

UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

PATHOLOGIE DES CONSTRUCTIONS

GCL 566

Responsable: Dr. GHOMARI Fouad

Chap. 2. PATHOLOGIE DES TERRASSEMENTS.

2.1. Introduction.

Le comportement du sol est l'un des paramètres dont l'incidence est prépondérante pour les constructions. Nous savons que le sol est un milieu dont l'exploration est particulièrement difficile. Les moyens d'investigation sont ponctuels et leur précision toute relative.

L'interprétation et l'extrapolation des résultats d'une campagne de reconnaissance géotechnique comporte toujours des risques d'erreurs, notamment dans les sites très hétérogènes. D'où l'adoption de coefficients de sécurité généralement très élevés. .

Dans ce domaine, la mise au point de méthodes d'investigation de plus en plus sophistiquées ne doit pas créer l'illusion de la précision et de l'exactitude.

Toute exploration souterraine a un caractère fondamentalement incomplet et approximatif : on ne peut réduire le sol à une série de coefficients. Nous savons par exemple, que la simple variation de la teneur en eau peut changer son comportement du tout au tout, et du jour au lendemain.

Face à ces incertitudes, par elles mêmes porteuses de risques, tout manquements aux règles les plus élémentaires de prudence peut être accompagné par des sinistres graves : éboulement de talus, glissement de terrain, effondrement de murs de soutènement, etc.

Outre la mise en cause de la sécurité des personnes, les dommages causés ont généralement des conséquences financières considérables.

Malgré cela, nous observons des anomalies fréquentes et flagrantes dues au fait que l'on veuille sans doute gagner du temps et de l'argent en comptant sur la stabilité d'un sol que l'on sait pourtant incertaine : talutage quasiment verticaux, terrassements contre des mitoyens avec étaitements symboliques ou parfois inexistants, tranchées ouvertes sans aucun blindage, etc.

Une autre source de difficultés tient certainement du fait que les sols peuvent induire des sollicitations dont la direction n'obéit pas toujours à la loi de la gravité : poussée des terres, poussée hydrostatique, gonflement de certains sols argileux, etc.

Ce type de sollicitation, conduit très souvent à des erreurs de dimensionnement ou d'exécution pour lesquels il y aurait soit une sous estimation des poussées soit un défaut d'équilibrage du moment de renversement.

Rappelons que la stabilité d'un terrain relève de lois complexes, ce qui justifie la plus grande prudence dans les travaux susceptibles de l'affecter.

Ces travaux sont relatifs essentiellement aux terrassements avec leurs deux phases :

- ✓ Les fouilles ou déblais qui affaiblissent la stabilité des terres avoisinantes,
- ✓ Les remblais, qui surchargent et affectent la stabilité des terres sous jacentes.

Nous allons examiner au travers d'exemples concrets, les conséquences dommageables des remblais et des fouilles.

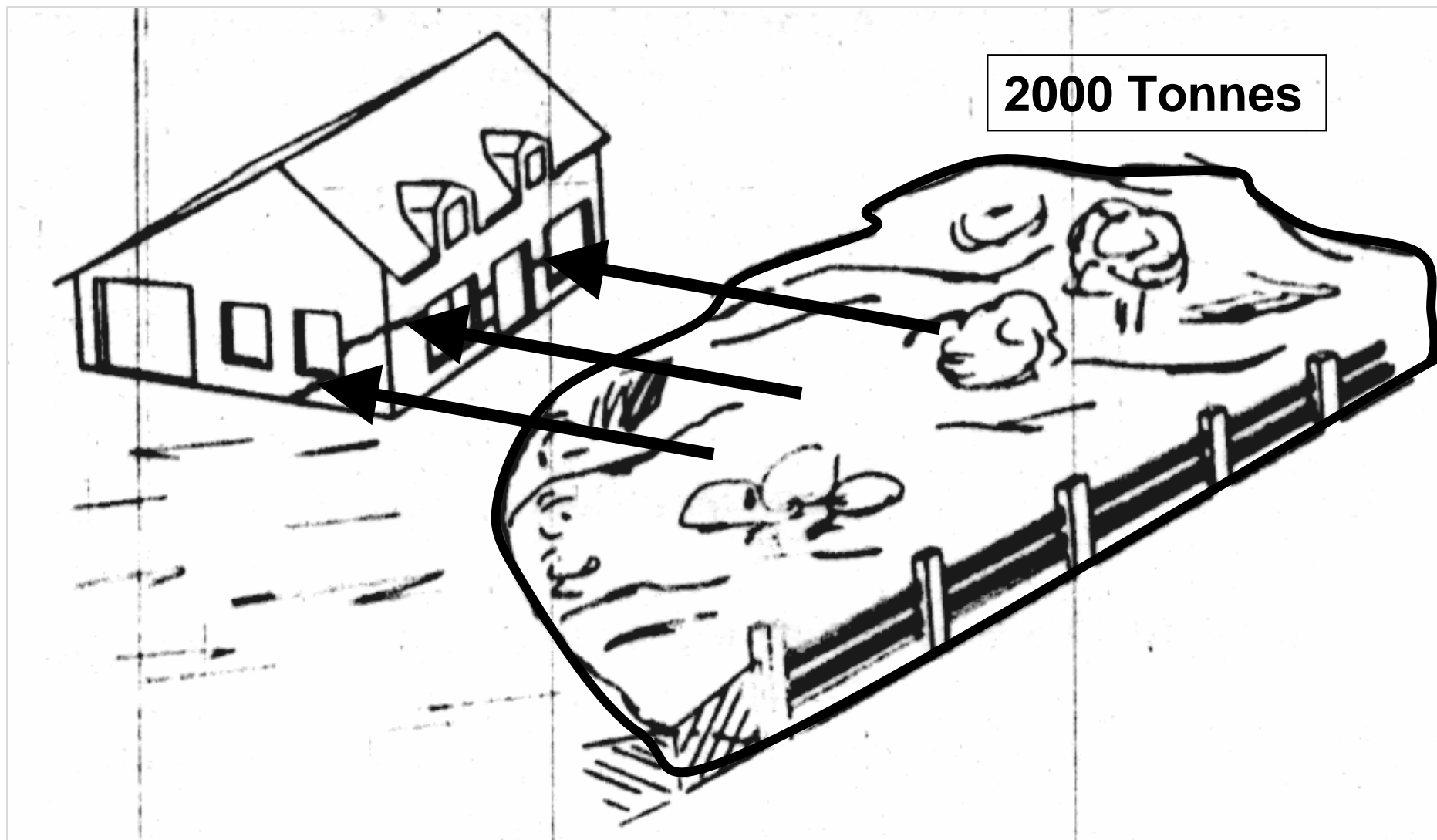
2.2. Remblais et autres surcharges.

On aime de nos jours, créer autour des habitations un environnement vivant en aménageant des buttes de verdure grâce à des apports de terre de plusieurs centaines de m³.

Si le sous-sol sous-jacent est compressible, il va tasser sous ces charges. En profondeur, ce tassement va s'atténuer, et s'étend en largeur en entraînant dans son mouvement des constructions voisines.

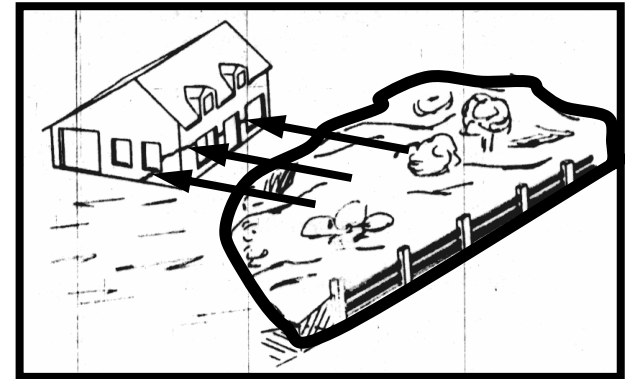
Exemple 1 :

un particulier s'étant fait construire un pavillon sur un terrain assez vaste à peu près horizontal, voulut aménager entre lui et la route une butte qui en masquerait la vue, atténuerait les bruits de la circulation et serait agrémentée de rocailles, de buissons et de fleurs.



Au bout de quelques mois des fissures apparurent dans les murs du pavillon, qui étaient de direction à peu près horizontales sur la façade orientée à la butte et prolongeaient obliquement vers le bas, en se retournant en pignon.

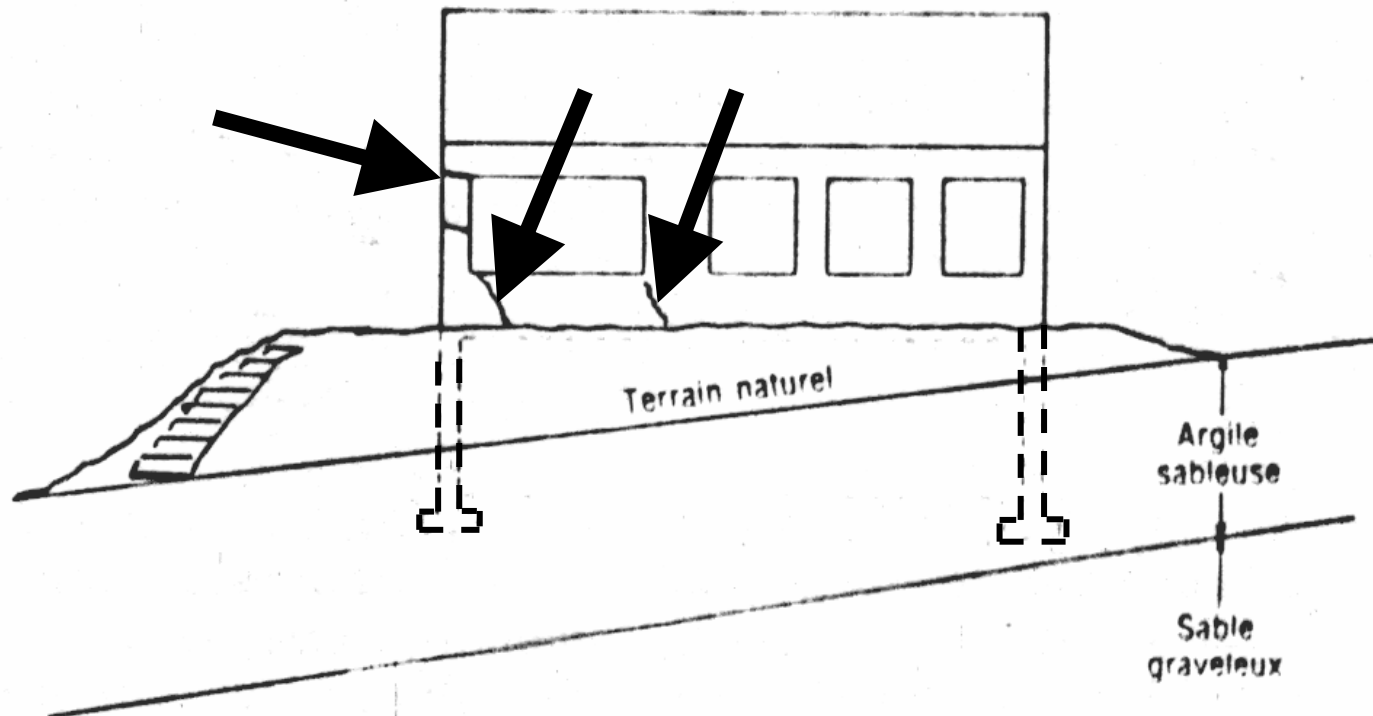
Causes : le terrain d'assise du pavillon est une argile sableuse relativement sèche, faiblement consolidée, qui avait à peine achevé son tassement sous le poids du pavillon de l'ordre de 200 tonnes. Les quelques 2000 tonnes de remblais apportés à proximité ont développé leur action en profondeur jusque sous le pavillon, y entraînant des tassements différentiels.



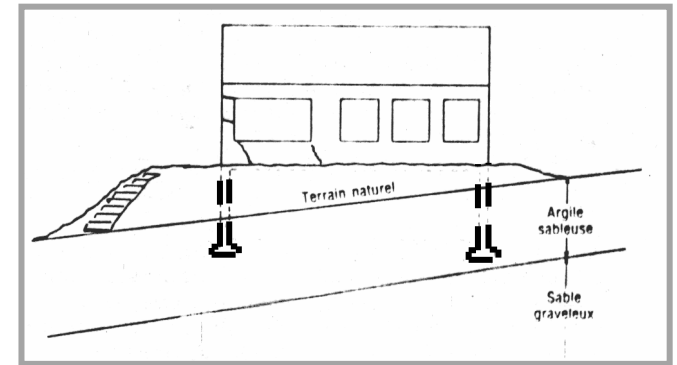
Remèdes : les facteurs provoquant les tassements n'ayant plus à varier, ces derniers tendaient lentement vers un nouvel état d'équilibre. Il fallut attendre pendant deux ans, que cet état fût atteint. Quand les témoins posés sur les murs ne se rompirent plus ; la pathologie accusée par le pavillon ne justifiant guère sa démolition. Aussi, les fissures furent soigneusement rebouchées et les enduits et peintures réfectionnés et tout est rentré dans l'ordre.

Même si le remblai paraît homogène et bien réparti autour d'une construction, il peut causer des désordres si le tassement qu'il provoque est irrégulier, du fait de l'hétérogénéité du terrain d'assise.

Exemple 2 : un pavillon réalisé sur un terrain en pente se fissure gravement peu après son achèvement, les fissures horizontales ou en V renversé se trouvent essentiellement dans l'angle affectant le côté situé en aval de la pente.



Causes : les fondations reposent sur une argile légèrement sableuse, surmontant une couche de sable graveleuse (à peu près incompressible), plus profondément vers l'aval que vers l'amont.

