

La géologie et les travaux de fondation

Autor(en): **Falconnier, Alfred**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin der Vereinigung Schweizerischer Petroleumgeologen und
Petroleumingenieure**

Band (Jahr): **11 (1944)**

Heft 37

PDF erstellt am: **21.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-182109>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

LA GEOLOGIE ET LES TRAVAUX DE FONDATION.

Exposé de Monsieur Alfred FALCONNIER, Chargé de Cours à
l'Ecole d'Ingénieurs de l'Université de Lausanne.

1. GEOLOGIE. GEOTECHNIQUE ET SOLS DE FONDATION.

L'aspect géologique des problèmes de fondation mérite une attention particulière lorsque la reconnaissance du sous-sol révèle que la structure du terrain est hétérogène ou que sa stabilité est précaire. Il complète alors l'aspect technique et géotechnique que présentent ces travaux.

Dans le cas le plus simple de la fondation d'un immeuble, l'examen géologique se limitera à une reconnaissance du sol de fondation au moyen de fouilles, de puits ou, cas échéant, de forages à faible profondeur.

Si l'immeuble peut être fondé directement sur la roche en place et si celle-ci est stable et constituée par un matériau incompressible, les travaux de fondation n'offriront aucune difficulté spéciale et n'exigeront pas d'études de caractère géologique ou géotechnique.

Si, par contre, l'immeuble doit être fondé sur un sol meuble, plus ou moins compressible, l'examen des propriétés mécaniques du sous-sol, associé parfois à une étude géologique, déterminera le choix du mode de fondation.

L'utilité d'une étude purement géologique ou d'un examen spécifiquement géotechnique ou encore d'une étude combinée dépendra, en principe, de l'importance des ouvrages et des conditions géologiques rencontrées.

Parmi les divers sols de fondation que l'on rencontre dans la pratique, il convient de distinguer les sols rocheux pratiquement incompressibles tels que les granites, les gneiss, les calcaires et les grès, pour ne citer que les principaux, et les sols meubles ou non agglomérés, plus ou moins compressibles, qui comprennent,

d'une part, les sols de friction ou à frottement interne tels que les graviers, les sables et les limons et, d'autre part, les sols de cohésion ou cohérents tels que les argiles, les marnes et les boues.

En géologie théorique, l'on distingue aussi les dépôts meubles et les roches d'affleurement de nature éruptive, métamorphique ou sédimentaire. Les dépôts meubles se forment aux dépens des roches en place sous l'action des agents externes de l'érosion. Ces sédiments d'origine marine, alluviale, lacustre, éolienne, glaciaire ou terrestre sont classés généralement dans les dépôts d'âge quaternaire et le soubassement rocheux sur lequel ils reposent, constitue ce que l'on appelle la roche en place ou le bedrock d'âge tertiaire, secondaire ou primaire.

Dans la pratique des travaux publics, cette distinction spécifiquement géologique n'est pas suffisante car la roche en place peut renfermer des sols de friction ou de cohésion dont les propriétés mécaniques diffèrent sensiblement de celles des matériaux pierreux incompressibles qui constituent l'armature du bedrock.

Géotechniquement parlant, les affleurements rocheux peuvent donc contenir des dépôts non agglomérés et, lorsque le cas se présente, il doit être signalé car de tels sédiments réagissent d'une manière très particulière sous l'effet des charges ou des décharges.

Les déformations que peuvent subir les sols meubles actuels ou anciens proviennent du fait que ces dépôts ne sont généralement pas cimentés ou imparfaitement consolidés. Un examen géotechnique des terrains de fondation est donc indispensable toutes les fois qu'un sous-sol rocheux renferme des éléments meubles plus ou moins compressibles. Si, par contre, le sol de fondation est uniformément rigide et incompressible, l'examen géologique permettra généralement de définir les conditions de stabilité et d'imperméabilité du soubassement rocheux.

Il résulte de ces considérations qu'un examen géo-

logique est motivé lorsque le sol de fondation est de nature meuble et hétérogène et que l'ouvrage projeté exige des fondations profondes telles que pieux, puits ou caissons. Si les sondages effectués à l'emplacement donné démontrent qu'au contraire le sous-sol de nature meuble est homogène, seules les méthodes géotechniques permettront de choisir le mode de fondation qui soit adapté, d'une part, aux particularités de la superstructure et, d'autre part, aux propriétés mécaniques du sous-sol. Un examen géologique détaillé n'interviendra pas dans ce cas même si les fondations doivent pénétrer profondément à l'intérieur du terrain d'appui. Enfin si le soubassement est de nature rocheuse et que l'ouvrage projeté exige une fondation profonde, une étude géologique des lieux est nécessaire et sera complétée, cas échéant, par un examen géotechnique des éléments meubles susceptibles de s'affaisser.

Les rôles que peuvent jouer respectivement la géologie et la géotechnique dans le domaine des travaux publics sont ainsi clairement définis.

L'étude des phénomènes naturels qui peuvent compromettre la stabilité des sols de nature meuble ou rocheuse nous permet d'éclaircir le mécanisme des mouvements de terrain qui se produisent sous l'effet d'une charge ou d'une décharge. L'érosion naturelle de même que l'excavation artificielle d'un sol de fondation peuvent y produire les mêmes déformations dans certaines conditions bien déterminées.

La cause originelle de tout affaissement et de tout mouvement du sous-sol est en définitive la gravité: sans elle il n'y a pas d'érosion ni de sédimentation possible et, par conséquent, pas de mouvements ni de déformations du sol.

