

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

# Étude de la stabilité de deux crassiers d'usines métallurgiques

## Stability Investigations of Two Slag Dumps

par A. MAYER, Ingénieur général des Mines, Président du Centre d'Études & de Recherches de l'Industrie des Liants Hydrauliques, 23, rue de Cronstadt, Paris 15<sup>e</sup>

et

P. НАВВ, Ingénieur E. P., Docteur ès-Sciences, Ingénieur en Chef à la Direction générale des Recherches du Bâtiment et des Travaux Publics, 12, rue Brancion, Paris 15<sup>e</sup>

### Sommaire

Les auteurs rendent compte de deux études relatives à l'équilibre de crassiers d'usines métallurgiques. L'un des crassiers a été l'objet de glissements fréquents et, pour assurer sa stabilité, il a été nécessaire de changer le mode de chargement du sol par les déversements de crasse.

La stabilité a été vérifiée par une étude géotechnique puis, sur le terrain, par des mesures de pression interstitielle.

L'explication des incidents survenus a permis de prévoir ce qui arriverait à l'autre et d'éviter l'aggravation des désordres qui s'amorçaient déjà.

L'objet du présent rapport est de rendre compte de deux études relatives chacune à l'équilibre d'un crassier d'usine métallurgique. Ces deux crassiers ont été établis sur des terrains de nature géologique identique. L'explication des incidents survenus à l'un d'eux et les dispositions qui ont fait cesser ces incidents ont permis de prévoir ce qui arriverait à l'autre si l'on continuait les déversements et d'éviter une aggravation des désordres qui s'amorçaient déjà.

Nous étudierons tout d'abord le cas du crassier de Rodange de l'usine de la Chiers à Longwy, puis celui du crassier de Marspich de l'usine d'Hayange de la Société de Wendel. Indiquons d'une façon générale qu'avec le développement des usines de l'Est le placement des laitiers de haut-fourneau, dont chaque usine produit une tonne par tonne de fonte, devient un problème de plus en plus difficile, en particulier pour les usines situées dans des vallées étroites, comme précisément celles de Longwy ou d'Hayange, qui ne disposent pas de terrains libres suffisants pour y constituer des crassiers. Or si la mise au crassier des laitiers n'est qu'une opération secondaire pour l'usine, elle n'en conditionne pas moins la marche de celle-ci, l'arrêt de la mise au crassier signifiant l'arrêt de l'usine.

### I. — CRASSIER DE RODANGE

#### DE LA S.A. DES HAUTS-FOURNEAUX DE LA CHIERS

Ce crassier est situé à la sortie ouest de Longwy, parallèlement à la route Longwy-Luxembourg et en amont de cette route. Il est situé sur le flanc d'une colline dont les pentes ont une inclinaison comprise entre 8 et 15 pour cent. Le sol est essentiellement composé d'éboulis de coteaux d'épaisseur variable, recouvrant des marnes de l'étage toarcien. Le crassier a été l'objet de glissements fréquents et deux accidents récents se sont produits l'un côté Luxembourg, l'autre côté France. Le Service des Ponts et Chaussées du Luxembourg ayant menacé d'interdire tout déversement si la stabilité de la route était menacée, la Société entreprit l'édification d'un

### Summary

Two stability investigations of steel-plant slag dumps are presented. One of them has been subjected to frequent slides and in order to insure its stability the method of dumping the slag and of loading the soil had to be modified.