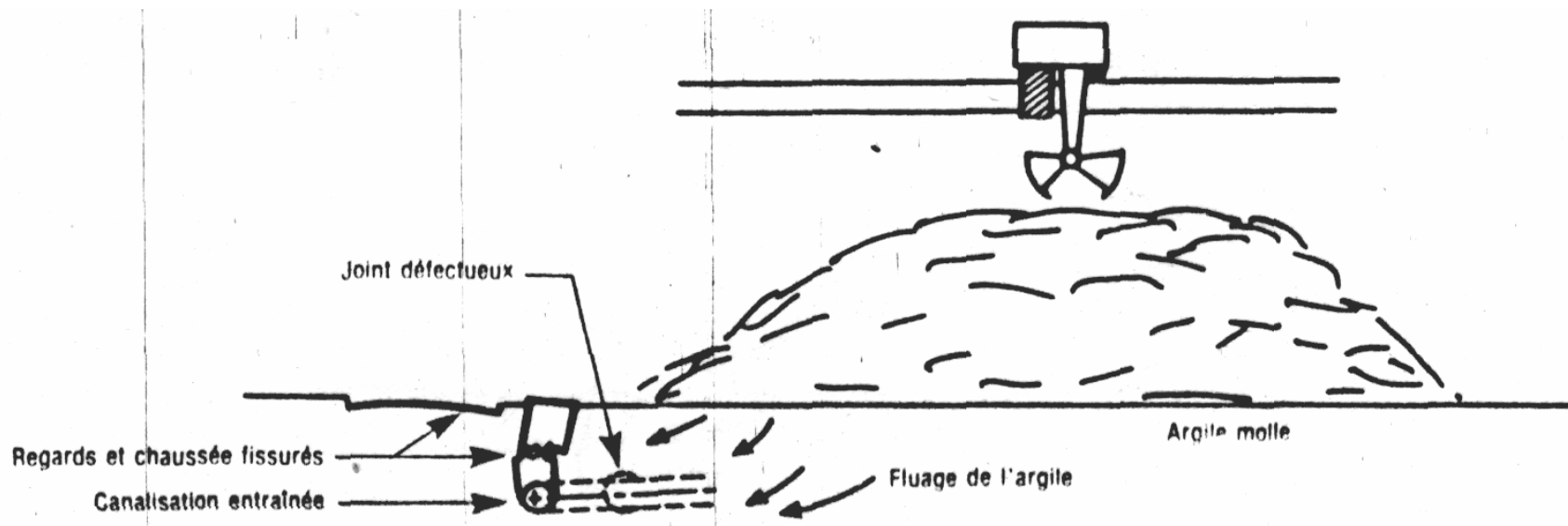


De plus, pour rattraper l'horizontalité, le talus entourant la maison était beaucoup plus important à l'aval qu'à l'amont. La plus grande charge à l'aval et la plus grande épaisseur de terrain compressible à cet endroit ont provoqué un tassement plus important.

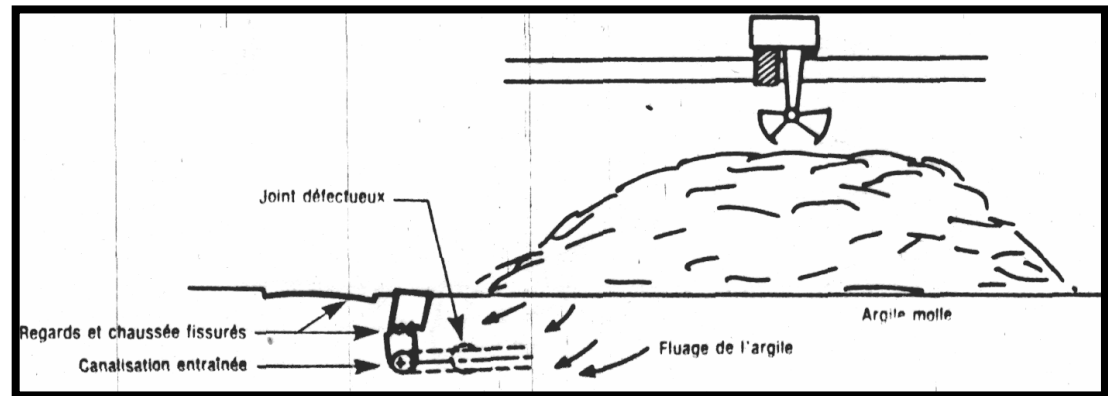
Remèdes : le tassement risquait de se poursuivre longtemps et atteindre une ampleur dangereuse pour le pavillon. Il faut soulager le sous-sol en aval de la pente en déblayant rapidement les terres en remblai de ce côté et construire un escalier pour reconstituer l'accès au pavillon.

Si le terrain est fluant (argile molle, tourbe, etc.), il va tendre à se déformer en périphérie vers des zones moins compacts. Il poussera alors sur tous les obstacles qu'il rencontrera et les renversera peut-être.

Exemple 3 : dans une usine, une grosse canalisation d'égout qui serpentait entre bâtiments et zones d'activité diverses, fut l'objet de trois déboîtements successifs, accompagnés de fuites abondantes, au même endroit, en l'espace de deux ans. Le phénomène se situait au droit d'un joint caoutchouc, entre une partie droite et un coude. Au-delà du coude, la canalisation longeait un parc de stockage de matières premières à l'air libre. Le sous-sol est constitué sur plusieurs mètres d'argile molle, souvent humidifiée par les eaux de ruissellement.



Une voie de circulation voisine revêtue en asphalte, comportait des fissures longitudinales et quelques effondrements.



En fait, l'argile molle était entrain de fluer latéralement sous le poids de milliers de tonnes stockées, entraînant dans son mouvement la canalisation, la chaussée et d'autres installations légères qui étaient à proximité. Par bonheur, le pont roulant, fondé sur pieux n'a pas bougé.

Remèdes : le terrain fut assaini par la pose de drains périphériques qui recueillirent les eaux de ruissellement. En outre, il fut consolidé sur toute l'étendue de l'aire de stockage par battage à la boule et par un quinconçage de pieux de sable.

2.3. Petites fouilles.

Lorsqu'un éboulement ne peut être dangereux pour les ouvriers qui travaillent, et que ses conséquences sont moins onéreuses qu'un blindage, il peut être légitime d'en prendre le risque. Tel est le cas de fouilles ne dépassant pas 1,30 m de profondeur dans lesquelles doit descendre un ouvrier, ou de fouilles plus profondes travaillées mécaniquement.

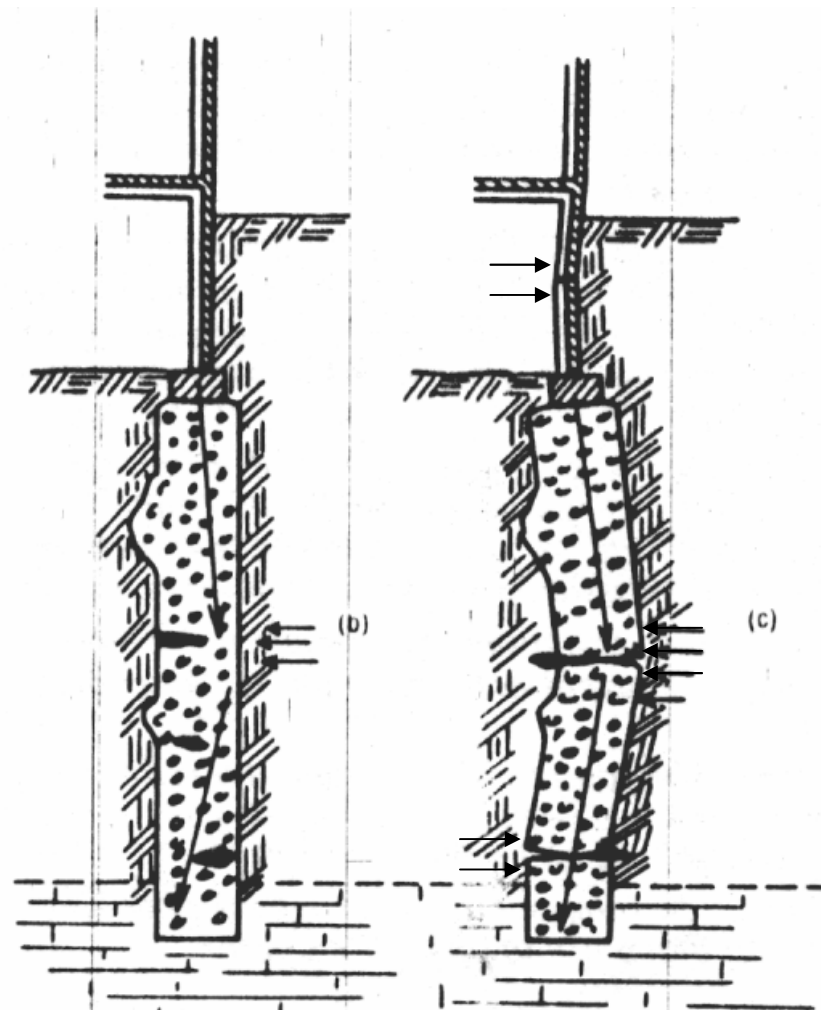
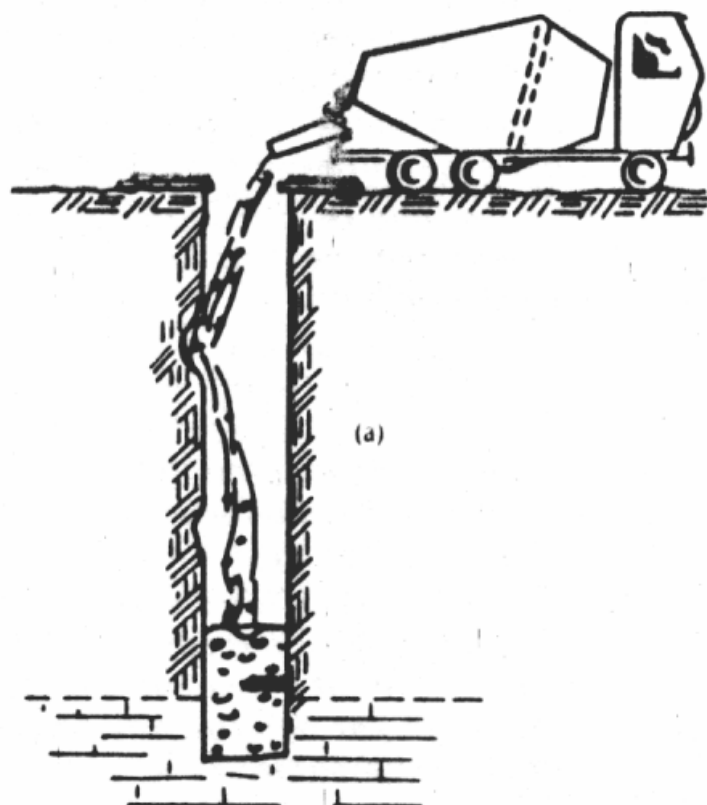
Toutefois une absence de blindage doit être considérée comme malfaçon si elle entraîne des risques certains d'éboulement, dommageables pour l'ouvrage à construire.

Exemple 4 :

dans un immeuble en béton armé récemment achevé, fondé sur puits en gros béton, certains poteaux se fissurent d'une manière apparemment anarchique dans la hauteur du sous-sol et du rez-de-chaussée.

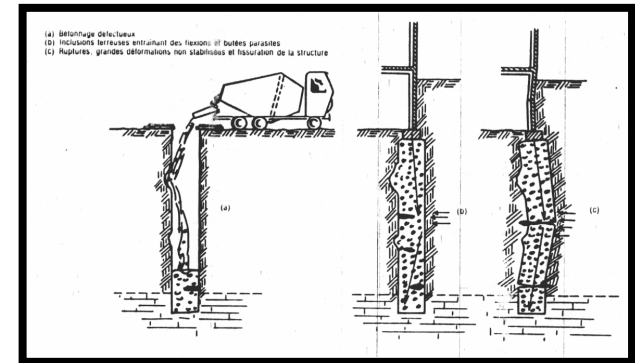
La fondation sur puits avait été choisie pour asseoir le bâtiment sur un bon calcaire, situé sous 6 à 8 mètres d'une argile tourbeuse de très mauvaise qualité.

- (a) Bétonnage défectueux
- (b) Inclusions terreuses entraînant des flexions et butées parasites
- (c) Ruptures, grandes déformations non stabilisées et fissuration de la structure



La fissuration des poteaux s'accompagnait d'autres fissures fines, horizontales ou en voûtes, dans les murs et cloisons attenants ; ce qui semble révéler de légers tassements.

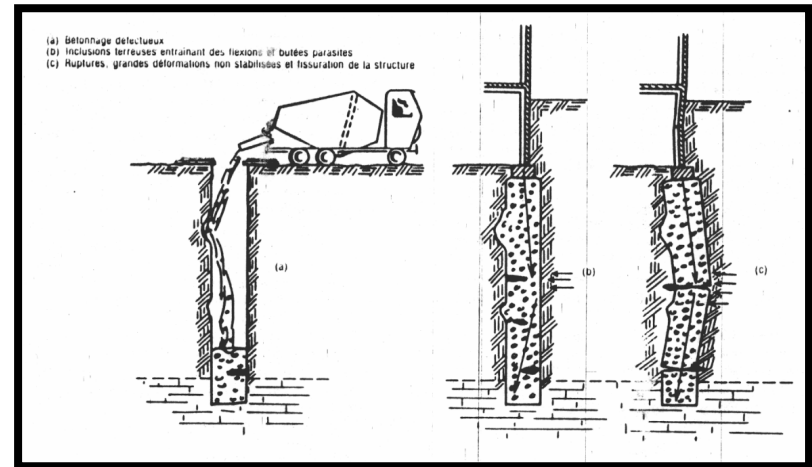
Causes : la pathologie observée semble désigner l'origine au sein des fondations. De nouveaux sondages montrèrent que le calcaire, terrain d'assise, ne pouvait être mis en cause.



En revanche, une auscultation des puits à l'aide de mesure du temps d'émission et de réception d'ondes vibratoires transmises verticalement dans le puits révéla des délais anormalement courts ; les ondes se réfléchissaient à une trop faible profondeur. Le creusement le long des puits incriminés, montrait que ces derniers présentaient des inclusions terreuses.

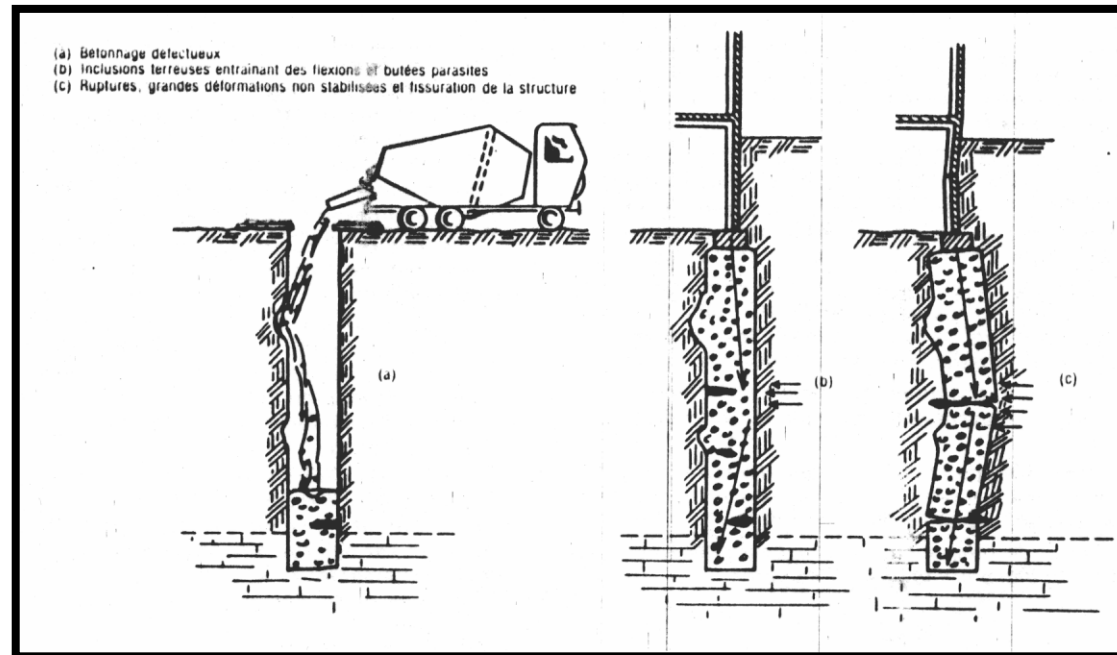
Finalement, l'explication donnée fut la suivante : à la réalisation des fondations, les trous creusés n'avaient pas été blindés. Les puits circulaires semblaient stables, le temps de les remplir de gros béton par période sèche.