Ces mouvements sont imputables soit à des causes naturelles générales telles que les phénomènes d'érosion et leur complément, les phénomènes de sédimentation, soit à des causes artificielles localisées telles que les

travaux d'excavation ou de remblayage, de charge et de décharge.

2. LES SOLS MEUBLES DE FRICTION.

Dans les sols de friction comprenant les graviers, les sables et le limons, les particules se déposent en contact direct lors de la sédimentation et le frottement qui s'exerce entre particules s'oppose jusqu'à une certaine limite aux déformations qui pourraient se produire.

A l'état sec ou imbibés d'eau, ils présentent un degré de tassement naturel variable qui dépend des conditions dans lesquelles s'est effectuée leur sédimentation. Les déformations que ces sols pourront subir sous l'effet des surcharges seront plus ou moins grandes sui-
vant leur degré de tassement initial.

Ces déformations seront pratiquement instantanées et irréversibles, ce qui distingue mécaniquement ces dépôts des sols de cohésion chez lesquels les déformations s'opèrent au bout d'un temps plus ou moins long et sont réversibles dans les limites d'élasticité du matériau.

L'équilibre des massifs pulvérulents ou des sols de friction, chez lesquels l'on peut négliger l'influence du caractère pétrographique des particules, dépend de l'arrangement des grains, de leur forme, de leur dimension et de leur granulométrie.

Cet équilibre est d'autant plus stable que l'arrangement des grains présente un indice de vides plus faible, que leur forme est plus irrégulière et anguleuse et que leur courbe granulométrique est moins uniforme. Cet équilibre peut être rompu par des causes externes telles que les variations de niveau de la nappe phréatique qui les imbibent, les vibrations ou les explosions auxquelles on peut les soumettre.

A ce moment, le massif sableux pourra, dans certaines conditions données, être le siège du phénomène dit

des sables bouillants: tout sable et même les graviers peuvent devenir bouillants si les conditions nécessaires à la réalisation du phénomène sont remplies.

Les phénomènes des sables bouillants se manifestent de diverses manières, soit sous forme de fluence, par liquéfaction brusque du massif pulvérulent, soit sous forme d'irruption, par rupture d'équilibre en profondeur, soit enfin sous forme d'érosion interne, par rupture d'équilibre en surface.

La fluence provoque un tassement pratiquement instantané des sols de friction: elle est à craindre dans les massifs pulvérulents imbibés d'eau et mal tassés dont les particules sont fines et arrondies. L'indice de vides d'un tel matériau correspond alors à l'indice de vides critique pour lequel un mouvement d'ensemble des particules est possible et permet aux grains de se mouvoir sous l'effet d'une simple vibration ou d'une variation infime de la nappe phréatique.

L'irruption et l'érosion interne que l'on désigne aussi sous le nom de "renards", se produisent, dans certaines conditions hydrodynamiques bien déterminées, lorsque le massif pulvérulent est traversé par un fluide en mouvement.

Ces phénomènes se manifesteront chaque fois que les sols de friction seront soumis à une pression hydrostatique dont la valeur dépasse celle du poids apparent de la couche de sable: dans ces conditions, les grains du massif pulvérulent pourront flotter dans le liquide en mouvement. La valeur de cette poussée critique sera atteinte dès que la pente hydraulique suivant laquelle s'écoule la nappe d'eau acquiert une inclinaison telle que le massif sableux passe alors d'un état d'équilibre stable à un état d'équilibre instable: il existe pour chaque type de sable ou de gravier de granulométrie donnée un gradient hydraulique critique qui peut être déterminé par des essais de laboratoire.

Ces phénomènes d'irruption ou d'érosion interne

sont à craindre quand on doit fonder un ouvrage au sein d'un massif pulvérulent imbibé d'eau ou au travers d'un sol de fondation rocheux renfermant des couches de sable ou de grés sableux. Dans ces conditions les travaux d'excavation auront pour effet d'augmenter l'inclinaison des filets liquides en fond de fouille et la stabilité des talus peut être ainsi compromise.

Si ceux-ci sont maintenus artificiellement par une enceinte de palplanches, il pourra se produire à l'intérieur de l'enceinte une irruption de sables et à l'extérieur, des affaissements plus ou moins importants.

L'irruption ou rupture d'équilibre en profondeur est donc provoquée artificiellement par une concentration locale des filets d'eau à l'intérieur du sol alors que l'érosion interne ou rupture d'équilibre en surface peut s'amorcer artificiellement (voir fig.1) ou naturellement (voir fig.2) dès que la pente du talus ou surface de sortie acquiert une inclinaison telle que la stabilité du massif est compromise par la poussée de la nappe d'eau: il faut donc que la résultante des forces qui agissent en chaque point du massif pulvérulent, soit la gravité et la poussée de la nappe, passé à l'intérieur du massif pour que la stabilité du talus soit assurée.

3. LES SOLS MEUBLES DE COHESION.

Les sols de cohésion comprenant les argiles, les marnes et les boues, sont constituées par des particules dont le diamètre maximum ne dépasse pas conventionnellement 0.01 mm et dont les plus fines ont des dimensions ultra-microscopiques. Les particules sont enrobées par une pellicule d'eau qui empêche leur contact direct. Cette pellicule est adsorbée énergiquement par les grains et l'eau ainsi fixée confère à ce matériau une plasticité analogue à celle d'un gel colloïdal.