A geotechnical survey, followed by pore pressure measurements, have made possible a thorough check of the stability. The results of this study have been applied to the other case under review and have made it possible to stop the trouble which had already started.

contre-crassier pour charger le pied du talus et arrêter les mouvements du terrain. En même temps elle nous demandait d'analyser les incidents survenus, d'évaluer le coefficient de sécurité résultant de la présence du contre-crassier et, pour l'avenir, de définir le mode de chargement du crassier.\*

### Études de sol

Les marnes et les éboulis de coteaux ont été étudiés au laboratoire et ont donné les résultats ci-après :

#### a) Marnes.

— Limites d'Atterberg :

$LL = 50$  à  $55$  pour cent

$LP = 22$  à  $25$  pour cent

$IP$  de  $25$  à  $30$  pour cent

— Résistance au cisaillement :

cisaillement rapide après consolidation

angle de frottement interne  $\phi$  de  $20$  à  $24^\circ$

cohésion  $c$  de  $200$  à  $500$  g/cm<sup>2</sup>

cisaillement rapide sans consolidation

angle de frottement apparent  $\phi_a$  de  $4$  à  $10^\circ$

cohésion apparente  $c_a$  de  $700$  à  $1100$  g/cm<sup>2</sup>

— Teneur en eau décroissante avec la profondeur de 25 pour cent à 20 pour cent dans la zone des glissements. A 9 ou 10 m de profondeur la teneur en eau atteint 15 pour cent.

Bien que sous la nappe ces marnes ne sont en général pas saturées

— la densité croît avec la profondeur, le sol restant plastique jusqu'à 6 ou 7 m au maximum ;

\* Cette étude a été menée en liaison avec M. l'Inspecteur général des Ponts et Chaussées de Belgique de BEER, qui avait été choisi comme conseil par le Service des Ponts et Chaussées du Luxembourg.

- perméabilité de  $2 \times 10^{-8}$  à  $2 \times 10^{-9}$  cm/sec pratiquement isotrope lorsque la marne n'est pas fissurée. La présence de passages privilégiés a été reconnue.

b) *Limons, éboulis de coteaux.*

- Limites d'Atterberg :  
 $LL = 35$  pour cent  
 $LP = 20$  pour cent  
 $IP = 15$  pour cent
- Résistance au cisaillement :  
 Cisaillement rapide après consolidation  
 angle de frottement interne de  $23$  à  $26^\circ$   
 cohésion  $c$  de  $200$  à  $300$  g/cm<sup>2</sup>
- Teneur en eau moyenne  $25$  pour cent.
- Perméabilité de l'ordre de  $10^{-7}$  cm/sec.  
 L'épaisseur maximale des limons est de  $5$  à  $8$  m.

**Stabilité du crassier**

Nous avons appliqué à l'ensemble crassier et limon superficiel la méthode du cercle de glissement. Cette méthode introduit des hypothèses qui doivent tout d'abord être discutées.

On admet en premier lieu que la surface de rupture est circulaire.

Or le crassier est composé de couches inclinées parallèles à la surface libre, constituées par des matériaux de nature aussi différente que le laitier coulé liquide et solidifié et les poussières de fourneau, si bien que normalement les ruptures à l'intérieur du crassier se développeront le long de plans privilégiés.

Cependant si on envisage pour le crassier une résistance au cisaillement égale à celle des matériaux les plus médiocres, le calcul proposé sera pessimiste, c'est-à-dire dans le sens de la sécurité. Dans l'ignorance où nous sommes du coefficient de frottement de la crasse, si ce n'est par la tenue du front de carrière de l'exploitation du crassier pour l'extraction des matériaux de chassée, nous prendrons comme angle de frottement l'angle de talus naturel  $\varphi = 34^\circ$  et une cohésion nulle. Ces valeurs semblent particulièrement pessimistes. Remarquons à cet égard que le calcul du moment résistant admet la rupture simultanée du massif, c'est-à-dire que les cisaillements sont mobilisés simultanément dans la crasse et dans la fondation alors que la rupture est très probablement progressive. Dans ce cas, le déplacement fera disparaître peu à peu la cohésion et l'enchevêtrement des grains dans la surface de glissement. Il est donc prudent de ne conserver que l'angle de frottement interne dans le calcul de l'équilibre du talus.

Enfin le calcul admet que la répartition des charges correspond à un équilibre de Rankine dans chacune des tranches en lesquelles on décompose le cercle pour avoir la résistance totale. La plasticité du sol et de la crasse étant différentes, cette hypothèse peut ne pas être très rigoureuse, mais nous pensons que l'erreur, là aussi, doit être négligeable.

