de Bystrzyca Kłodzka) est survenu au cours de longues et importantes précipitations et de l'inondation de la région de Kotlina Kłodzka (vallée de Kłodzko). D'importantes

masses, constituant le talus au-dessous de la route, ont glissé (environ 5 000 m³). Une partie de la voie gauche de la route a été également emportée. C'est l'infiltration de l'eau dans les couches supérieures du sol et l'élévation du niveau des eaux dans les fissures des versants qui ont provoqué le glissement. Les eaux de filtration et celles qui descendent des sources (situées au-dessus de la route) dans un canal naturel, ainsi que les eaux d'inondation au courant très dynamique, ont érodé une partie du talus située au-dessous de la route. De plus, le talus était affaibli par une entaille pour tracer la route et poser une conduite hydraulique le long du flanc du talus. L'affouillement précité avait les dimensions suivantes : environ 15 m le long de la route et environ 9 m dans le talus.

Après, les événements se sont succédé très vite. Il y a eu un glissement du sol saturé sur la route ; le fossé situé sur le côté de la route a reçu le sol mais son volume n'était pas suffisant, ensuite le niveau d'eau a monté, le mur de soutien dont l'assainissement était défectueux a été rompu et le glissement s'est produit sur une largeur de 8 à 18 m (le long de la route) et d'une hauteur d'environ 60 m.

Avant la reconstruction définitive de la route, on a commencé des travaux ayant pour but d'améliorer l'assainissement de l'accotement supérieur et du fossé de la route. Provisoirement, une conduite a été posée dans le fossé latéral dont le diamètre était de 0,6 m et on l'a enterrée avec une couche d'éclats de claveaux (0,15 à 0,20 m), on a obtenu ainsi de la place pour l'élargissement de la route et la déviation provisoire. Le dispositif antiglissement a consisté avant tout à protéger le pied du talus à l'aide d'un système de gabions. Les paniers des gabions sont réalisés de fil en zinc et remplis de pierres provenant des rochers. Des murs de soutènement au-dessus de la route ont été réalisés sur une longueur de 7 m (partie gauche de la route Domazków-Międzygórze, Fig. 10), des constructions de stabilisation au-dessus de la route sur la longueur de 45,5 m (partie droite de la route), une ceinture de drainage. Le corps de chaussée a été entièrement reconstruit.

5.2

Eaux d'inondation stagnantes. Inondation de longue durée d'un remblai routier

Ce cas concernait la destruction du revêtement et du remblai de la route nationale n° 338 (Lubiąż-Kawice) du kilomètre 35,500 jusqu'au kilomètre 37,755. On a observé, pendant l'inondation, des talus affouillés, des trous dans des remblais et des accotements, des failles longitudinales dans le revêtement et

TABLEAU IV Résultats des calculs de la stabilité du talus routier reconstruit.
Stability evaluations of reconstructed road embankment.

Variante de charge	Coupe géotechnique I-I		Coupe géotechnique II-II	
	$m = 1/F$	F	$m = 1/F$	F
1	0,611	1,637	0,644	1,553
2	0,974	1,027	0,973	1,028
3	0,980	1,020	0,978	1,022
4	1,003	0,997	1,012	0,988
5	1,017	0,983	1,026	0,974



FIG. 10 Glissement du talus de la route n° 45109 à Międzygórze : construction de la protection du talus routier à l'aide d'un système des gabions.
Embankment landslide of road n° 45109 in Międzygórze. The road embankment is protected by gabions system.



FIG. 11 Glissement sur la route nationale n° 338 (Lubiąż-Kawice) : caractère des destructions du revêtement de la chaussée.
Embankment landslide in the national road n° 338 (Lubiąż-Kawice). The nature of road surface distortions.

le remblai, des défauts, des pertes, des effritements, des nids de poules dans le revêtement ainsi que le glissement (surtout sur le tronçon situé 150 m avant le pont sur la rivière Cicha Woda, affluent gauche de l'Odra). Sur la voie de droite (dans la direction de Lubiąż) sont apparues sur le revêtement des fissures longitudinales accompagnées d'une faille atteignant 0,3 m (Fig. 11). Ces défauts sont présents sur une longueur de 60 m. Les dégâts de la voie de gauche étaient semblables, à environ 140 m du pont, sur une longueur d'à peu près 15 m. A l'endroit où sont apparus les fissures importantes et le glissement, on a fait des forages géotechniques. Dans le pied du remblai (dont la hauteur varie de 2,2 à 3 m) directement sous le revêtement, on a constaté les couches suivantes : sables graveleux argileux et des sables graveleux sur une hauteur d'environ 2 m, puis des argiles sur une hauteur de 0,5 à 2 m et, enfin, des sables. Autre élément défavorable, le fait que le talus était initialement prévu pour des voies ferrées et que, plus tard, il a été élargi pour supporter une route. Pour les travaux d'élargissement, on a souvent employé des sols à forte teneur en argile. Le glissement des sols pulvérulents et saturés du remblai sur une couche d'argile constituait la cause directe de la rupture du remblai et d'une partie du revêtement de la chaussée. La reconstruction de la plate-forme routière consistait à enlever le remblai ancien et la couche d'argile, à construire un nouveau remblai renforcé par des géotextiles.