Plus la division naturelle du matériau sera poussée, plus la quantité d'eau adsorbée sera grande car la surface d'attraction augmente rapidement avec le degré de division. Au cours des phénomènes d'érosion et de sé-

BARRAGE DE BOU-HANIFIA (Oran)

Excavation de la tranchée-parafouille avant l'exécution du mur de pied

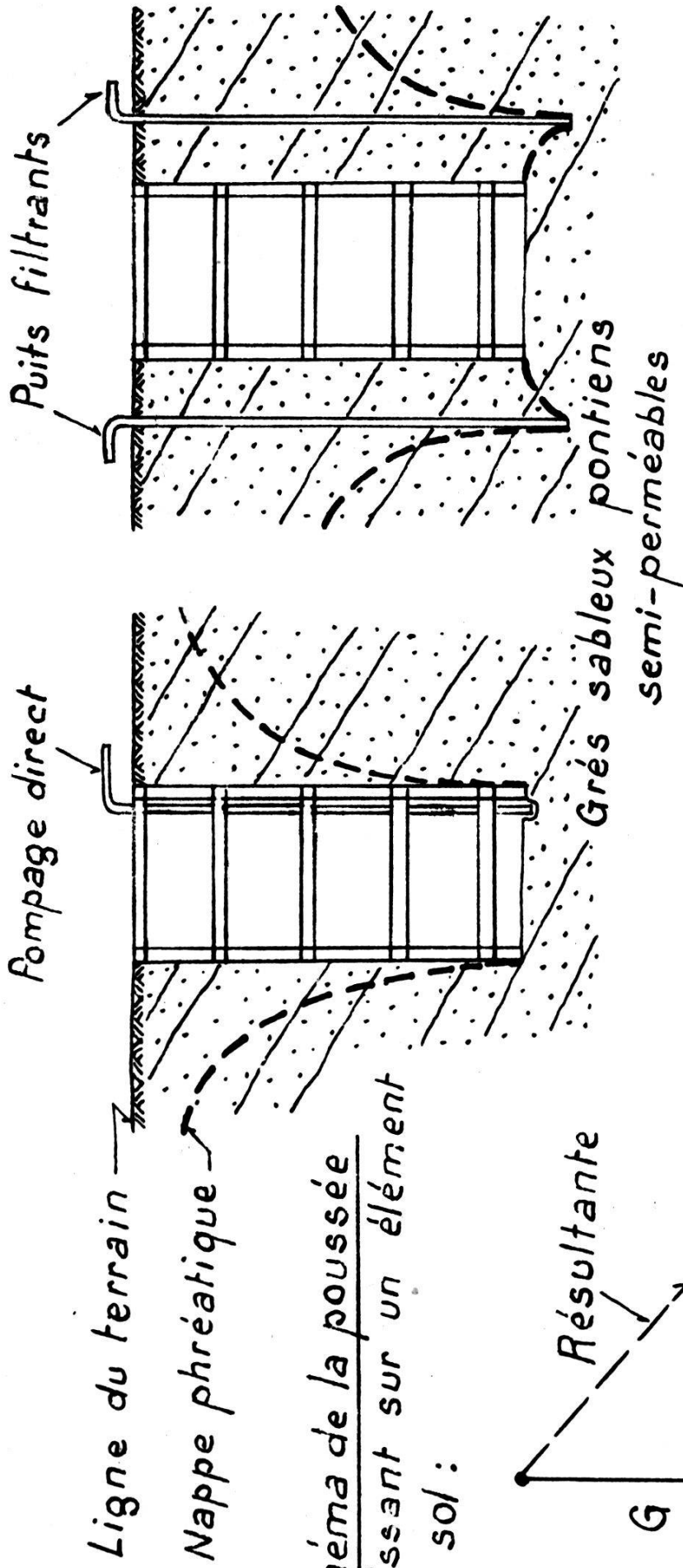
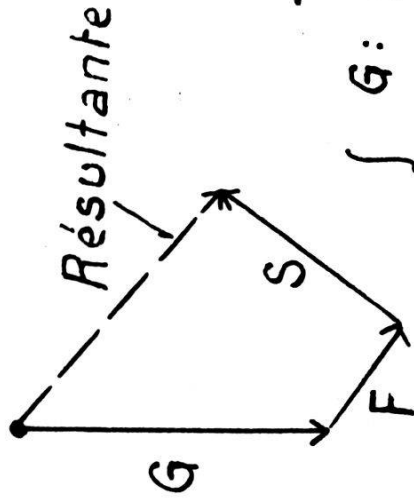


Schéma de la poussée agissant sur un élément du sol :



$\left\{ \begin{array}{l} G: \text{gravité} \\ F: \text{frottement de l'eau sur l'élément} \end{array} \right.$

S: sous-pression

Equilibre instable Equilibre stable

dimentation, il s'opère un classement naturel, à la fois mécanique et chimique, des éléments qui forment les dépôts meubles ou non agglomérés: les éléments siliceux des roches les plus finement divisés donneront naissance à des sables très fins et à des limons, la fragmentation ultime des éléments calcaires aboutira à la formation de boues et celle des éléments silicatés, à des argiles et des colloïdes.