Mais au coulage, le béton n'aurait été déversé avec précaution. La goulotte du camion toupie le projetait parfois contre la paroi latérale de la fouille entraînant par conséquent des terres.



Quand il arrivait qu'une grande masse d'argile se détache et prend place horizontalement dans la masse du béton, elle couvrait latéralement une large partie de la section du puits. Dès lors, la charge de l'immeuble n'est plus transmise au sol que par la partie saine, amoindrie et excentrée.

Durant les travaux, cette transmission se fit en mobilisant des flexions dans le gros béton du puits et des butées contre l'argile tourbeuse. Cette situation était transitoire : un gros béton non armé fléchi et se fissure et une mauvaise argile, sollicitée en butée, recule.



Enfin, les puits présentant les plus graves défauts se trouvaient rompus et les reports des charges avaient causé la fissuration des poteaux et murs.

Remèdes : Il fallut ausculter systématiquement tous les puits de fondation de l'immeuble. Ceux qui se révélèrent incapables de transmettre leurs charges furent doublés par deux pieux encadrants, foncés (creusés) en sous-œuvre en prenant appui sous les murs.

2.4. Tranchées.

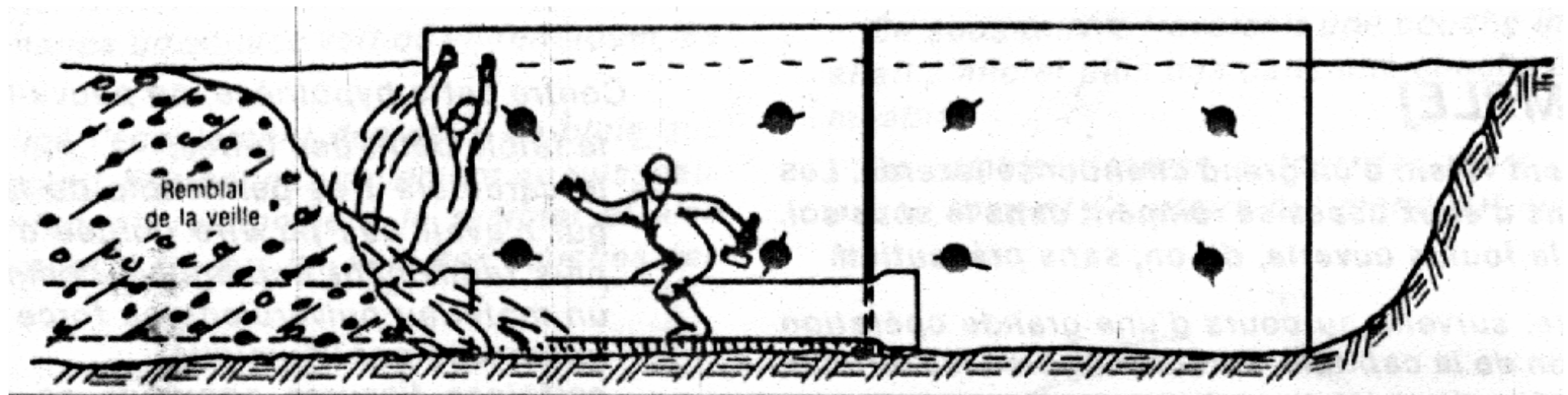
Le blindage des tranchées, aujourd'hui réglementaire, est parfois omis. Ses phases de pose et dépose sont délicates. Un décalage existe toujours entre creusement et pose des panneaux et l'on est toujours à la merci d'éboulements. Le blindage est là pour les limiter et pour abriter les ouvriers, lesquels ne doivent jamais s'écarter de leur zone de protection.

Exemple 5 :

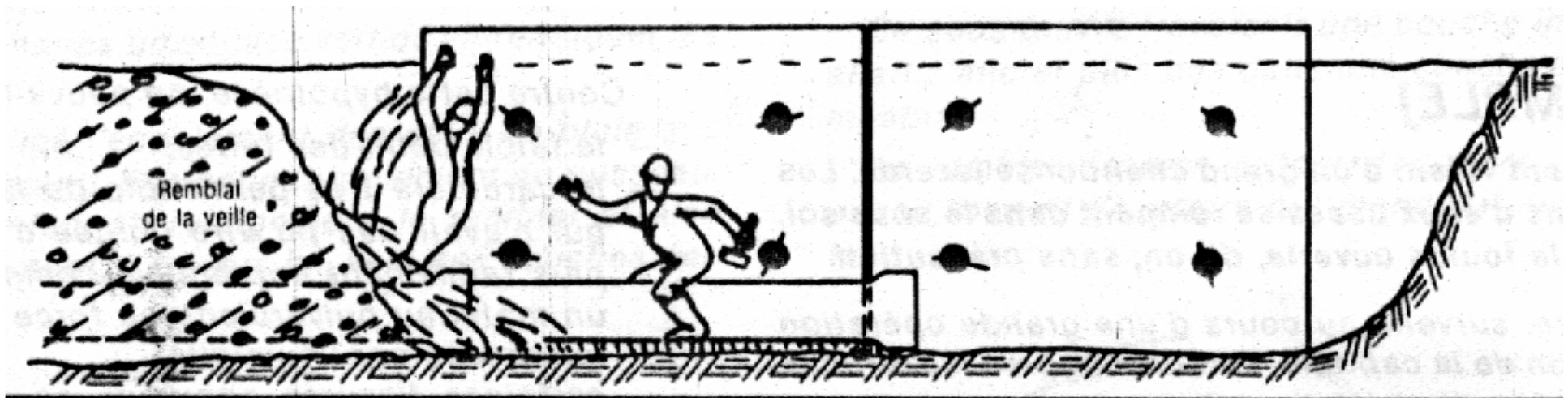
un ouvrier occupé par la dépose des blindages d'une tranchée est grièvement blessé par un éboulement. Il ne doit la vie sauve qu'à son équipement individuel de protection.

La tranchée avait été taillée mécaniquement dans une marne gorgée d'eau, pour poser une canalisation d'égout.

Une bonne centaine de mètres avaient déjà été réalisée et le travail marchait bon train. Chaque jour, les mêmes opérations se répétaient



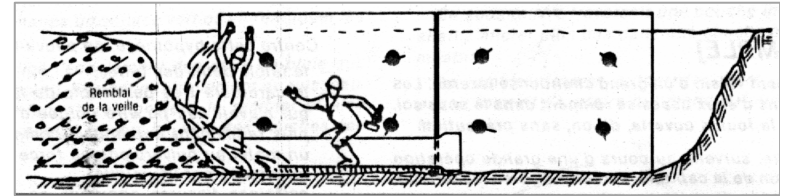
Chaque homme de l'équipe connaissait bien son affaire : le matin on prolongeait à la pelle rétro la tranchée de la veille, on descendait un double plateau de blindage et on le serrait fortement contre le flanc du terrain. On descendait avec la même pelle portant un crochet comme une grue, un tronçon de canalisation.



Trois hommes descendaient au fond, nettoyaient le bout de canalisation posé la veille, vérifiaient la bonne position du joint torique, et emboîtaient à force à l'aide d'un tire fort. Puis on allait enlever le double plateau de blindage, on remblayait jusqu'à 1 mètre de l'embouchure du tuyau que l'on venait de poser et on ramenait la pelle pour creuser un nouveau prolongement de la tranchée et recommencer les mêmes opérations.

C'est au moment où l'on desserrait le blindage à enlever que l'accident survint.

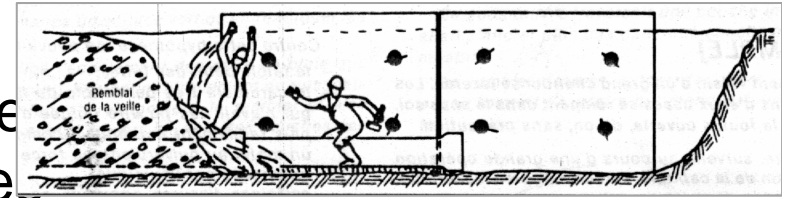
Causes : une règle de prudence est de toujours rester à l'abri du blindage. L'ouvrier chargé de desserrer les vérins à vis n'arrivait pas à débloquer celui qui se trouvait au fond, près de la partie fraîchement remblayée.



Il avait plu toute la nuit précédente et le terrain retenu, gorgé d'eau, poussait fort. De plus, le vérin insuffisamment graissé et trempé d'eau était grippé. Le chef d'équipe descendit aussi dans la tranchée, armé d'une masse pour forcer sur les oreilles de l'appareil. Le premier ouvrier se recula pour lui laisser le champ libre et se plaça côté remblai, en limite du blindage.

Le vérin se décoïna. On tourna la vis jusqu'à ce que les banches se fussent rapprochées de quelques centimètres, afin de supprimer quasi totalement la poussée du sol pour pouvoir remonter le blindage. C'est alors que l'ouvrier et son chef s'apprêtant à remonter hors de la tranchée, un éboulement se produisit.

La terre gorgée d'eau n'étant plus retenue se désagrègea derrière l'une des banche et s'écoula de côté, sur le remblai dont le talus était abrupt.



Alors, un mélange de cette terre marneuse et du remblai tomba dans la tranchée. L'ouvrier fut culbuté. Sa tête alla heurter le vérin du haut. Heureusement se fut qui prit le choc. Mais l'ouvrier se retrouva allongé à terre, bloqué contre un panneau du blindage, à moitié enseveli. Il avait une jambe et un bras cassés.

Moralité : Quand on doit travailler près d'une zone où des éboulements sont possibles, il faut toujours se tenir suffisamment éloigné de leur zone de chute, du côté d'une évacuation possible ; et se faire surveiller en permanence.

2.5. Fouilles larges.

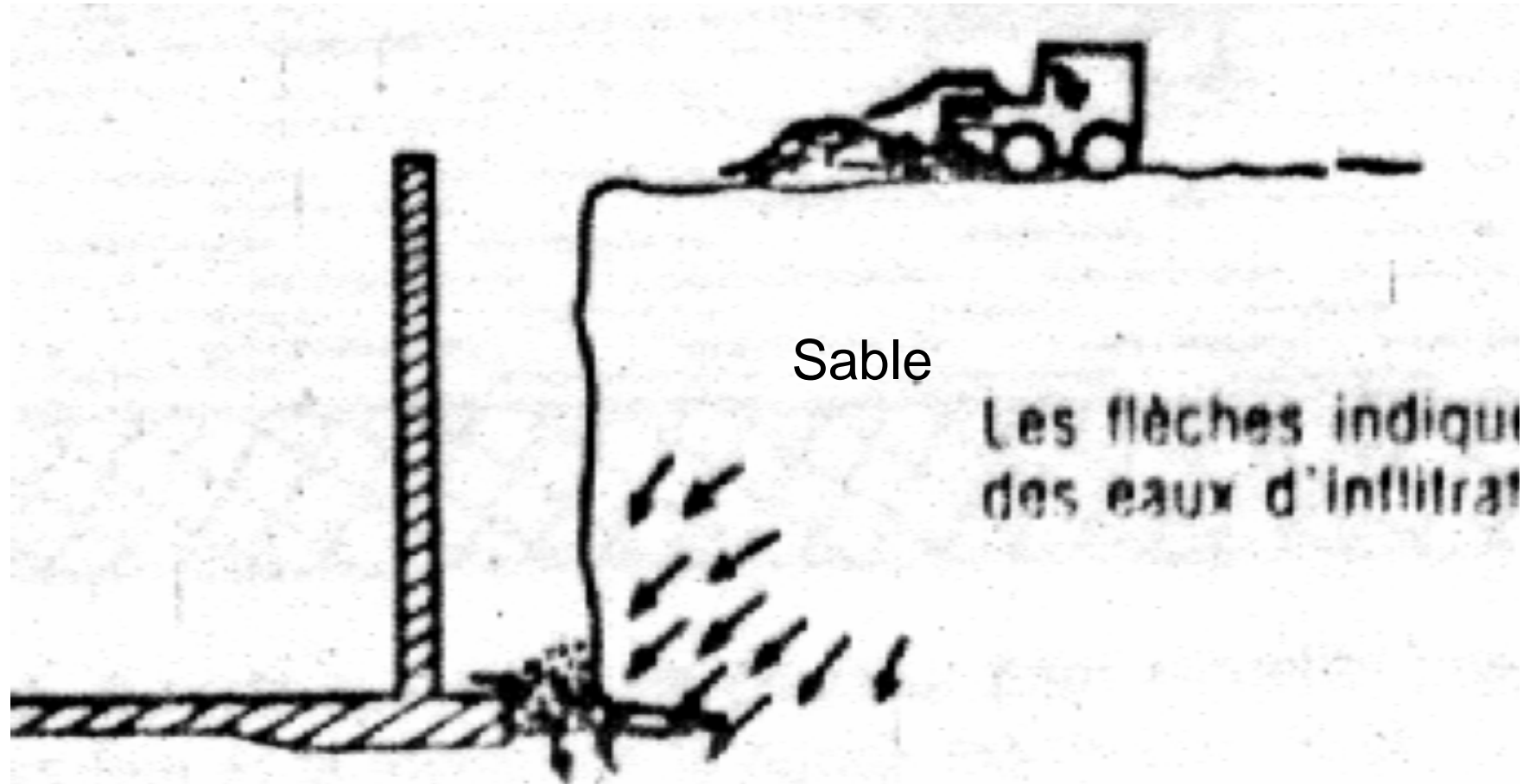
Quand la fouille est large, la pose d'un blindage efficace n'est pas facile. La réglementation étant ici moins contraignante qu'en tranchées, les négligences sont plus fréquentes. L'humidité du sol et de l'air a une influence prépondérante. Près de la mer, sur les côtes de sable fin et grâce à l'humidité occluse, on arrive à tailler verticalement des fouilles 4 à 6 mètres de hauteur.

La tenue de ces talus est parfois impressionnante : l'humidification excessive du fond de fouille et des pieds de talus par les fortes marées peut amoindrir la cohésion et provoquer des éboulements locaux à cet endroit. Le reste du talus se maintient en surplomb...ou cède tout à coup.