En résumé les hypothèses du calcul des cercles de glissement sont :

- point de départ du cercle :  $10$  m en arrière de l'arête du crassier (moyenne de l'épaisseur des tranches de glissement observées ;
- point d'émergence :  $50$  à  $60$  m au-delà du pied du crassier (conformément aux observations faites) ;
- profondeur dans le sol :  $15$  m (paraît le maximum compatible avec le raidissement de la marne en profondeur) ;
- pente du terrain naturel :  $10$  pour cent ( $6^\circ$ ) ;
- pente du crassier :  $34^\circ$  ;
- hauteur du crassier :  $35$  m ;
- caractéristique de la crasse : densité  $2$  à  $2,2$ , frottement interne  $\varphi = 34^\circ$ , cohésion nulle ;

- caractéristiques du sol  $\gamma$  apparente humide =  $2$  ;  
 $\gamma$  apparente immergée =  $1$  ;  
 $\varphi = 26^\circ$  et  $c = 300$  g/cm<sup>2</sup> ;  
 ou  $15^\circ$   $500$  g/cm<sup>2</sup> ;  
 ou  $8^\circ$   $750$  g/cm<sup>2</sup> ;  
 ou  $0$   $800$  g/cm<sup>2</sup>.

Les valeurs obtenues pour le coefficient de sécurité dans les diverses hypothèses sont :

Résistance au cisaillement		Coefficients de sécurité	
		terrain humide	terrain immergé
$26^\circ$	$300$ gr/cm <sup>2</sup>	$1,45$	$1,16$
$15^\circ$	$500$ gr/cm <sup>2</sup>	$1,15$	$0,98$
$8^\circ$	$750$ gr/cm <sup>2</sup>	$1,06$	
$0$	$800$ gr/cm <sup>2</sup>	$0,81$	$0,81$

On voit que dans certaines de ces hypothèses, d'ailleurs vraisemblables, une hauteur de  $35$  m correspond à un état d'équilibre instable du crassier.

On peut retrouver ce résultat par un calcul simplifié \* en supposant que :

- la zone des grandes déformations est limitée par un arc de cercle coupant le plan horizontal à  $45^\circ$ ,
- la couche de faible résistance a un angle de frottement interne nul et une épaisseur faible,
- la résistance au cisaillement du massif pulvérulent est nulle ;

Cette hypothèse est nettement pessimiste, bien que l'on constate la présence dans le crassier de zones fluentes provenant du déversement de poussières de haut-fourneau qui une fois saturées doivent avoir une résistance au frottement extrêmement faibles.

- le sol est horizontal.

Dans ce cas la charge limite est :

$$p_c = 3\pi c$$

Si on prend  $c = 0,80$  kg/cm<sup>2</sup> le vient

$$p_c = 3\pi \times 0,80 = 7,55 \text{ kg/cm}^2$$

Si on prend  $2,1$  pour densité de la crasse on retrouve une hauteur maximale de  $36$  m qui est la valeur précédemment obtenue.

**Stabilisation du crassier**

Les différents calculs effectués montrent que la hauteur dangereuse du crassier est voisine de  $35$  m. Ce résultat est en accord avec l'expérience ; il indique que les hypothèses choisies ne doivent pas être éloignées de la réalité. Le calcul d'un profil stable est donc possible. Remarquons que le seul mode d'action dont nous disposons pour stabiliser le crassier est une nouvelle répartition des charges. En particulier en changeant le mode de déversement de la crasse on peut imposer tel profil désiré au talus définitif. Le moment moteur est alors diminué dans le rapport des pentes et le coefficient de sécurité (rapport du moment moteur au moment résistant) croît parallèlement.

En accord avec le Service des Ponts et Chaussées du Grand-Duché de Luxembourg, le plan de chargement définitif fut le

\* Etude de la stabilité des fondations sur une couche d'argile d'épaisseur limitée. P. HAMB et SUKLEJ. *Annales de l'I.T.B.T.P.* nov. 1954 pp. 1152 et 1160.