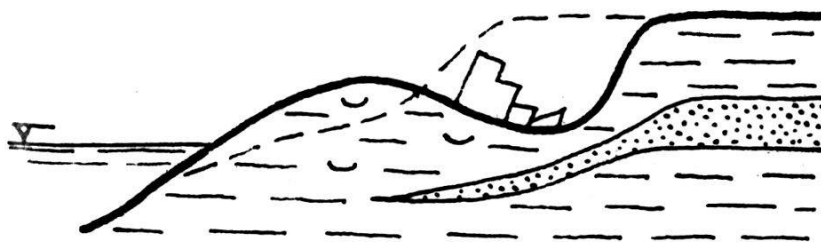
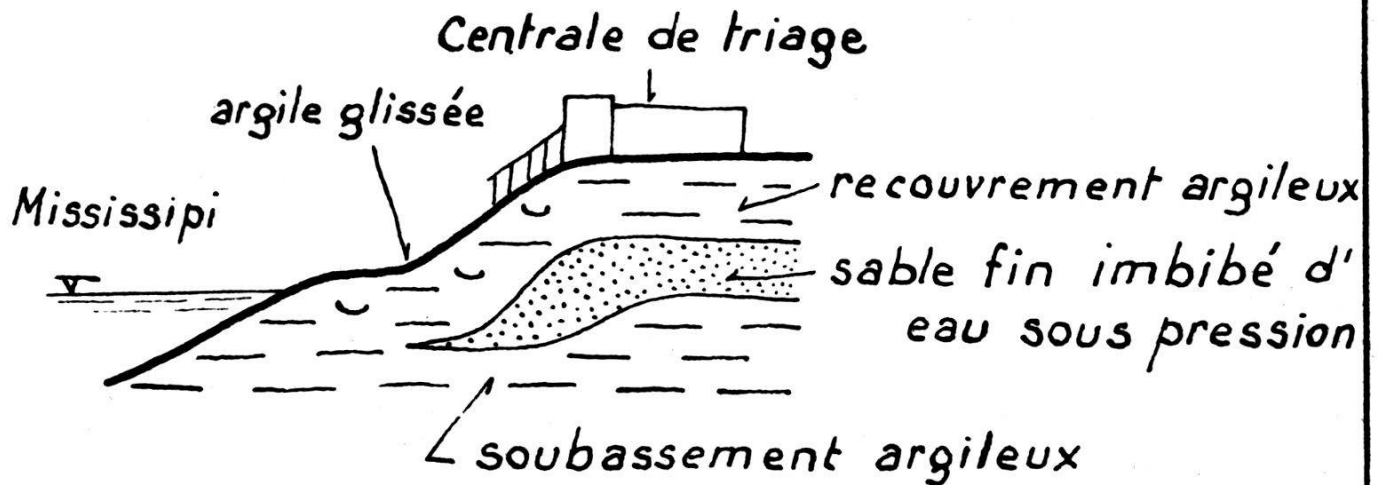
Les colloïdes argileux peuvent se trouver soit à l'état dispersé et former des solutions colloïdales, soit à l'état coagulé et former alors des gels colloïdaux. Comme l'on sait, les phénomènes de dispersion et de coagulation des solutions colloïdales sont régis par l'action des électrolytes dissous dans l'eau où se forment ces dépôts. Les agents peptisants qui favorisent la dispersion des gels comprennent surtout les sels alcalins à base de Na, K, Li et NH₄. Les agents coagulants qui favorisent au contraire la floculation des solutions colloïdales sont principalement les sels de Ca et de Mg. L'eau d'imbibition des argiles exerce donc une influence indéniable sur leur degré de plasticité et de cohésion. Les minéraux argileux tels que la montmorillonite, l'halloysite et la kaolinite réalisent en outre des édifices cristallins instables lesquels comportent à leur périphérie des valences libres pouvant être saturées soit par l'ion Na, ce qui augmente la plasticité de l'argile, soit par l'ion Ca, ce qui diminue au contraire sa plasticité.

Une argile typique ne renferme jamais plus de 10 % de chaux sinon l'on a affaire à une argile marneuse. Si les proportions de chaux et d'argile atteignent respectivement 50%, un tel matériau est une marne et si le % de chaux atteint 75, c'est un marno-calcaire.

La stabilité et les propriétés mécaniques des sols de cohésion dépendent donc dans une large mesure de la composition chimique de l'eau interstitielle et du caractère pétrographique des particules solides. Parmi les sols de cohésion les plus plastiques et les plus ins-

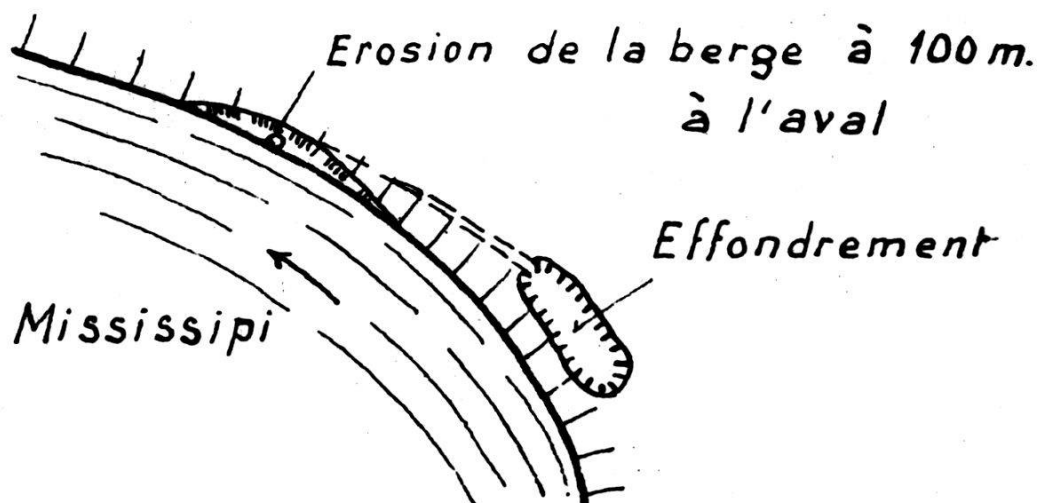
EFFONDREMENT DE MEMPHIS (Tennessee)

d'après Terzaghi.