Exemple 6 :

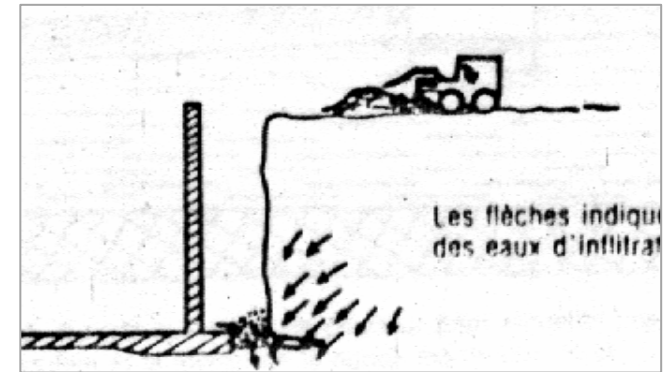
Sur un chantier industriel côtier, un bulldozer tombe dans une fouille. Un mort.

L'engin commençait le remblaiement entre le terrain sablonneux que l'on avait taillé verticalement et un bassin en béton armé qui venait d'être achevé dans la fouille.



Des camions avaient amené du matériau sablo graveleux et le bulldozer le poussait progressivement. Soudain, le terrain s'ouvrit sous l'engin, qui fut littéralement englouti. Le conducteur succomba à ses blessures.₂₄

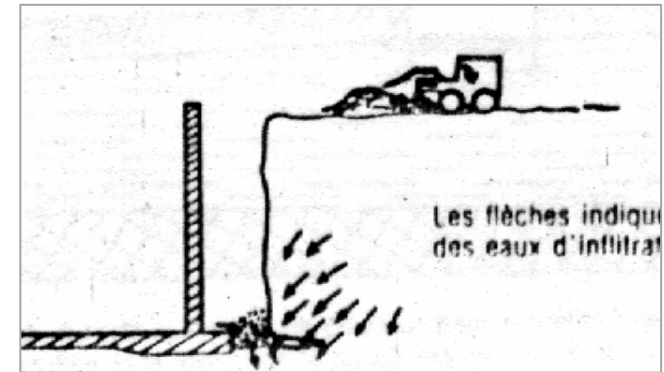
Causes : La fouille était restée ouverte plus de trois mois et avait paru bien se comporter. La dessiccation du front de taille provoquait la formation progressive d'une poussière fine qui, érodée par le vent, s'amoncelait au pied.



On ne voyait donc pas s'amorcer une cavité qui s'approfondissait lentement. D'une part, la fouille formait drain et l'eau de pluie, qui s'infiltrait, concentrait son cheminement à cet endroit.

D'autre part, le béton de propreté du bassin avait constitué dès son achèvement un réceptacle d'eau de pluie qui la rejetait en périphérie, tant que les parois n'étaient pas coulées. Le pied de talus trouvait ainsi deux causes d'imprégnation excessive, si bien qu'à cet endroit, le sable perdit vite sa cohésion et s'affaissa provoquant des fissures horizontales profondes que l'on ne voyait pas dans le terrain.

Moralité : La cohésion des sables humides est un phénomène fugace, dont il faut ne tirer parti qu'avec la plus grande prudence.



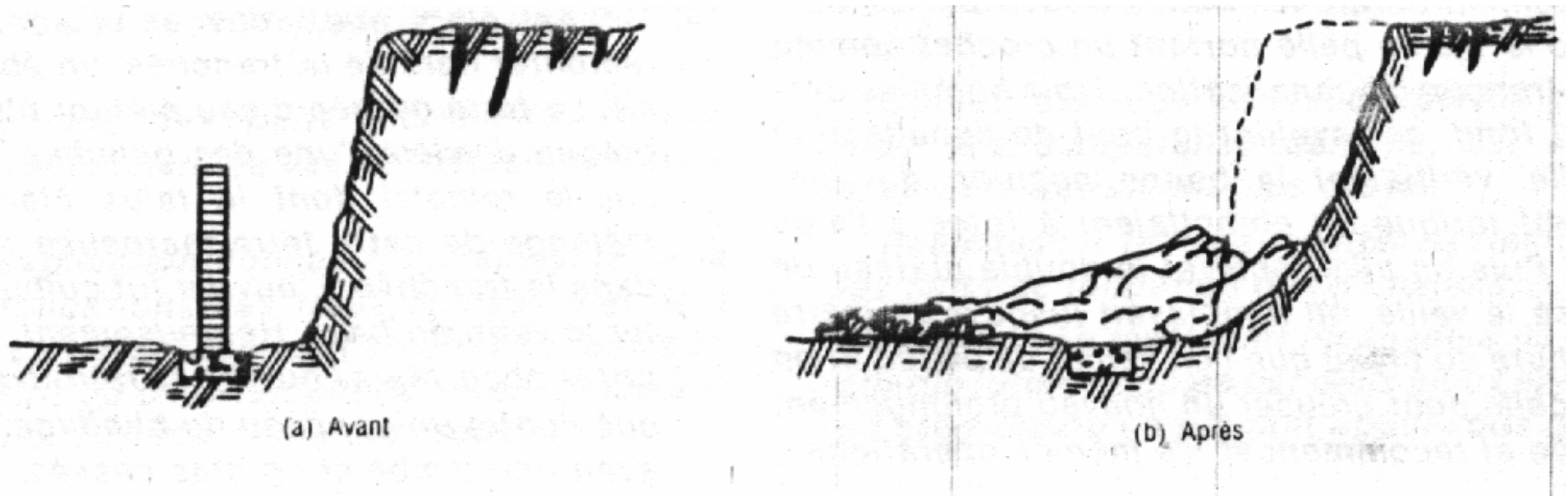
En terrain cohérent, l'action de l'eau est plus sournoise, car le flanc de taille apparaît généralement dur et sain, surtout par temps sec. Ce dernier contracte en superficie les terrains cohérents et y produit un faïençage.

Exemple 7 :

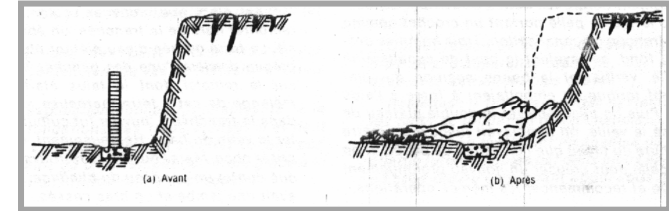
un éboulement de terrain, à proximité d'une fouille, renverse un mur en cours de construction. Pas de victime.

La fouille, destinée à la construction d'un pavillon, avait été creusée dans un terrain marneux assez consistant. C'était l'été. On traversait une période sèche et le flanc de terrain se tenait remarquablement bien.

L'entrepreneur en avait profité pour arrêter son terrassement au plus près des murs périphériques de sous-sol qu'il était entrain de monter. Mais une période orageuse approchait. Durant une fin de semaine, le temps se dégradra soudain et une pluie torrentielle se mit à tomber. En arrivant sur les lieux en début de semaine, il trouva son chantier ravagé par un vaste éboulement.



Causes : Durant la période sèche, le terrain voisinant la fouille s'était craquelé plus ou moins profondément.



Quand vint la pluie, l'eau s'infiltra dans les fissures. Chacune d'elles forma un réservoir étroit et profond dans lequel la pression hydrostatique tendit à écarter les parois, à élargir la fissure et, par suite, à l'approfondir encore.

Ainsi, progressivement se constitue, au sein du terrain bordant la fouille, tout un réseau de failles lubrifiées par l'eau, où la cohésion avait pratiquement disparu. Quand l'éboulement survint, une surface lubrifiée continue s'était formée, le long de laquelle la crête du talus put glisser. Le mur fraîchement monté, aux joints non durcis, fut facilement entraîné par la masse en mouvement.

Moralité : attention à l'eau après une période de sécheresse. Une bonne précaution est de recouvrir la face en talus et quelques mètres en arrière, par de grandes bandes de plastique. Elles protègent de la dessiccation aussi bien que des ruissellements.

2.6. Grandes fouilles profondes.

Les constructions urbaines modernes comportent presque toujours plusieurs sous-sols superposés, à usage de garages, entrepôts ou salles de service. Presque toujours ces constructions sont réalisées près d'autres plus anciennes, qui comportent tout au plus une cave.

Sur un côté on longe une rue soumise aux trépidations du trafic des véhicules. Ce sont là des conditions difficiles et périlleuses même si des précautions sont prises comme la réalisation de parois moulées ancrées dans le terrain de pourtour et le couvrement du front de taille de grandes feuilles en plastique étanches qui, en même temps, protègent de l'érosion pluviale.

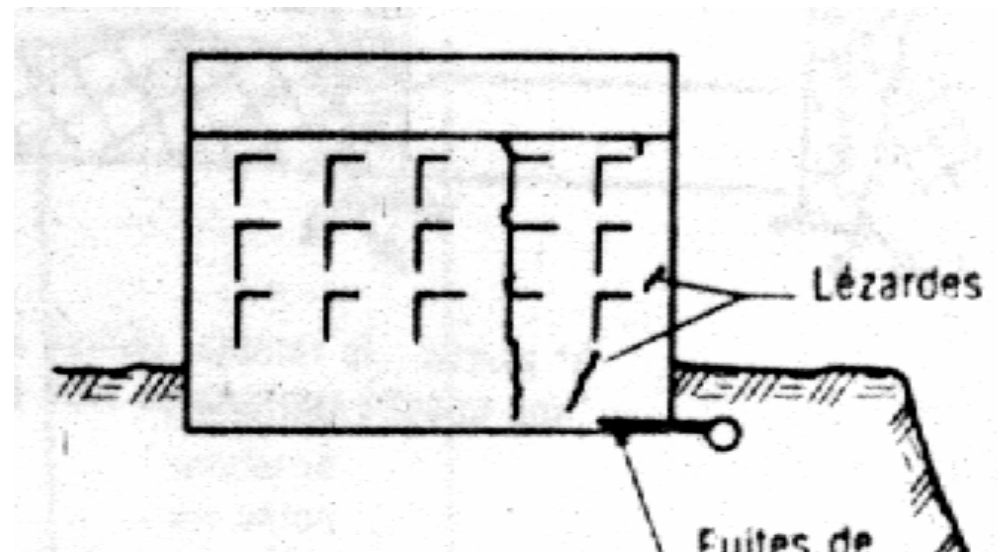
Malgré cela, il arrive que l'on produise une déformation du terrain qui entraîne quelques désordres dans les bâtiments voisins.

Exemple 8 :

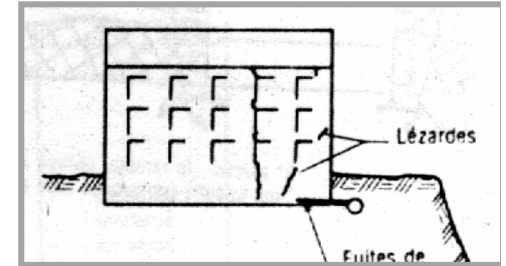
un bâtiment voisin d'un grand chantier se lézarde. Les canalisations d'eaux usées se rompent dans le sous-sol. Ce sinistre, survenu lors d'une grande opération de rénovation, caractérise bien les difficultés rencontrées dans les expertises.

Le bâtiment voisin était soigneusement entretenu, et l'on ne pouvait pas évoquer la vétusté. Les lézardes s'accompagnaient de déformation des baies et de coincement de fenêtres et des portes ; ces désordres provenaient manifestement des mouvements des fondations.

Causes : les constructeurs du chantier voisin, appelés pour réparer les dommages, prétextèrent que l'origine du sinistre était due aux fuites des canalisations en sous-sol.

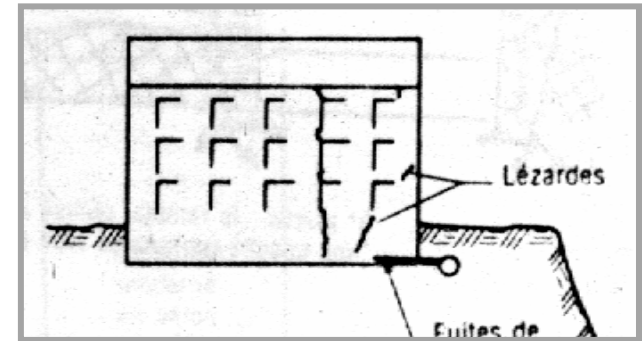


Les eaux qui s'en échappaient s'infiltraient dans le sol, noyaient la couche d'assise des fondations et réduisaient sa force portante. Contre cette hypothèse, on pouvait faire valoir :



1. Le faible débit des fuites,
2. Le caractère très perméable de la couche d'assise, qui n'avait pu être gorgée d'eau, mais tout au plus faiblement imprégnée ; comme c'était du reste un matériau pulvérulent, sa force portante était peu influencée par l'humidité,
3. Certaines fissures apparurent en surface du terrain dans d'autres zones voisines de la fouille, et qui étaient dues manifestement à une décompression du sol.

Remèdes : on posa des témoins sur des lézardes pour noter leur évolution. On répara les canalisations en cave et on attendit. On attendit que les travaux voisins soient sortis de terre et que tous les remblais soient terminés.



Tous les trois mois, on observait les témoins. Certains s'étaient cassés et on les remplaçait. Les mouvements s'arrêtèrent d'eux-mêmes quand l'ossature du nouvel immeuble atteignit le troisième étage. On colmata alors les lézardes. Malgré le soin apporté, leurs traces restèrent visibles, car l'enduit était un mouchetis tyrolien, et on ne put reconstituer le grain au dessus du rebouchage.