5.3

Ruptures des ouvrages routiers en terre durant leur exploitation après l'inondation

L'impact destructif des précipitations sur les ouvrages routiers en terre peut être illustré par l'exemple du talus routier de contournement de la ville de Zielona Góra (route nationale n° 3, km 291,900) (Fig. 12). Les constatations suivantes ont été effectuées :

- le glissement s'étend sur une longueur d'environ 15 m côté droit du talus (directions de Szczecin), caractérisé par des fissures sur toute la surface du remblai, le changement de sa géométrie initiale ;
- le début de la rupture s'est produit à 6 m de l'endroit cité ci-dessus (dans le sens opposé).

Les glissements survenus ont été provoqués par un drainage insuffisant du talus routier saturé par les précipitations atmosphériques et par les eaux d'inondation. Par suite de la saturation des talus, le risque d'accroissement progressif du déplacement du talus était aggravé par la présence de couches d'argile sous les sols pulvérulents constituant le corps du remblai. Les conditions géotechniques du sous-sol étaient complexes à cause de l'existence de multiples phénomènes glaci-tectoniques et à cause d'une grande variabilité des paramètres physiques et mécaniques des formations.



FIG. 12 Vue de glissement du talus routier sur le contournement de Zielona Góra.
View of road embankment landslide placed in the bypass of Zielona Góra.



FIG. 13 Vue du trottoir enfoncé du remblai routier côté amont du canal de Nysa Łużycka.
Depression view of the embankment from the side of channel of Nysa Łużycka of Nysa Łużycka river.

L'évaluation globale de la stabilité du talus montre une variation du coefficient de sécurité F autour de l'unité (1,14 à 1,05), ce qui prouvait que la rupture du talus pouvait se produire.

L'état de glissement sur les deux tronçons du talus de la route périphérique et la crainte de saturation par l'eau ont nécessité la réalisation des travaux pour éliminer des suites de la rupture et de protéger la surface du talus contre une nouvelle rupture. Ces travaux consistaient à :

- nettoyer le fossé et drainer longitudinalement la vase située sous le fossé dans la zone des glissements ;
- éliminer les restes du sol provenant du talus qui a glissé et mettre en place, au pied du talus qui a glissé, un rang de gabions (sur la longueur d'environ 40 m) sur une couche du béton maigre dont l'épaisseur est de 20 cm ;
- réparer le talus qui a glissé en utilisant des géotextiles en forme de grilles en polyéthylène de grande densité.

5.4

Impact de l'érosion des rivières sur l'instabilité des talus

Cette catégorie de dégâts est illustrée par un remblai routier dont le talus qui longe le canal de la rivière Nysa Łużycka à Pieńsk. Il est constitué par deux remblais dont la hauteur varie de 3,5 à 4,0 m. Le remblai sous la chaussée est stabilisé, mais, dans la zone des trottoirs, on a constaté que des parties du remblai ont été construites avec des sables et cailloutis non consolidés. Une détérioration du remblai et un glissement du trottoir se sont produits sur une largeur de 2 m au-dessus du remblai d'annexe ajouté et le soubassement de la bordure de chaussée. La largeur de la partie enfoncée était d'environ 1 à 1,2 m, la profondeur de la dislocation est d'environ 0,2 à 0,4 m sur une longueur de 39 m (Fig. 13).

Dans des coupes localisées dans la zone du trottoir enfoncé, de la rue et du remblai routier affaissé, des conditions géotechniques complexes sont apparues : remblais non consolidés avec un angle de frottement égal à l'angle des talus, érosion importante de la rivière (surtout pendant les périodes des crues), niveau de

nappe phréatique dans le talus variable (percé à la profondeur 2,35 m au-dessous de la plate-forme du remblai actuel reconstruit). L'existence d'une couche de sable moyennement consolidé dans la partie basse du corps du remblai touchant directement les berges du canal et couvrant en même temps le sous-sol d'argile poudreuse moyennement compactée, a donné une explication de la rupture des talus. Les fluctuations du niveau d'eaux de la rivière pourraient constituer la cause directe des glissements locaux du corps et de la tête de remblai et provoquer l'effondrement de la plate-forme routière.