Situation 1 an
après l'érosion
de la berge

Plan schématique



tables, il faut citer ceux formés par de la bentonite: ces sols manifestent de la thixotropie et peuvent passer, par simple agitation ou vibration, à l'état de fausse solution puis coaguler à nouveau sitôt l'agitation terminée. Il existe également des limons thixotropes lesquels renferment un faible % d'argile thixotrope de même que des boues thixotropes comme certaines craies lacustres. De tels sédiments sont évidemment à classer parmi les sols de fondation les plus défavorables. Les sols marneux sont par contre beaucoup plus stables car leur cohésion augmente avec l'accroissement de la teneur en chaux.

Il importe cependant que de tels dépôts soient consolidés c.à.d. qu'ils aient acquis un état d'équilibre stable sous l'influence des surcharges: dans cet état, les contraintes intérieures se transmettent intégralement grain sur grain.

Il s'établit en effet, au cours du temps, un équilibre entre la pression qui tend à chasser l'eau interstitielle du matériau sous le poids des couches sus-jacentes et l'attraction capillaire qui lie les particules solides à leur enveloppe liquide et qui tend au contraire à conserver cette eau. La quantité d'eau ainsi fixée varie généralement entre 20 et 80 % du volume apparent.

En raison des dimensions capillaires des interstices, l'élimination de l'eau s'opère très lentement. La consolidation progressive d'un sol de cohésion s'effectue, au cours des âges géologiques, aux dépens de la porosité du matériau laquelle diminue au fur et à mesure que le tassement augmente: une vase à 75% de vides se transforme ainsi en une argile à 25 %.

Au sein des roches d'affleurement, l'on peut également rencontrer des sols de cohésion en voie de consolidation. Dans un tel matériau, l'eau adsorbée est soumise à une pression supérieure à celle qui correspond à sa charge actuelle: une argile dans cet état offre une résistance au cisaillement bien moindre qu'une argile stabilisée où l'équilibre entre la teneur en eau et la

surcharge a été réalisé. L'examen du matériau à l'oedomètre permettra de déterminer si l'on a affaire à une argile consolidée ou non.

Si l'argile est consolidée, la pression hydrostatique qui s'exerce en chaque point du massif considéré, correspond à la hauteur de charge du recouvrement. La détermination des propriétés mécaniques d'un sol stabilisé par des essais de compression et de cisaillement permettra à l'ingénieur ou à l'architecte de choisir un mode de fondation tel que les contraintes développées dans le sous-sol n'y déterminent que des déformations élastiques.

Dans ces conditions, les déformations seront sensiblement proportionnelles aux charges appliquées et l'élimination de l'eau interstitielle due au tassement du terrain s'effectuera sans déplacement relatif des éléments solides. Dans le cas d'un sol de cohésion consolidé et homogène dans tout le volume de terrain intéressé par les sollicitations de l'ouvrage, l'examen géotechnique du sous-sol fixera seul le taux de travail admissible et le mode de fondation de manière à éviter le poinçonnement du terrain: un examen géologique approfondi ne sera pas nécessaire dans ces conditions.

Si le sol de cohésion est en voie de stabilisation, il faudra si possible rechercher en profondeur une assise géologique stable, capable de servir d'appui à la superstructure. Cette assise devra supporter la charge de l'ouvrage, transmise directement par la fondation, et la charge supplémentaire que le terrain en voie de consolidation exercera sur la fondation elle-même. Une fondation sur caissons ou pieux flottants ne saurait être conseillée dans un sol en voie de stabilisation car la fondation subirait des tassements anormaux propres à désarticuler l'ouvrage et à en compromettre la stabilité.

Dans ce cas, la reconnaissance géologique du sous-sol s'impose et l'on doit rechercher en profondeur un appui formé soit par un sol de cohésion stabilisé, soit par un sol de friction tassé, soit mieux encore par un soubassement rocheux incompressible.

Si les sondages révèlent l'existence d'un bedrock sous une couverture de terrains non consolidés ou mal tassés, il convient en outre de vérifier si le soubassement rocheux est homogène et rigide ou si, au contraire, il est hétérogène et renferme des éléments meubles susceptibles de s'affaisser. L'examen géologique d'un tel soubassement sert alors de base à l'étude géotechnique et aux mesures qui seront prises pour garantir la stabilité de l'ouvrage.

Dans le domaine des fondations sur pieux, il importe en effet de savoir si ceux-ci peuvent travailler comme pieux-colonnes ou comme pieux-flottants. Une fondation sur pieux-colonnes conviendra lorsqu'il existe en profondeur un soubassement rocheux incompressible ou un sol de friction fortement tassé et d'une épaisseur suffisante. La longueur des pieux est alors fixée par la profondeur à laquelle se trouve l'appui géologique. Une fondation sur pieux-flottants sera réalisée par contre lorsque le bedrock est constitué en entier ou en partie par un matériau plastique mais consolidé. La longueur des pieux est alors fixée par les caractéristiques mécaniques des couches rencontrées.