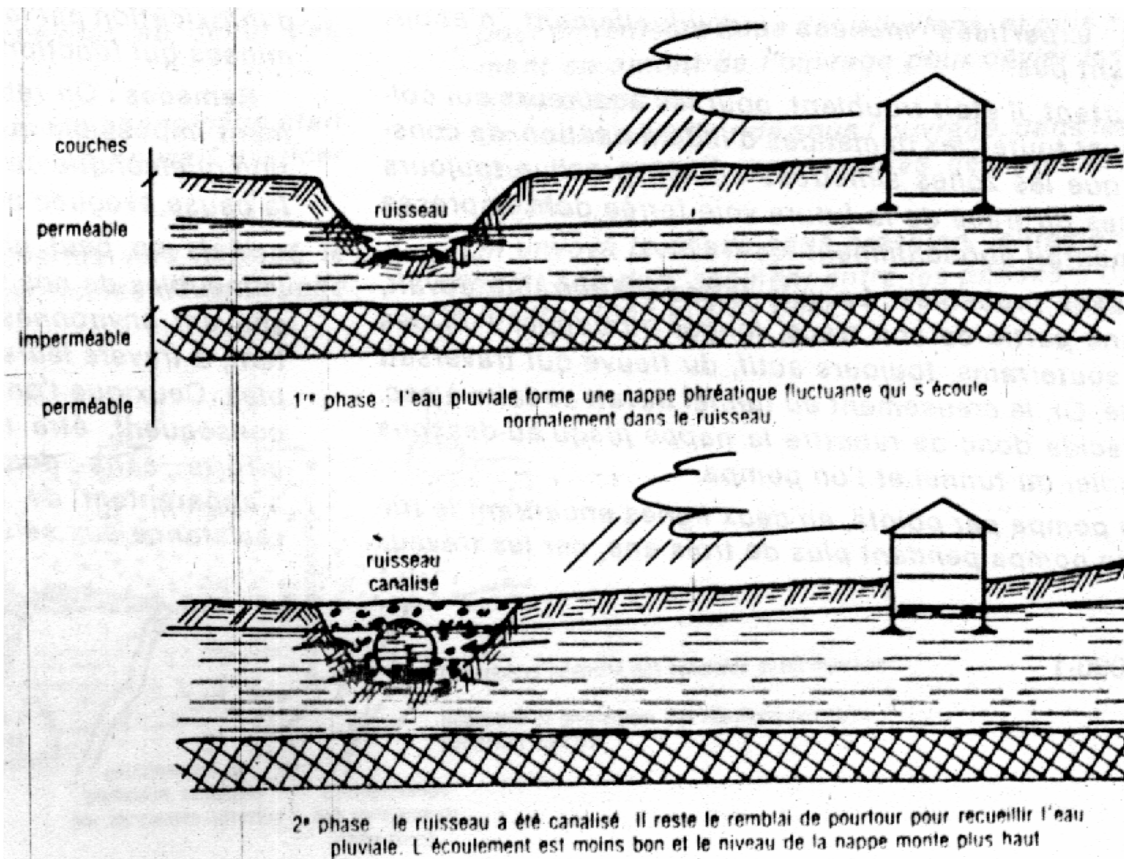
L'historique de ce sinistre, qui évolua pendant bien plus longtemps que les fuites en sous-sol, semble accuser nettement les travaux en fouille voisine, malgré les précautions réelles et sérieuses qui avaient été prises à l'égard des talus.

2.7. Circulations souterraines.

Nous avons examiné, jusqu'à présent, les sinistres causés par l'eau, en provenance principalement des variations atmosphériques : sécheresse ou pluie. Nous verrons aussi le problème des venues d'eau souterraines. Elles proviennent de la nappe phréatique soit qu'on la rencontre en creusant, soit qu'elle remonte et apparaisse après achèvement de la fouille ou du bâtiment.

Exemple 9 :

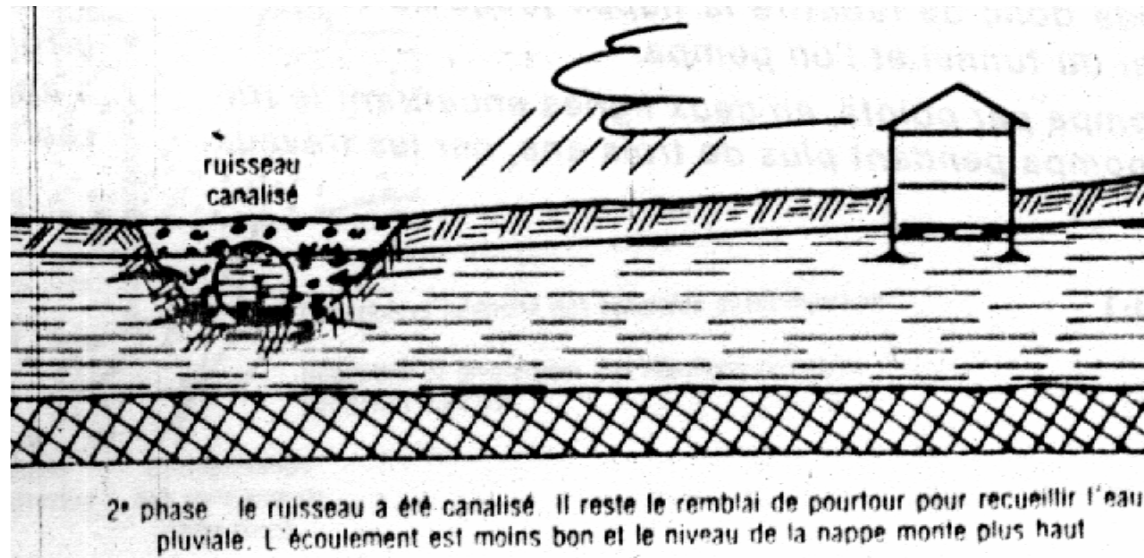
depuis quelques temps, des caves sont inondées après de gros orages. La municipalité réalisait un programme de travaux d'aménagements dans une commune pour l'amélioration du cadre de vie. On pensa que les venues d'eau avaient un rapport avec ces travaux.



Causes : elles en avaient un, en effet.

La commune était traversé par un ruisseau dont les eaux n'étaient plus limpides depuis fort longtemps et que la municipalité fit canalisé.

L'eau fut capté à l'entrée de la commune par une tuyauterie qui a été posée à même le lit du cours d'eau et qui rejoignit en aval, un tronçon déjà canalisé. On remblaya autour du tuyau et, par-dessus, on aménagea un espace vert où vinrent jouer les enfants. On avait négligé l'écoulement des eaux de pluie qui, allaient naturellement au ruisseau.

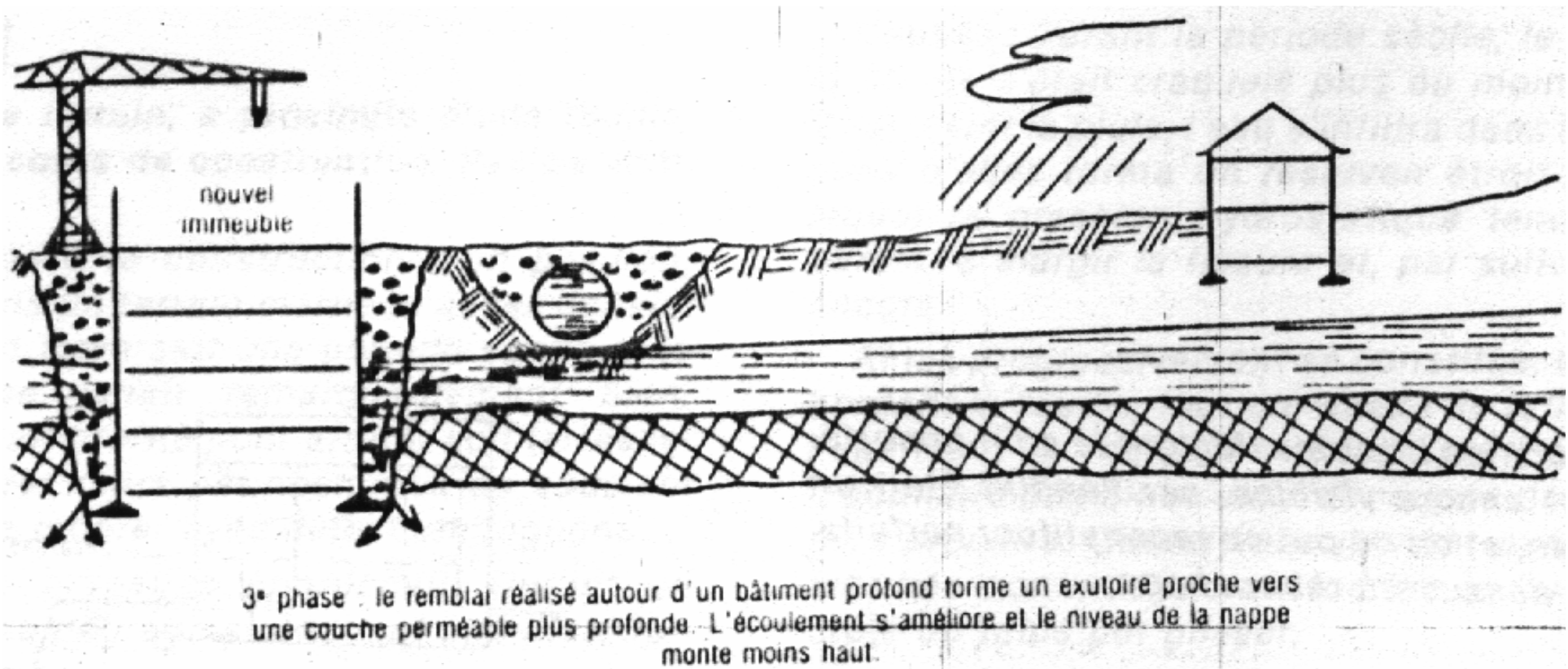


Ces eaux, maintenant, rejoignaient le remblai et s'en allaient péniblement, à travers lui, vers des couches perméables occasionnelles où elles trouvaient tant bien que mal un exutoire.

En fait, l'écoulement était devenu très mauvais, et le niveau de la nappe montait bien plus haut qu'avant, et atteignait parfois les caves de certains immeubles et pavillons.

Remèdes : les habitants parvinrent-ils à faire admettre le phénomène aux services Travaux de la municipalité ? Ils ne le surent jamais et ne reçurent aucune indemnisation.

Mais un beau jour les inondations cessèrent.



Les travaux d'aménagement avaient été poursuivis et l'on venait de réaliser, en bordure du ruisseau canalisé, le sous œuvre d'un grand bâtiment comportant quatre sous-sol de garage.

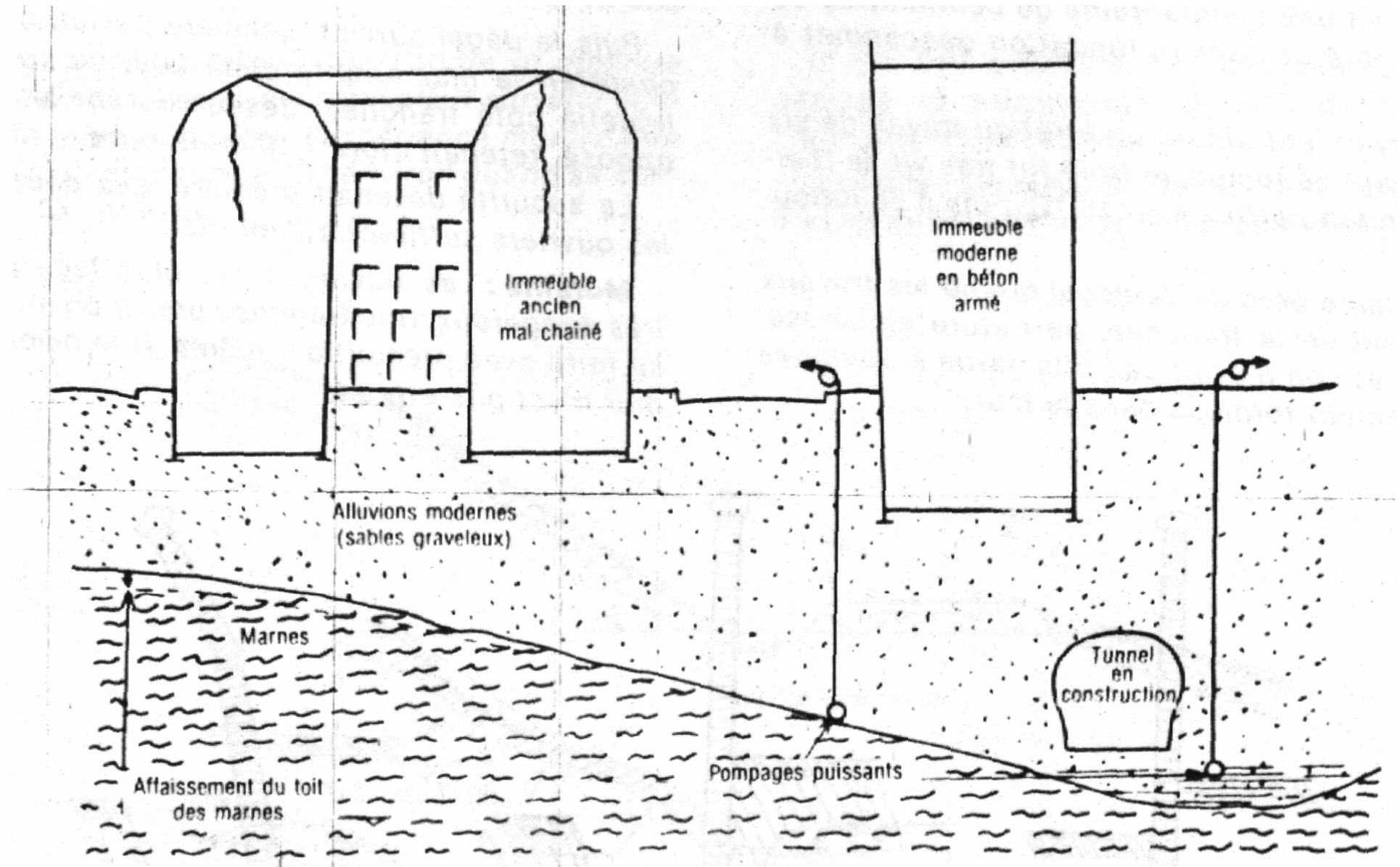
Ce sous-œuvre traversait une couche imperméable et s'allait s'ancrer plus bas dans une couche perméable. Le remblai déversé autour des murs, perméable lui aussi, formait l'exutoire qui manquait aux eaux pluviales.

Transformations des terrains voisins.

Tout rabattement important et durable d'une nappe phréatique peut devenir dangereux pour les constructions environnantes. En effet, les couches asséchées ont tendance à se contracter, et la surface du terrain risque de s'affaisser légèrement. Si ce dernier n'est pas régulier, dans l'emprise d'une construction, celle-ci va subir par ses fondations des efforts de déformation qui tendront à la fissurer.

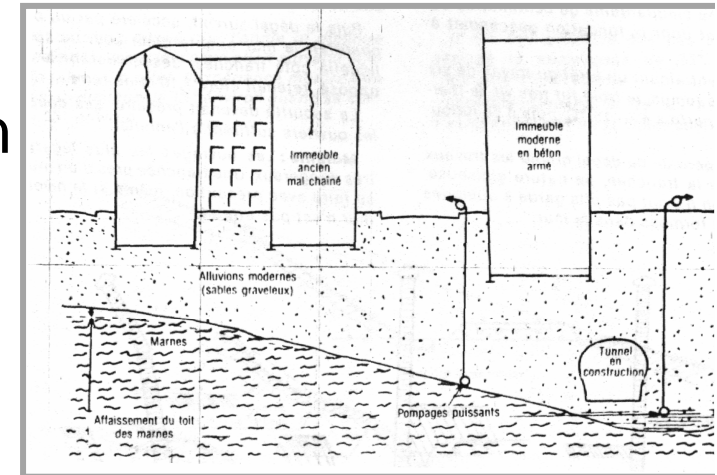
Exemple 10 :

au centre d'une grande ville, à l'époque de la construction d'une voie ferrée souterraine, de nombreux immeubles se fissurent. Les fissures apparaissent surtout aux étages supérieurs des immeubles. Elles étaient fines, d'allure à peu près verticale. Elles atteignaient uniquement les bâtiments anciens et l'on était tenté de les attribuer, faute de mieux, à la vétusté.



Il était troublant, pourtant, que les zones sinistrées fussent presque toujours proches du tracé de la future voie ferrée.