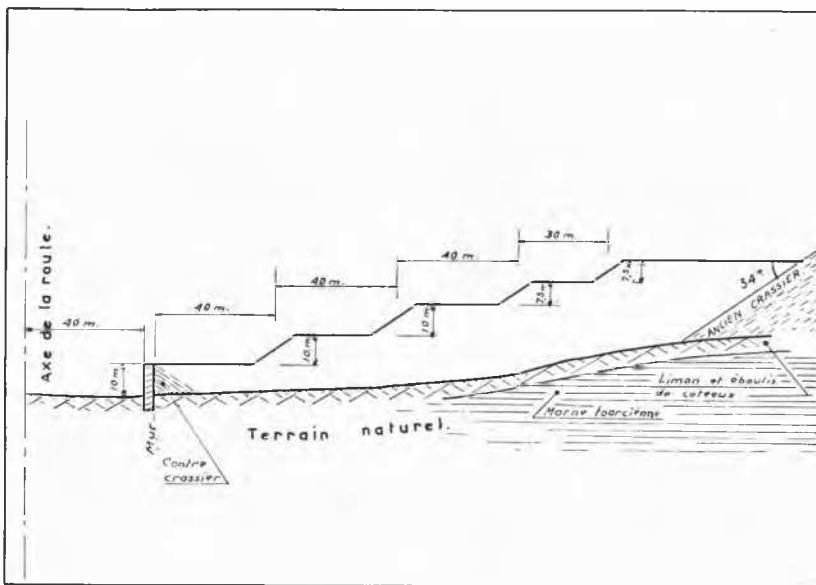


Fig. 1 Profil type du crassier.  
Typical section of the slag-dump.

suyant. En partant du contre-crassier et vers l'amont les déversements de crasse permettaient de constituer une série de gradins de 10 m de haut ; la largeur de chaque banquette élémentaire était de 40 m. La pente moyenne est alors de 25 pour cent c'est-à-dire 2,7 fois plus faible que celle du talus naturel. D'autre part, comme les glissements naturels se sont en général produits lorsque l'épaisseur de crasse atteignait 35 m il fut décidé de ne jamais dépasser 30 m de hauteur, par exemple en diminuant la hauteur des derniers gradins (Fig. 1).

En définitive, si l'on tient compte de la réduction de la pente, de la réduction de la hauteur, du changement de direction des coulées de crasse (maintenant pratiquement perpendiculaires à une éventuelle ligne de glissement), de l'interdiction de déposer au crassier autre chose que des matériaux nobles (à l'exclusion des poussières par exemple), le coefficient de sécurité du talus est supérieur à trois : aucun accident ne risque de se produire dans la route ; pratiquement même, aucune déformation n'y sera perceptible (Fig. 2).

C'est bien ce que l'observation ultérieure a montré ; toutefois eu égard à l'importance de l'objet à protéger le Service des Ponts et Chaussées du Luxembourg a demandé une surveillance de la pression interstitielle sous le crassier.

#### Mesure des pressions interstitielles. Prévisions des mouvements

Tout cisaillement et rupture d'équilibre du terrain doivent être précédés par une augmentation progressive de la pression interstitielle étant donné le caractère progressif du chargement du sol : chaque jour apporte en effet au crassier quelques wagons de crasse liquide en plus. Les augmentations de charge, surtout dans un terrain aussi imperméable, se transmettront tout d'abord par l'intermédiaire de l'eau de saturation, c'est-à-dire produiront un accroissement de la pression interstitielle et une diminution de la résistance

effective. On peut donc espérer que la mesure systématique des pressions interstitielles dans la zone comprise entre la base du crassier et la route permettrait de déceler les variations de pression avant que celles-ci deviennent dangereuses. En vue d'assurer la surveillance de l'ensemble 10 piézomètres à contact électrique ont été placés en fin 1958, dont 9 au voisinage du crassier, sous le crassier ou entre le crassier et la route, et un de l'autre côté de la route. Les niveaux d'eau ont été relevés dans les piézomètres régulièrement tous les mois depuis ce moment. Il a fallu bien entendu, à mesure des déversements, prendre des précautions spéciales pour relever les tubes à mesure de la remontée du niveau de la crasse. Les



Fig. 2 Vue d'ensemble du crassier.  
General aspect of the slag-dump.