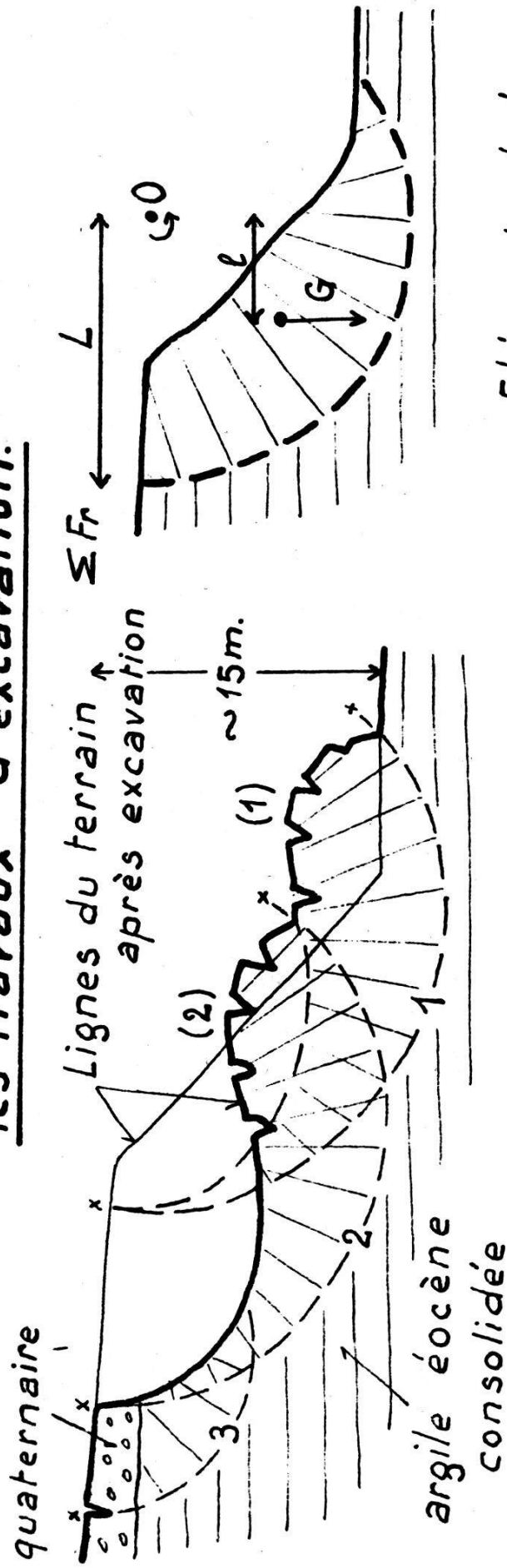
Si les sols de cohésion s'affaissent sous l'effet d'une charge ils peuvent aussi le faire sous l'action d'une décharge: ils subiront alors des déformations plastiques de plus ou moins grande envergure qui sont les glissements de terrain. Ces glissements peuvent se produire sur des pentes faiblement inclinées et intéresser aussi bien les roches d'affleurement de nature argileuse, marneuse, argilo-sableuse ou marno-gréseuse que les sols meubles formés aux dépens des premières par altération ou érosion.

Les glissements classiques de terrain réalisent en grandeur naturelle un essai de cisaillement qui a pour surface de rupture une surface courbe approximativement circulaire. Cette surface de rupture n'est pas nécessairement déterminée par une structure géologique particulière au versant en mouvement. L'analyse mécanique des

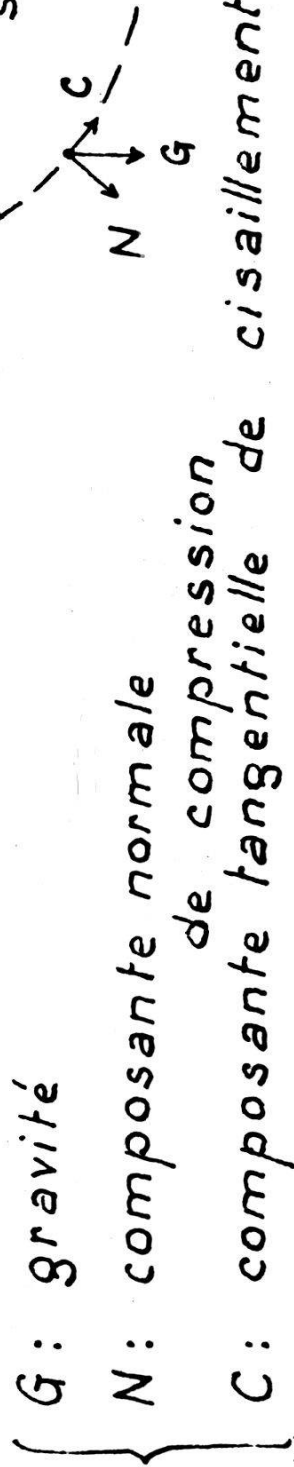
BARRAGE DE BOU-HANIFIA (Oran)

Glissements de l'appui rive gauche du canal de fuite durant

les travaux d'excavation.



Elément de la surface de rupture



glissements typiques montre que le massif glissé a subi un basculement autour d'un centre de rotation virtuel situé à l'extérieur du talus. Le rayon de courbure de la surface de rupture sera plus ou moins grand suivant la résistance intrinsèque du matériau: cette résistance est définie par la cohésion et l'angle de frottement interne du terrain.

Un glissement se produira dès que la résistance du sous-sol le long de la surface de rupture en formation ne pourra plus équilibrer les efforts développés par le poids de la masse instable par rapport au centre virtuel de rotation. L'équilibre statique du talus est donc défini par l'équilibre de 2 moments:

1. La somme des frottements et réactions du terrain F_r par le bras de levier L .
2. Le poids de la masse labile G par le bras de levier l .

L'équilibre du versant argileux peut être rompu naturellement par érosion du pied du talus (voir fig.4) ou par poussée anormale et momentanée d'une nappe d'eau au sein du versant. Il peut l'être artificiellement par excavation du pied du versant (voir fig.3) ou par remblayage du sommet du talus (voir fig.4).