Causes probables : la voie ferrée souterraine devait, sur une partie de son tracé, longer ou couper l'un des bras souterrains, toujours actif, du fleuve qui traversait la ville. Or, le creusement du tunnel devait se faire à sec.

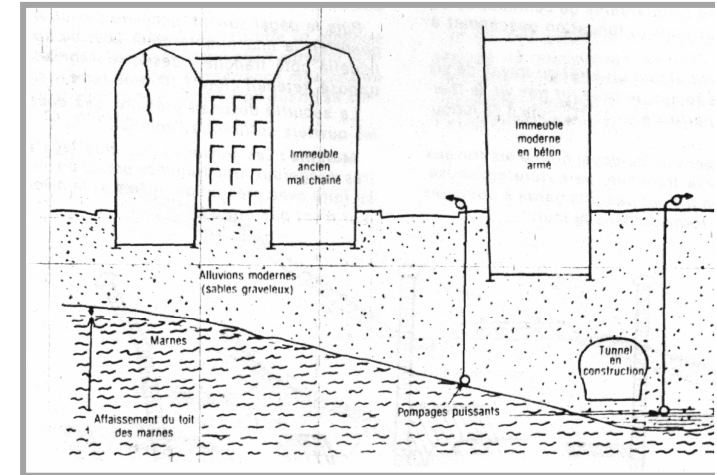


On décida donc de rabattre la nappe jusqu'à un niveau plus bas que le radier du tunnel et l'on pompa par points, en deux lignes encadrant le tracé. Le pompage dura plus de trois ans, car les travaux étaient laborieux et lents. On pompa si bien que les couches supérieures, jadis noyées, s'asséchèrent.

Il s'en suivit des tassements de faible amplitude, mais de grandes étendues, que supportèrent bien les immeubles à structures de béton armé, moins que ceux en pierre, en planchers de bois ou de fer.

Quand ces fissures verticales affectèrent des pignons maçonnés, elles se formèrent bien évidemment dans les lignes de plus faible résistance que constituaient les conduits de fumée incorporés, et il y eut quelques cas d'intoxications dues aux émanations de gaz en provenance de cheminées qui fonctionnaient encore pour le chauffage.

Remèdes : on reboucha les fissures, et il fut impossible aux victimes d'obtenir une indemnisation quelques de la part des constructeurs du tunnel, la cause évoquée ne pouvant être démontrée.



Moralité : les immeubles en milieu urbain sont sujets de plus en plus dans les environs immédiats à de grands travaux qui les soumettent, à travers leurs infrastructures, à des efforts considérables qu'il faut prendre en considération lors des études de conception.

2.8. Consolidation par injection .

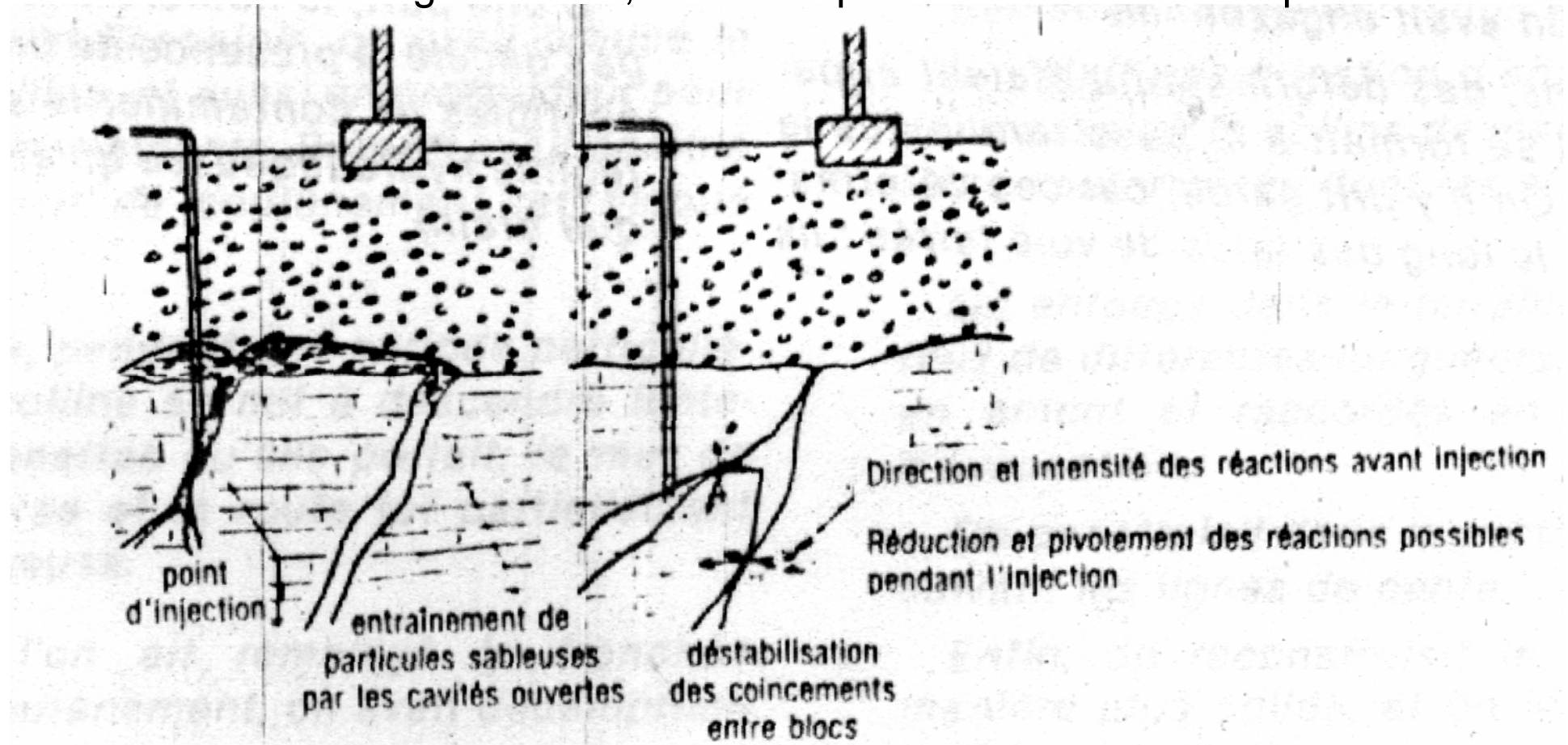
On consolide un terrain karstique, i.e. : contenant des cavités de dissolution. En remplissant ces dernières par un coulis de ciment qui durcit afin de reconstituer la continuité initiale de la roche.

Le coulis est injecté sous pression plus ou moins forte. Tant qu'il est liquide, il peut causer les mêmes ennuis que les eaux souterraines. On maîtrise mal d'ailleurs son écoulement, car il peut être, dilué et entraîné par une nappe souterraine en mouvement, ou simplement s'écouler par son propre poids le long de fractures qui le conduisent bien loin de la zone à consolider. Dans l'un et l'autre cas, le travail est fait en pure perte.

Exemple 11 :

en vue d'arrêter des tassements hétérogènes qui mettent en péril un grand ouvrage de génie civil, on commence des injections en vue de consolider le terrain. Les tassements s'accélèrent. 41

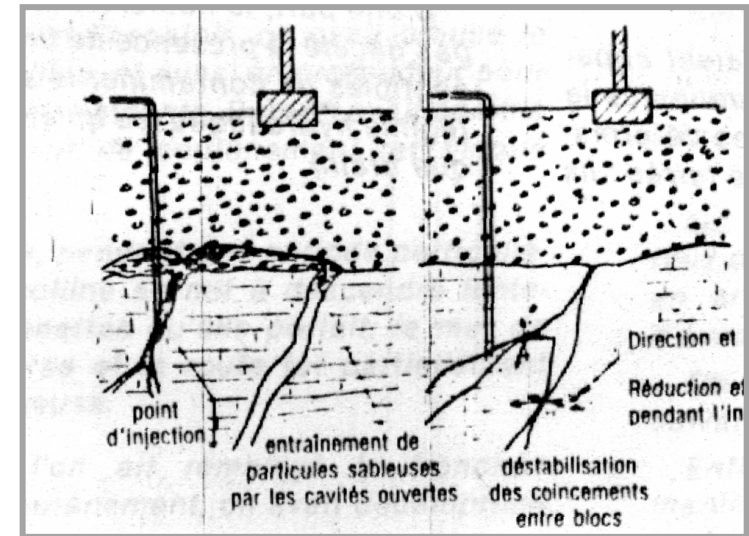
Les sondages préalables à la construction n'avaient rencontré aucune anomalie du sous-sol et l'on ne savait pas que, sous une bonne couche d'alluvions sablo-graveleuse, la craie réputée saine était karstique.



Les tassements provenaient probablement des cavités de la craie, qui avaient tendance à se refermer sous les nouvelles charges. L'injection devait les remplir et ainsi, arrêter les mouvements. Tel fut bien le cas en définitive, mais après une période de vive inquiétude car les tassements, régulièrement contrôlés, s'étaient accélérés au début des opérations d'injection.

Causes : le phénomène était dû à l'action du coulis liquide et l'on peut avancer quelques explications :

- Quand des cavités étaient ouvertes vers le haut, le coulis pouvait entraîner des particules de la couche d'alluvions sus-jacente.



- Les cavités découpaient des blocs qui s'appuient les uns sur les autres suivant des efforts passant en biais. Le coulis liquide lubrifiait ces zones d'appui, et repoussait les blocs sous l'effet de sa pression et ainsi, provoqua certains glissements,

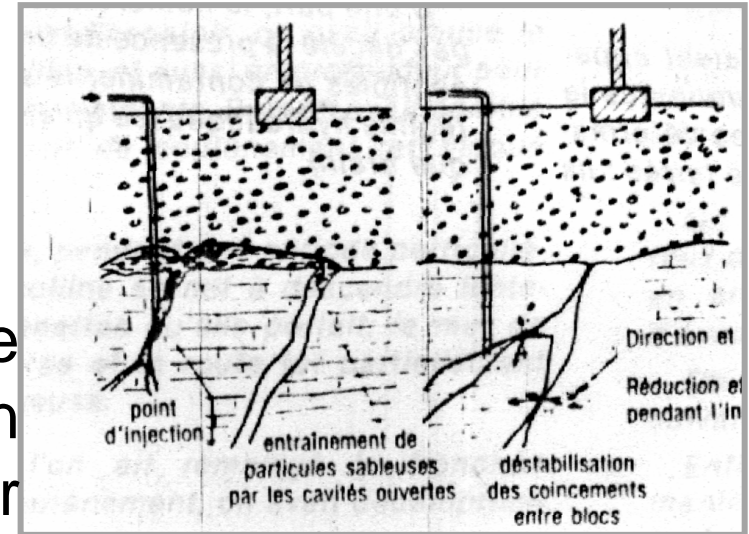
- La surcharge apportée au terrain par l'ouvrage, facilita évidemment le phénomène.

On s'aperçut, par ailleurs que du coulis était entraîné au loin, car en vit arriver dans une fouille située à 200 mètres de là.

Remèdes : on décida de modifier la technique d'injection en employant deux types de coulis :

- Un coulis épais, peu susceptible d'entraînement que l'on envoya, en première phase sous l'ouvrage pour cimenter la base des alluvions et plus profondément en amont de l'ouvrage pour dévier les circulations d'eau.
- Un coulis plus liquide sous l'ouvrage, dans les cavités que l'on rendait responsables des premiers tassements.

On envoya le coulis sans pression, lentement, et l'on attendit son durcissement entre les phases de l'opération. Ce fût très long et très cher.

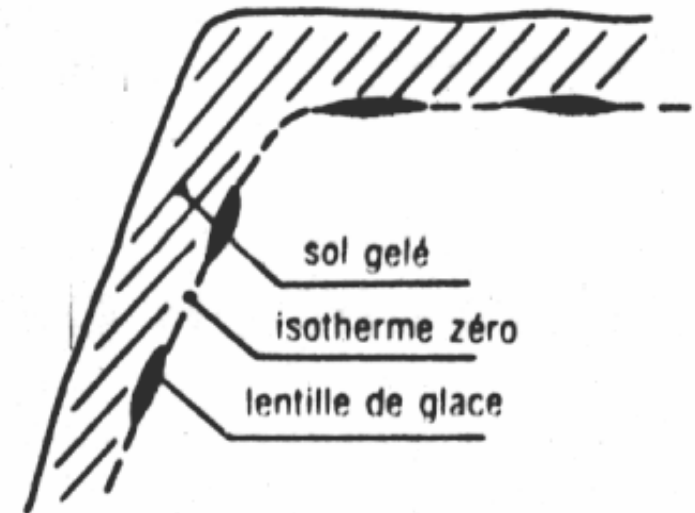


2.9. Gel et dégel .

Par période de gel, la couche superficielle du sol atteignant des températures inférieures à 0°C ne dépasse guère quelques décimètres en zone côtière et supérieure à 1 mètre en zone de montagne.

Quand l'eau gèle, deux phénomènes se produisent simultanément :

1. L'eau se transforme en glace. Ce changement d'état est accompagné par un accroissement de volume d'environ 9% (masse volumique de la glace diminuée : $1/1.09 = 0.92 \text{ T/m}^3$).
2. L'eau à l'état liquide disparaît, ce qui modifie l'équilibre hygrométrique du milieu.



Quand la surface du sol gèle, l'eau qui s'y trouve gèle aussi, la couche limite de gel étant l'isotherme zéro.

Toute l'eau se transforme en glace et le sol devient sec ; ce dernier continue à attirer l'eau capillaire ascendante. Ainsi la glace attire la glace, et il s'accumule en masse à allures de lentilles pendant toute la période où l'isotherme zéro se trouve à peu près stabilisé dans le sol. Au sein des lentilles, le gonflement dû à la transformation de l'eau en glace se situe dans les interstices des particules de sol. Il entraîne un léger écartement entre particules qui produit leur dislocation.