Fig. 3 Déversement de crasse dans la zone de glissement.  
Dumping slag in the slide area.

observations ont montré qu'à aucun moment il ne s'était produit de surpression locale importante.

Il avait été imposé que les déversements de crasse seraient arrêtés si la surpression interstitielle exprimée en mètre d'eau atteignait 55 pour cent de l'épaisseur de la crasse. Jusqu'à présent elle n'a atteint 10 pour cent qu'une seule fois et en un seul point. En particulier les témoins placés au voisinage de la route n'ont manifesté aucun mouvement anormal. Il en a été de même de la route elle-même qui est restée parfaitement stable depuis 1958. La stabilité de la route a d'ailleurs été considérablement améliorée par la mise en place du contre-crassier établi en remontant et adossé à un mur de crasse fondé à 4 m de profondeur constitué par des blocs mis en place à la main et liés par déversement de crasse liquide. Ce contre-crassier constitue une butée stable et s'opposerait aux mouvements éventuels du terrain. Les lectures des piézomètres montrent bien qu'il n'y a aucune pression interstitielle dangereuse.

## II. — CRASSIER DE MARSPICH

Dans le but d'utiliser à des fins industrielles des terrains situés dans l'emprise des usines d'Hayange, de la Société de Wendel et Cie, entre le crassier de Marspich et la ligne S.N.C.F.

qui passe à quelque distance du pied de celle-ci, une étude de l'équilibre du crassier et des terrains en question nous a été demandée par cette Société.

Il nous est apparu immédiatement que le problème de Marspich, tout au moins sur la face du crassier parallèle à la voie ferrée, était le même que celui du crassier de Rodange et de la route Longwy-Luembourg. Le crassier est assis sur une colline qui descend en pente douce, de 10 pour cent environ vers la voie ferrée qui passe au bas. Le sol est constitué en surface par des limons provenant du remaniement des terrains en place et au-dessous par les mêmes marnes toarciennes qui avaient été rencontrées à Rodange. Des sondages avec prélèvement d'échantillons ont été effectués, qui ont montré l'identité des deux matériaux limon et marne; les marnes de Marspich étaient cependant plus fissurées si bien que les sondeurs ont à plusieurs reprises perdu leur eau en cours d'exécution des forages.

Le crassier recouvre une surface considérable avec une légère pente en direction du nord si bien que la face la plus haute est celle face à la voie ferrée où la dénivellation avait dépassé 30 m.

Lors de notre passage l'angle correspondant du crassier était marqué par un réseau de fissures parallèles à la ligne de crête, à une distance d'une dizaine de mètres l'une de l'autre, correspondant au poinçonnement des terrains sous-jacents. Alors que l'installation d'un piézomètre avait été prévue au bas de la pente, la prise d'eau avait été faite dans la marne fissurée, si bien qu'on ne relevait aucune indication. Nous avons, bien entendu, demandé qu'il soit remédié à cette situation et que le captage soit installé dans le limon de surface.

Il n'est pas certain cependant que les pressions interstitielles se manifesteront en raison de la présence d'arbres qui fixent les terrains de surface et doivent pomper l'eau.

Quoi qu'il en soit, la formation récente de fissures correspondant au moment où la hauteur du crassier au-dessus de la pente dépasse une trentaine de mètres confirme les indications qui avaient été obtenues par l'étude de la stabilité du crassier de Rodange. La conclusion à en tirer fut simple : sauf à stabiliser le pied des terres au moyen d'un contre-crassier, il faut limiter la hauteur du dépôt à une trentaine de mètres au-dessus des terrains environnants si l'on veut assurer la conservation de ceux-ci.