A cet instant, l'équilibre des moments n'étant plus réalisé, l'on a affaire à un moment de rotation capable de faire basculer la masse labile autour du centre virtuel O . La surface de rupture délimite en profondeur le lieu des points où la cohésion et la résistance au cisaillement du matériau ont été vaincues par les contraintes tangentielles de cisaillement développées par le poids de la masse en mouvement. Il se forme alors une niche d'arrachement et un bombement de terrain plus ou moins crevassé avec contre-pente à la base de la niche d'arrachement. Cette forme d'érosion est également régressive et peut labourer le talus du bas vers le haut en provoquant une série de basculements étagés à différents niveaux (voir fig.4).

GLISSEMENTS DE CONSTANTINE

Plateau du **COUDIAT**

Remblayage 1911-1935

Remblais IV
Grès oligocènes
Schistes argilo-marneux sénoniens

RHUMMEL

Zone d'érosion

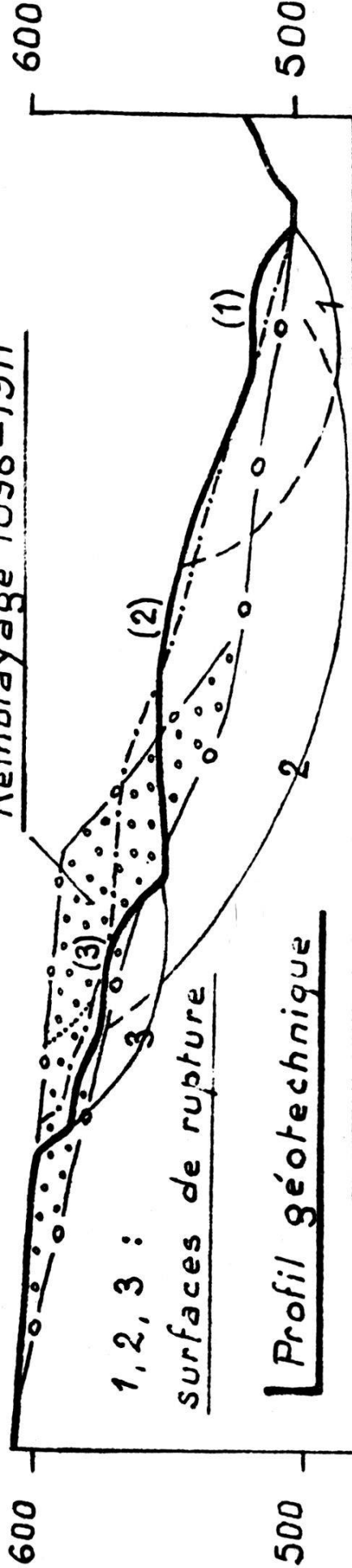
Profil géologique

- Ligne du terrain après glissement de 1935
- - - Ligne du terrain après glissement de 1911
- - - o - Ligne du terrain en 1896

S. altérés
S. non altérés

100 m.

Remblayage 1896-1911



1, 2, 3 :
surfaces de rupture

Profil géotechnique

(1), (2), (3), = bombements correspondants

fig. 4

4. LES SOLS ROCHEUX INCOMPRESSIBLES.

Si l'étude géologique et mécanique des sols meubles intéresse à la fois les ingénieurs et les architectes, l'étude géologique des soubassements rocheux pratiquement incompressibles est plus particulièrement utile aux constructeurs de barrages. Examinons brièvement les conditions de stabilité auxquelles les appuis rocheux doivent répondre.

Les talus réalisés par les versants rocheux d'une vallée en voie d'érosion présentent des secteurs parfaitement stables et d'autres qui sont franchement instables. Ces derniers sont le siège ou de décollements lents de la roche sur son substratum ou d'éboulements de masse qui s'effectuent d'une manière pratiquement instantanée.