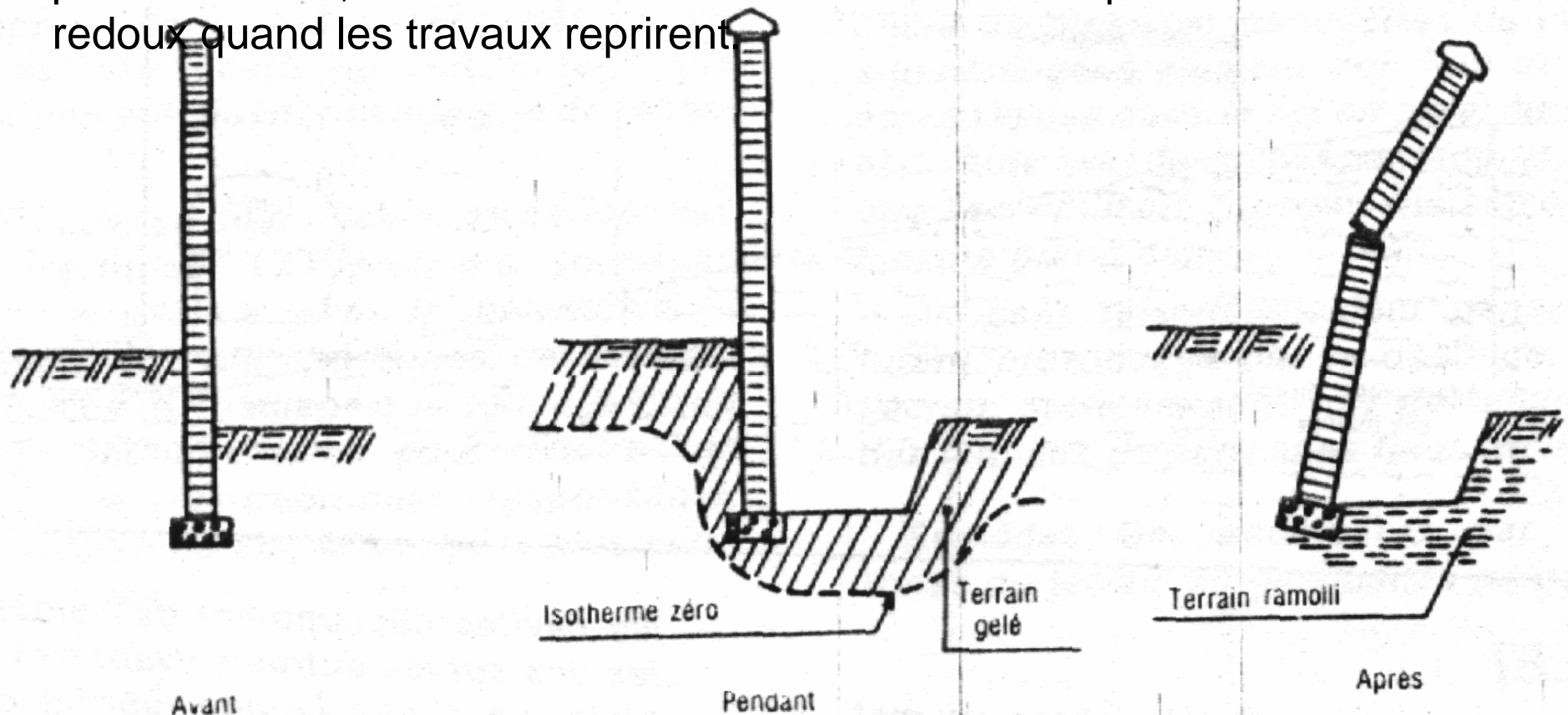
Exemple 12 :

un mur de clôture s'effondre pendant la pose de câbles électriques. 3 morts.

On installait des câbles électriques sous le trottoir en période hivernale, près des habitations à une profondeur d'environ 60 cm

La tranchée peu profonde longeait sur une vingtaine de mètres un mur de clôture qui retenait 50 cm de terre de l'autre côté et dont la fondation descendait à 80 cm.

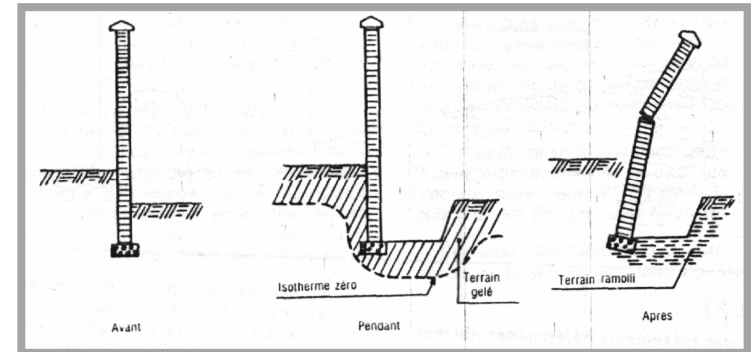
Une grève devait arrêter le travail pendant six semaines. Le long de cette période d'arrêt, le thermomètre descendait à -15°C et puis s'en suivit le redoux quand les travaux reprirent.



Le fond de la tranchée, de nature glaiseuse, était détrempé et l'on ne pris pas garde à quelques fissures fraîchement formées dans le mur. Les ouvriers étaient occupés à damer une couche de sable épanchée au fond de la tranchée quand le mur bascula tout à coup de leur côté.

Causes : la garde au gel du mur initialement de 80 cm, fut réduite à 20 cm en présence de la tranchée.

Le sol d'assise gela, et la glace souleva légèrement le mur, ce qui le fissura et le désolidarisa des ouvrages voisins, plus massifs et fondés plus profondément.



Puis à l'arrivée du dégel, accéléré par le réchauffement du mur orienté plein sud, le sol d'assise se liquéfia côté tranchée, déséquilibrant le mur, qui, côté opposé, retenait alors 1,10 m de terre. La sécurité devenait précaire. Les coups donnés par les ouvriers suffirent à l'annuler.

Moralité : Les ouvrages les plus légers sont parfois très dangereux. Une tranchée près d'un mur doit toujours se faire avec précaution, même si le niveau d'assise du mur n'est pas atteint. Aussi, une bonne règle quant au gel c'est de descendre les fondations au moins aussi bas que cette profondeur appelée la **garde au gel**.

2.10. Terrain en pente .

I., Terrain meuble :

Le problème des éboulements de surface impose de limiter l'inclinaison des terrains meubles pulvérulents à l'angle du talus naturel, désigné par ' α ', alors que la stabilité en profondeur s'accommoderait d'une pente d'angle ' φ '.

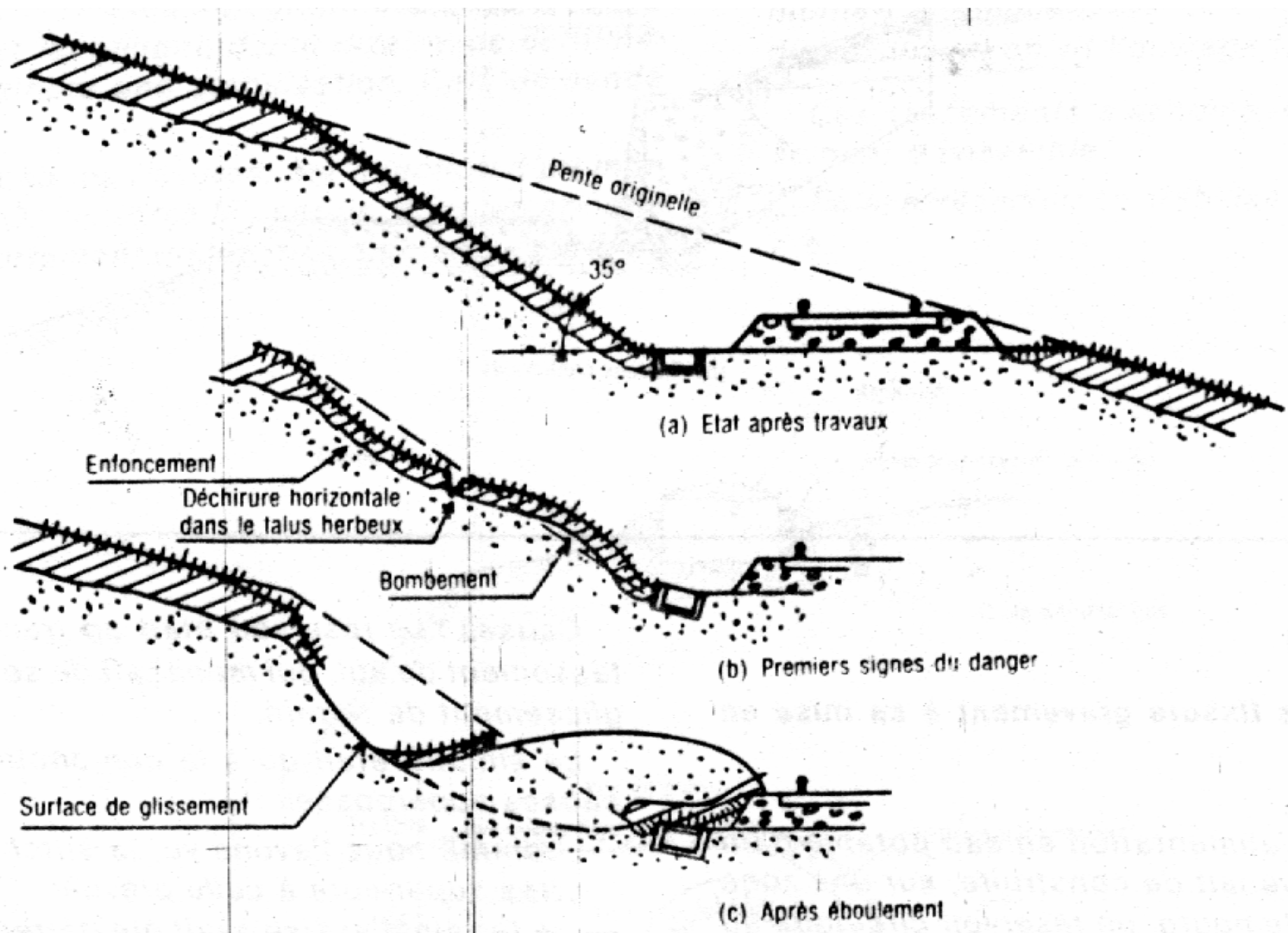
On peut réaliser des pentes à l'angle ' φ ', à la condition d'empêcher ces éboulements de surface. Pour cela, on couvre cette dernière de plantation ou d'une maçonnerie de pierre sèche appelée « perré ». Ainsi sont réalisées les talus longeant les voies ferrées et les routes. Mais, il s'agit de pentes limites, exigeant une bonne connaissance si l'on veut éviter des déboires.

Exemple 13 :

le long d'une voie ferrée en déblai, plusieurs kilomètres de talus se déversent sur la voie.

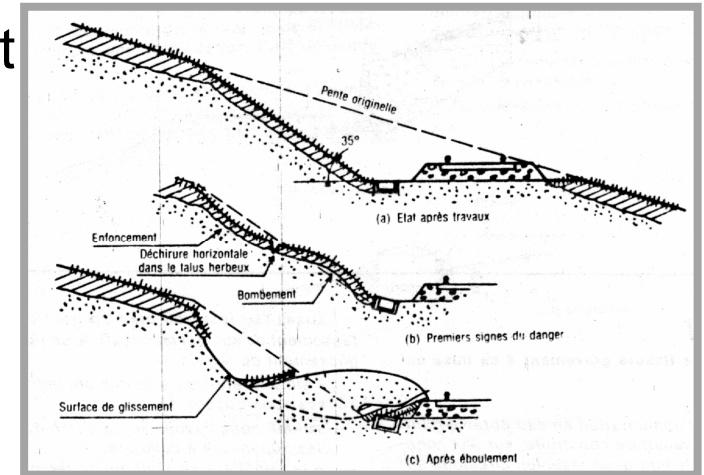
La voie de chemin de fer traversait une région d'éboulis sableux en pente douce. Le talus avait été taillé à 35° , à la suite d'une étude géologique avec prélèvement d'échantillons sur le tracé et études en laboratoire. En effet, les essais au laboratoire avaient donné au triaxial les caractéristiques moyennes suivantes : $c = 5000 \text{ Pa}$ (valeur négligeable) et $\varphi = 38^\circ$. L'angle de 35° paraissait donner une sécurité suffisante.

On avait soigneusement recouvert les talus de 20 cm de terre végétale, qui a été engazonnée. Au bout de cinq ans, des déformations étaient apparues : un bombement se formait à la base, tandis que le sommet se creusait. Des éboulements survinrent et en de nombreux endroits, été observés des déchirures horizontales en surface du talus, vers la mi-pente. L'herbe les masquait en partie.



La ligne était à voie unique ; il fallait interrompre le trafic pour commencer les travaux de réfection et de consolidation qui duraient des semaines. ⁵¹

Causes : L'étude géologique entreprise était un peu légère. D'une part, le nombre de forages, insuffisant, n'avait pas décelé la présence de fines couches argileuses, susceptibles de contaminer le sable en cas de variation du régime hydraulique (ce qui allait transformer la tranchée en tant que drain).



D'autre part, l'angle φ diminue quand le sable foisonne (ce qui survient également sous le talus). Il est fort probable que ces deux facteurs avaient diminué φ sous 35° dans les zones où l'équilibre s'était rompu.

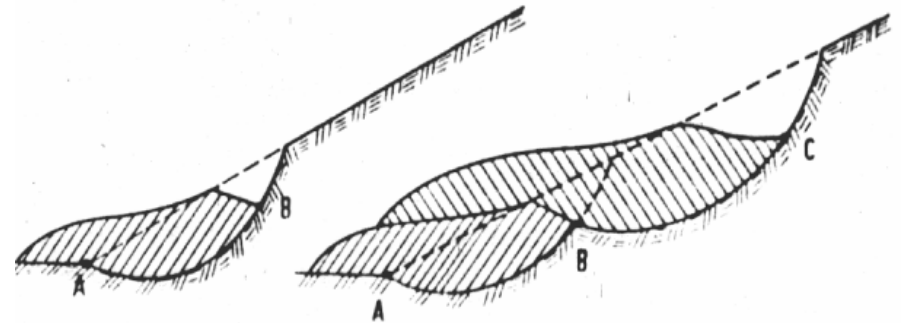
Moralité : une étude de sol est comme une prime d'assurance, elle n'est chère qu'avant l'accident.

II., Glissement dû à une fouille en pied

Il est difficile d'apprécier la stabilité d'un terrain en pente.

L'observation systématique des surfaces en rupture, qui aideraient à mieux appréhender le problème, est généralement limitée à la surface. La forme de la surface de rupture dépend de : la nature des couches rencontrées par le glissement, la largeur du décollement, le relief de la crête, les surcharges, l'humidité, ...

Parmi les différents cylindres de rupture possibles, les plus probables sont ceux qui passent non loin du pied du talus.