Les résultats des calculs de la stabilité du talus aval dans la zone d'affaissement du trottoir, réalisés pour le niveau actuel de l'eau dans la rivière (schéma A) ainsi que pour le niveau probable dans le canal durant la période d'inondation (schéma B), ont montré une très probable possibilité de glissement. Les valeurs minimales du coefficient de sécurité étaient de : $F_{\min} = 1,025$ (schéma A), $F_{\min} = 0,884$ (schéma B). Cette conclusion a été confirmée par l'apparition du glissement du remblai, le tassement de la tête, et par conséquent les dommages sur le trottoir dans la rue. La stabilité du talus a été compromise par l'action destructrice des eaux du canal de la rivière en provoquant l'érosion dans la direction des sables non consolidés du remblai et du sous-sol non compacté. Les fluctuations du niveau de nappe phréatique entraînées par le changement du niveau des eaux de la rivière ont provoqué, ces dernières années, les tassements d'un talus non consolidé du remblai et sa séparation du talus antérieur. Seule la végétation sur le nouveau talus freinait le processus de son glissement.

La protection de la zone de glissement a été effectuée par battage d'un rideau des palplanches du type Larssen. Il a été jugé que c'est l'unique moyen du point de vue technique, pour couper l'arrivée de l'eau du canal de la rivière et pour protéger contre l'infiltration de l'eau souterraine dans la direction du remblai. Le rideau de palplanches a été placé à environ 4 m du bord de la route (bordure du trottoir) sur une longueur à environ 75 m. On a proposé aussi de profiler le talus avec l'utilisation en même temps de géotextiles pour protéger le talus du remblai du talus contre l'érosion due à l'inondation. Après avoir protégé le talus, on a reconstruit la structure du revêtement de la chaussée et du trottoir conformément à l'état initial.

Conclusion

Un large éventail d'exemples de catastrophes et de ruptures de chaussées a permis de mettre en évidence les problèmes liés à l'élaboration des projets, à leur exploitation. Une évaluation de la stabilité des talus routiers devrait prendre en compte les infiltrations. Sur des terrains exposés à une inondation, on recommande ce qui suit :

- accepter des valeurs admissibles des coefficients de sécurité des ouvrages routiers en terre lors de l'élaboration des projets d'études, augmentés de 15 à 25 % ;
- éviter de situer des remblais routiers, exécutés en sols non cohérents, sur des argiles, des alluvions, des sols compressibles, des karsts, ou susceptibles aux déformations dues à l'infiltration ;
- équiper les sites en appareils de mesure et de contrôle et mettre en place une instrumentation permanente des ouvrages en terre situés en zones exposées aux glissements. Des moyens d'observation de la surface des glissements (avec l'utilisation de courbe de niveau micrométrique et des instruments de géomètre) per-

mettent de détecter le mouvement, de déterminer l'étendue de la surface de glissement ainsi que de déterminer la vitesse du mouvement et sa direction. Les observations profondes (avec utilisation des tubes de déformation, des puits de déformation, des inclinomètres, piézomètres ouverts et fermés) permettent de déterminer la vitesse et direction des mouvements des sols et de suivre les variations du niveau de la nappe et les pressions interstitielles.

La catastrophe dans la centrale hydroélectrique a montré la nécessité de mener une instrumentation permanente pour évaluer l'état technique des ouvrages et installations, et l'influence qu'ils exercent sur des ouvrages voisins. Elle devrait concerner l'étanchéité du fond de la cuvette des réservoirs, le contrôle des déplacements des ouvrages et du sous-sol, l'état technique des fondations ainsi que le contrôle de l'efficacité des systèmes de drainage mis en place.

Un autre aspect important, c'est l'état de drainage des chaussées. La pratique a montré que des dégâts importants ont touché les ouvrages qui ne possédaient pas d'installations d'évacuation en bon état de fonctionnement alors que de nombreux éléments d'infrastructure routière ont résisté à l'inondation, car ils étaient correctement entretenus.

Bibliographie

- Bishop A.W. - The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, 5, 1955, p. 7-17.
- Bishop A.W., Morgenstern N.R. - Stability coefficients for earth slopes. *Geotechnique*, 10, n° 4, 1960, p. 129-150.
- Eurocode 7 - *Geotechnical Design Part 1. General Rules*, CEN European Committee for Standardization, Bruxelles, 1997.
- Janbu N. - Slope stability computations. *Embankment-dam Engineering*, Casagrande Volume, ed. R.C. Hirschfeld and S.J. Poulos. Krieger Pub. Co., 1987, p. 47-86.
- Orr T.L.L., Farrell E.R. - *Geotechnical Design to Eurocode 7*. Springer, London, 1999.
- Spencer E. - A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. *Geotechnique*, 17, n° 1, 1967, p. 11-26.
- Stilger-Szydło E., Kisiel I. - Le champ des forces de filtration dans l'étendue d'un talus en état limite de la stabilité. *PWN, Série de Mec. Appl.*, Varsovie, 1980, p. 551-560.
- Stilger-Szydło E., Batog A. - Complete Solution for the Saturated Slopes in the Limit Stress State. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, vol. L, n° 2, Polish Academy of Sciences, Gdańsk, 2003, p. 85-106.
- Von Pussel H., Pester K. - *Das Boberkraftwerk*. Siemens, Sonderdruck aus Siemens, Zeitschrift Heft 12, 1938.