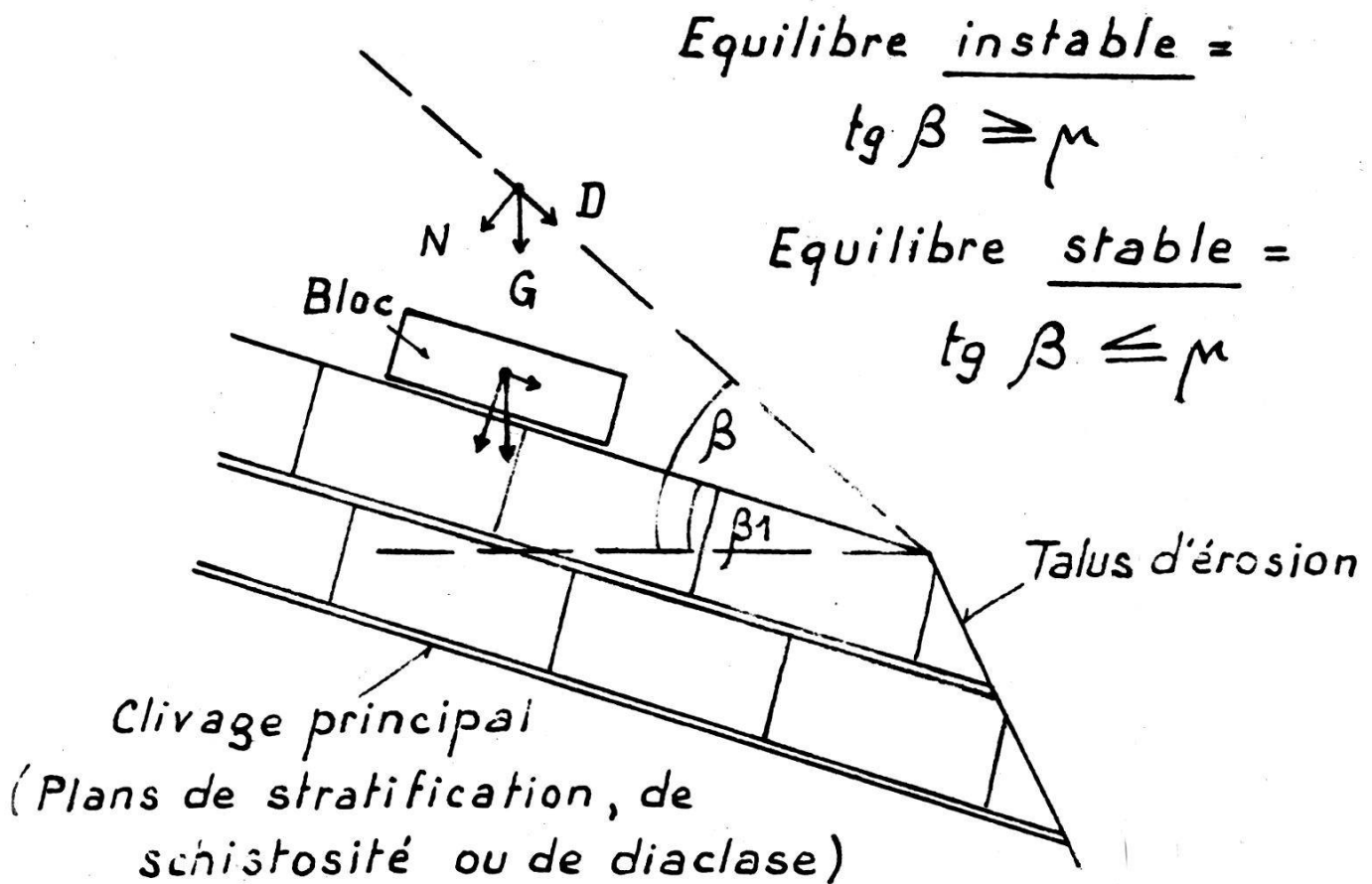
Il y a enfin des secteurs métastables qui sont à la limite de stabilité et qui deviennent menaçants dès que l'érosion vient mordre leur pied ou que des travaux d'excavation sapent leur base.

La mise en mouvement des masses rocheuses dépend principalement de leur état de dislocation, de la densité réticulaire des clivages qui les sectionnent et surtout de l'orientation de ces clivages par rapport au modelé topographique. Certains massifs sont parfois si disloqués qu'ils forment en réalité un empilement de blocs dont la tenue n'est guère meilleure que celle d'une maçonnerie en pierres sèches.

Dans certaines conditions données, la stabilité de tels appuis est douteuse et varie suivant la valeur du frottement qui s'exerce entre blocs. Lorsqu'un bloc isolé repose sur un substratum incliné comme un plan de diaclase, par exemple, il y est fixé par le frottement qui s'exerce à la surface de contact (voir fig.5): la valeur de ce frottement est égale à la composante normale du poids de l'élément considéré multipliée par un coefficient de frottement qui dépend de la rugosité de la roche.

La stabilité du bloc sur son substratum devient

STABILITÉ D'UN MASSIF ROCHEUX à l'état disloqué.



- G: gravité
- N: composante normale d'application
- D: " tangentielle de décollement
- Fr: frottement
- μ : coefficient de frottement

$$Fr = \mu \cdot N = \mu \cdot G \cdot \cos \beta_1$$

Pour un ∇ limite β , $\mu N = D$, c.à.d.

$$\mu \cdot G \cdot \cos \beta = G \cdot \sin \beta, \text{ d'où } \mu = \text{tg } \beta$$

précaire dès que l'inclinaison de ce dernier atteint une valeur telle que la composante tangentielle du poids de l'élément considéré annule le frottement: à ce moment critique, le coefficient de frottement a pour valeur la tangente de l'angle-limite et le bloc peut s'ébouler sous l'effet d'une cause infime. Ce bloc est passé d'un état d'équilibre stable à un état d'équilibre instable.

La valeur de cet angle-limite varie en moyenne et suivant le degré de rugosité de la roche de 20 à 40 degrés sur l'horizontale. Il correspond sensiblement à l'angle de talus naturel de la roche réduite à l'état d'éboulis.

Si, au lieu de considérer un bloc isolé, nous étudions maintenant la tenue d'un versant rocheux disloqué, nous verrons que ce dernier peut réaliser divers états d'équilibre. Quand le clivage principal du massif rocheux est moins incliné que l'angle de talus-limite propre à la roche, le versant considéré sera stable même si le talus d'érosion est voisin de la verticale et que son pied est affouillé. Si, par contre, le clivage principal du massif rocheux est incliné d'un angle égal ou supérieur à l'angle de talus-limite, la stabilité apparente du versant ne sera durable que si l'érosion ou des travaux d'excavation n'en entament pas le pied: la stabilité apparente d'un versant rocheux disloqué réalise un état d'équilibre métastable. Cet état peut correspondre à des talus très raides dont l'inclinaison est déterminée par le pendage du clivage principal. Il suffira cependant de toucher le pied de tels versants pour que leur état d'équilibre devienne instable et que des mouvements de décollement ou des éboulements se produisent.

En conclusion, cet exposé montre les rapports qui existent entre la géologie et les travaux de fondation, les conditions de stabilité auxquelles doit répondre le sous-sol et l'aspect à la fois géologique et géotechnique que présentent les travaux de génie civil et plus particulièrement les travaux de terrassements.