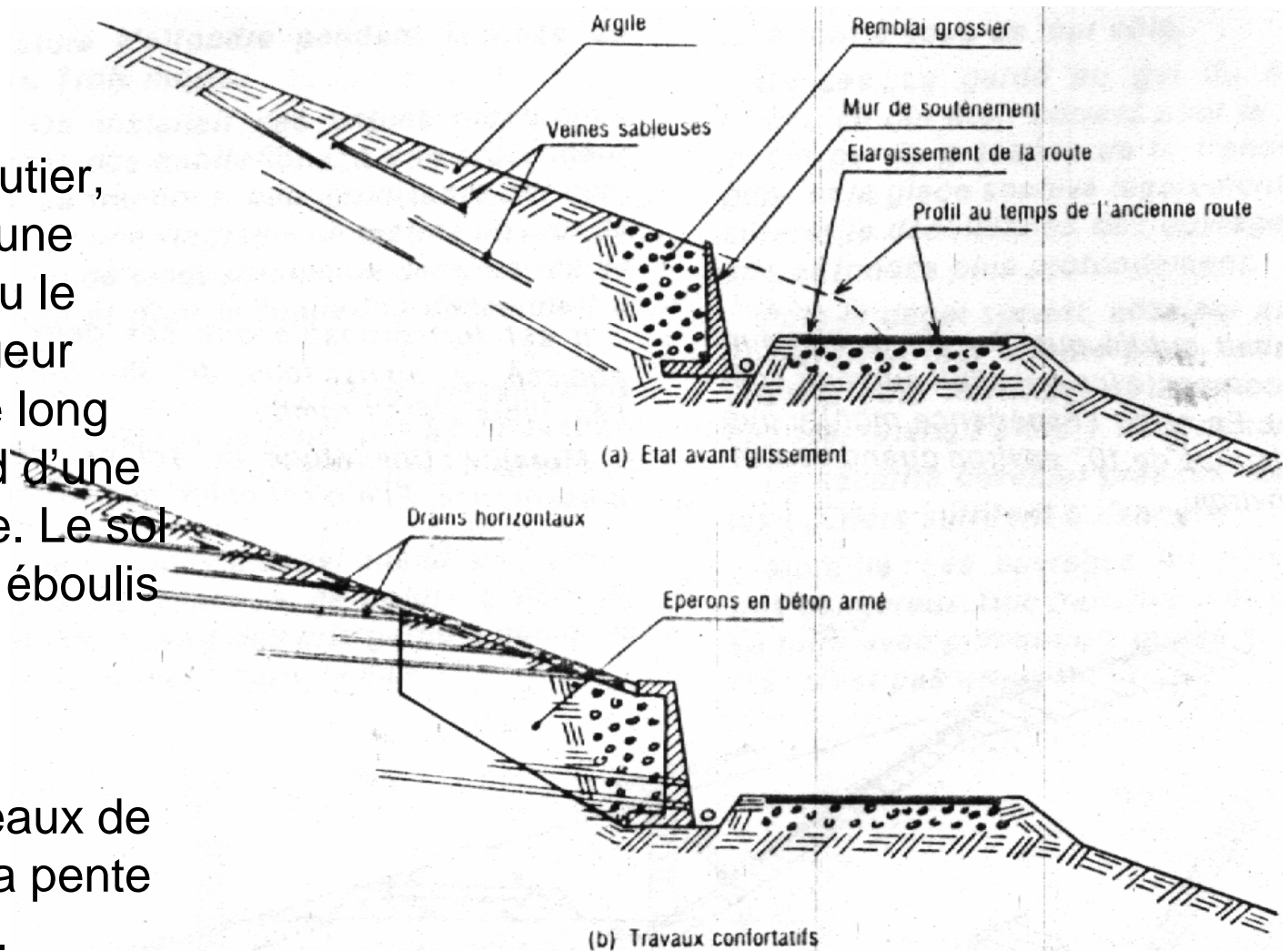
C'est également les plus dangereux, car ils décollent une très grande masse de terre, soit en plusieurs glissements successifs si le déséquilibre n'est pas corrigé à temps, soit en un grand glissement d'ensemble.

Il faut donc se garder d'affaiblir les pieds de pente ; les fouilles effectuées à cet endroit présentent un danger certain.

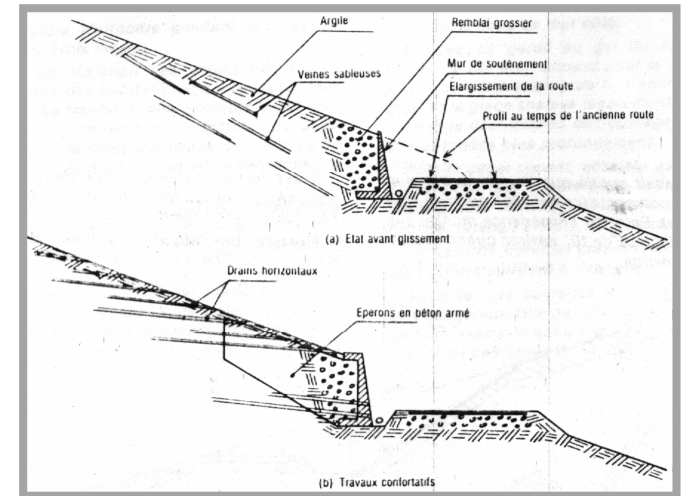
Exemple 14 :

peu après l'élargissement d'une route au pied d'une colline, un vaste glissement de terrain se produisit, entraînant et fissurant de nombreux pavillons.

Le programme de désenclavement routier, dans la banlieue d'une grande ville, a prévu le doublement de largeur d'une voie située le long d'un fleuve, au pied d'une vaste colline boisée. Le sol était constitué d'un éboulis argileux de faible compacité souvent humidifié par le ruissellement des eaux de pluie qui dévalent la pente vers le cours d'eau.



Pour élargir la route et l'assainir, le pied du talus vers la colline a été creusé et en profondeur pour réaliser une canalisation drainante. Ensuite, le fossé a été comblé et un mur de soutènement réalisé et bloqué à l'arrière par un remblai.



Quelques mois après, pendant une période particulièrement pluvieuse, la colline se mit à glisser lentement entraînant les habitations avec elle ; le mur de soutènement se renversa et la route fut partiellement recouverte d'argile boueuse.

Causes : Bien que l'on est remblayé la tranchée ouverte et monté un soutènement, le sol a été décomprimé. De plus, le remblai derrière le mur était de tout venant, trop grossier ; il fut vite contaminé par l'argile ce qui continua à le décompresser. La présence de veines de sable à peu près planes, orientés suivant la pente ont facilité le glissement qui se poursuit très haut dans la colline.

Remèdes : Ils furent longs et onéreux. Il fallut assainir la colline de manière à affaiblir les circulations souterraines dont les effets étaient graves. Des drains quazi-horizontaux ont été réalisés en enfonçant dans le terrain des longueurs différentes en tubes d'acier crépinés en amont et raccordés en aval à une canalisation d'évacuation.

Dans la partie basse, des murs éperons ont été construits suivant les lignes de pente. Enfin, le soutènement de pied a été reconstruit plus solidement et lié aux murs éperons qui jouèrent le rôle de contreforts.

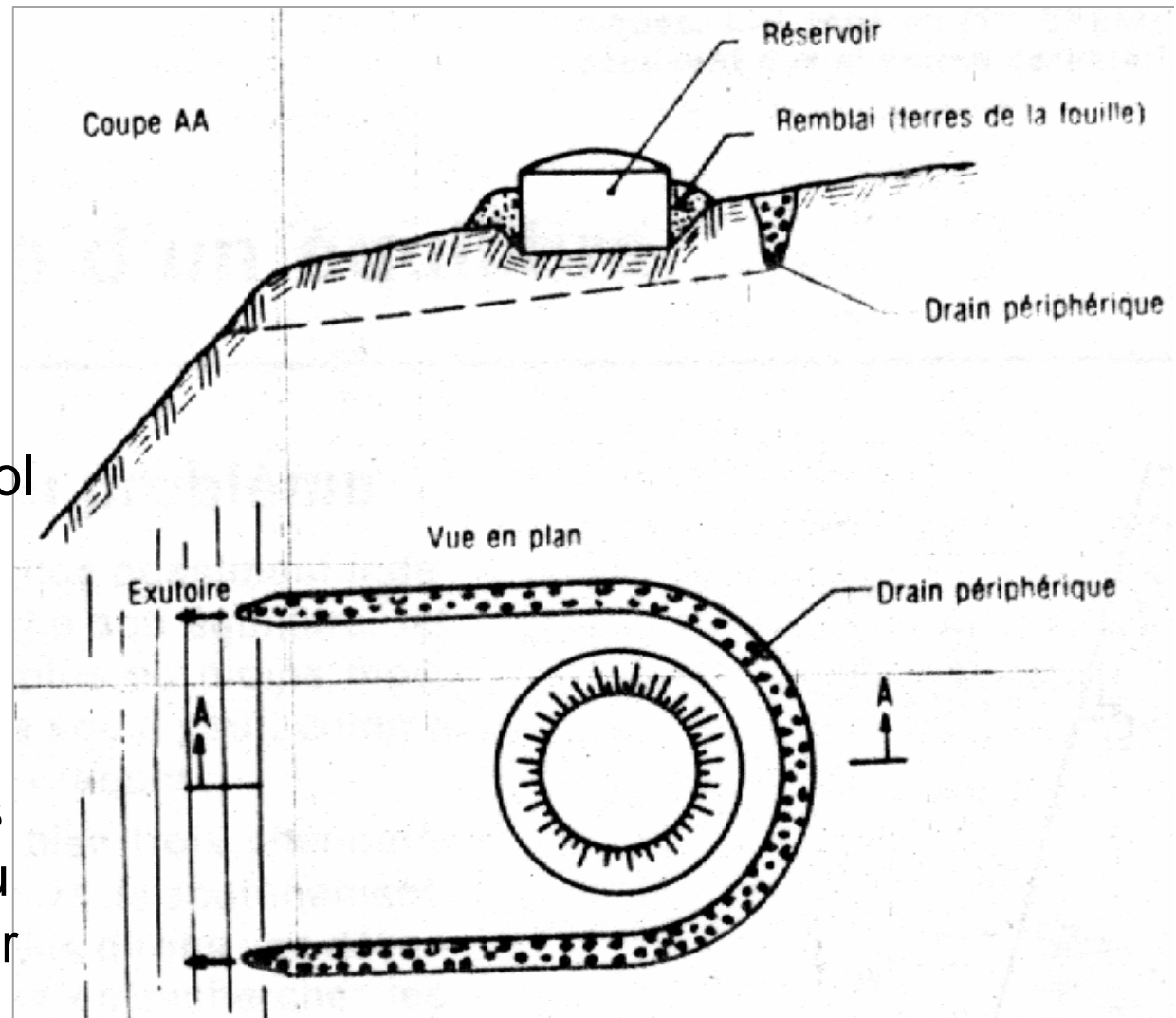
III., Glissement dû à une surcharge en tête

Dans les régions accidentées, les méplats sont recherchés pour différentes installations. Il suffit parfois qu'une surcharge soit ajoutée au terrain naturel, par une construction ou l'amoncellement de matériaux, pour qu'un éboulement se produise. La rapidité d'application de la surcharge peut aussi avoir une influence néfaste si le terrain en cause est une argile de faible activité colloïdale, gorgée d'eau, qui tend très vite vers l'état liquide quand on le comprime.

Exemple 15 :

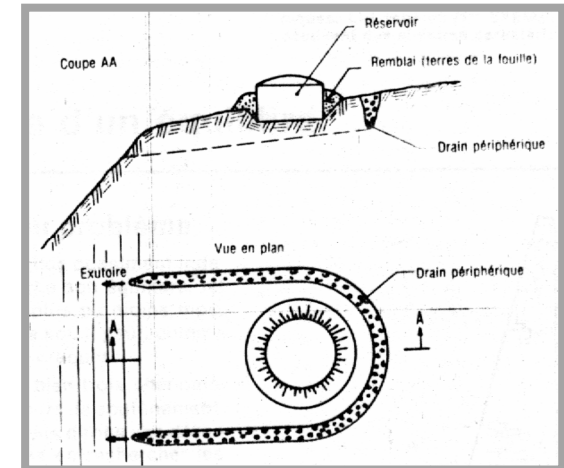
Un réservoir neuf se fissure gravement à sa mise en eau.

En vue d'améliorer l'alimentation en eau potable d'un village en montagne, on venait de construire, sur une zone plate qui surplomb le village, un réservoir circulaire au sol de 3000 m³. Quelques jours après sa mise en eau, des fuites abondantes révélèrent de graves fissures dans les parois et le radier du réservoir. Il fallut le vider d'urgence.



Causes : le réservoir subit un grave tassement qui menaçait de se transformer en vrai glissement de terrain. Le sinistre est dû à la synergie d'au moins cinq causes superposées :

1. La surcharge apportée est très supérieure relativement à ce qui était prévu,
2. Le terrain d'assise était gorgé d'eau car la fouille constituait un réceptacle d'eau pluviale sans exutoire ; on la laissa s'infiltrer dans le sol pendant tous les travaux,



3. Le sol était hétérogène, allant de l'amoncellement de plaquettes de schiste à des poches d'argile peu compacte et présentant un indice de plasticité faible ($I_p = 10$) ce qui veut dire qu'elle avait tendance à se transformer facilement en boue en s'humidifiant,
4. Le chargement des 3000 tonnes d'eau se fit en quelques heures ; c'est-à-dire dans les conditions qu'on appelle au laboratoire «non consolidé, non drainé». Ces conditions ont pour effet de réduire temporairement la cohésion et l'angle de frottement interne du matériau. En effet, l'argile comprimée cherche à expulser une partie de son eau, et les minis courants produits désorganisent la structure granulaire,

Ces quatre causes ont provoqué le tassement de l'ouvrage et sa fissuration,

5. L'orientation défectueuse des plans de schistosité menaçait de transformer le tassement local en glissement de terrain.

Remèdes :

1. On ceintura l'ouvrage sur un demi périmètre par un drain profond de 6 à 8 mètres dont les deux extrémités furent prolongées vers le versant du terrain. Là, elle trouvèrent un exutoire naturel,
2. On fit des relevés topographiques de l'ouvrage et on le vit tasser lentement, d'une dizaine de centimètres jusqu'à atteindre une stabilisation. Cela a demandé dix mois.
3. On reboucha les fissures, par injection d'un mortier sans retrait. On renforça les parois dont les armatures avaient été fortement distendues, par deux ceintures en béton précontraint et le radier par des poutres rayonnantes,
4. Les canalisations attenantes furent aussi réparées et on les disposèrent de manière à leur permettre d'absorber de nouveaux mouvements,
5. La mise en service du réservoir se fit progressivement, en limitant la montée du niveau d'eau ; cela demande encore un an durant lequel on vit l'ouvrage tasser encore de 6 cm.

Ces tassements s'accompagnèrent d'un léger déversement d'ensemble puis le réservoir se stabilisa et ne posa plus de problèmes

2.11. Conclusion .

Les terrassements, on l'a vu, posent beaucoup de problèmes, parfois difficiles à maîtriser. C'est qu'ils viennent perturber dans son équilibre un sol aux propriétés complexes, mal connues et variables dans le temps. Pour les petites fouilles, on fait face aux difficultés par l'acceptation d'un certain risque d'éboulement quand il n'y a pas danger corporel, par le blindage systématique lorsqu'il faut protéger les ouvriers.

Pour de plus grands mouvements de terre, une étude du sous-sol sérieuse est indispensable : reconnaissance du terrain par des sondages et d'éventuels essais de laboratoire et enquête sur les eaux souterraines. De plus, à côté de mesures sophistiquées réalisées par les géotechniciens, qui vaudront ce que vaut l'emplacement des sondages et le choix des échantillons, la longue expérience des habitants de l'endroit et des terrassiers de la région est sans doute une source d'informations à ne jamais négliger. 60