

Les géotextiles

Pourquoi tant de succès ? Laissons d'abord la parole aux fabricants. Ouvrons leurs brochures :

- économie de matériaux ;
- réduction du temps de travail ;
- simplification du contrôle d'exécution ;
- diminution de l'usure du matériel ;
- amélioration des performances de l'ouvrage.

Le premier point est facile à évaluer au niveau de la passation du marché. Les trois suivants montrent que les géotextiles réduisent la part d'incertitude dans les travaux. Le dernier point, enfin, est celui qui nous intéresse ici : conception et comportement des ouvrages. C'est sur ce point que se feront les réflexions, les recherches, les progrès dans les années à venir.

L'année 1977, en effet, est celle du bilan. Le congrès de Paris a permis de faire le point du développement prodigieux amorcé il y a dix ans par l'apparition, en France, du premier géotextile nontissé. Ce congrès a mis en présence fabricants et utilisateurs, chercheurs et ingénieurs.

Quelques premières impressions :

- la plupart des premières applications ont été faites dans un climat d'improvisation, avec relativement peu d'études... et généralement avec succès ; certains de ces succès opposent les utilisateurs qui emploient les géotextiles « parce que ça marche » à certains chercheurs qui ne parviennent pas à mettre en évidence au laboratoire, tel ou tel rôle des géotextiles consacré par l'expérience de chantier (une discussion au congrès de Paris sur les pistes de chantier, fut significative à cet égard) ;
- un gros effort de recherches a déjà été entrepris dans de nombreux pays avec certains résultats intéressants, mais aussi des échecs, soit parce que, certains phénomènes complexes (comme la filtration) n'étant pas toujours bien compris, des recherches sont mal conduites, soit parce que la simulation imparfaite de l'association sol-géotextile par un modèle réduit de laboratoire peut conduire à des résultats erronés ;
- la plupart des essais pour mesurer les propriétés des géotextiles proviennent de l'industrie textile traditionnelle ; ces essais obéissent à des normes respectées par tous les laboratoires, ce qui permet une comparaison objective des résultats ; mais, pour intéressant qu'il soit, cet héritage de l'industrie textile est lourd : pour de nombreux essais normalisés, le mode opératoire n'est pas adapté aux géotextiles ; il devrait donc être changé. Mais comment et par qui ?

Ces trois « premières impressions » de congrès vont nous servir de guide tout au long de cet article :

- en premier lieu, il convient de mettre un peu d'ordre dans la multitude des applications ;

Il n'est plus nécessaire aujourd'hui de commencer un article sur les géotextiles par des fastidieuses définitions (1). Dans les bureaux d'études, sur les chantiers, tout le monde sait ce qu'est un « tissé » ou un « nontissé ». La moitié de mes élèves ont entendu parler des géotextiles avant le premier cours. On ne peut plus faire de cours de géotechnique sans parler des géotextiles. On ne peut plus faire de géotechnique sans les géotextiles. Et, dans la situation économique actuelle, certaines usines ne feraient plus de textiles sans la géotechnique !

— ensuite, nous essaierons d'approfondir un peu la compréhension des phénomènes hydrauliques et mécaniques mis en jeu par les géotextiles ;

— enfin, nous évoquerons les mesures susceptibles d'être faites sur les géotextiles.

Cet article n'est donc pas un texte de vulgarisation mais plutôt une tentative de réflexion que nous souhaitons faire avec nos lecteurs.

Applications et rôles des géotextiles

A l'école, on présente d'abord les principes puis on en déduit les applications. Ici, au contraire, partons des applications pour en déduire les principes, comme cela s'est effectivement passé pour les géotextiles.

En effet, en premier lieu, des ingénieurs ont placé des textiles dans des ouvrages : pistes, remblais, drains, protections de berges... et on a constaté que ces tentatives étaient couronnées de succès. Ensuite, des chercheurs sont arrivés pour tout expliquer ! J'appartiens à cette deuxième catégorie... après avoir appartenu à la première.

Donc, passons en revue les différentes applications. Pour cela regardons les brochures des fabricants. On y voit de nombreuses photographies illustrant des applications dans divers domaines : terrassements et remblais, travaux routiers et ferroviaires, travaux hydrauliques (bassins, barrages, canaux), travaux maritimes, drainage et assainissement, filtration, agriculture, loisirs et sports... Nous avons sélectionné une quarantaine d'applications typiques en essayant de les classer dans un ordre logique et en espérant ne pas faire d'omission. Première classification : selon que les sollicitations proviennent principalement de l'eau telles que celles figurant dans la *figure 1* ou qu'elles proviennent de la phase solide du sol comme celles indiquées dans la *figure 2*.

Il est très important de faire cette distinction si l'on veut établir une classification logique. On sait, en effet, que les contraintes appliquées à un sol se partagent, schématiquement, entre l'eau et la phase solide (c'est-à-dire le squelette formé des grains ou particules).

Le géotextile subit donc, comme le sol, des contraintes provenant soit de la phase liquide (l'eau), soit de la phase solide. Par exemple :

- si de l'eau (éventuellement en entraînant des particules solides) veut traverser un géotextile, il s'agit évidemment d'une sollicitation provenant de la phase liquide (le géotextile joue alors le rôle de filtre) ;
- si des particules de sol veulent traverser un géotextile parce qu'elles sont pressées contre lui par les charges appliquées (poids des terres, circula-

tion d'engin...) il s'agit alors évidemment d'une sollicitation provenant de la phase solide (le géotextile joue alors le rôle de séparateur).

Cette distinction nous conduit au *tableau 1*. On y voit qu'en plus de son origine (solide ou liquide) la sollicitation est caractérisée par son orientation. Elle peut être :

- normale au géotextile : c'est le cas lorsque l'eau ou des particules solides essaient de traverser le géotextile (rôles d'étanchéité, clapet, filtre et conteneur) et c'est le cas également lorsque le géotextile supporte un corps en contact (rôle de support) ;
- dans la direction du géotextile : c'est le cas lorsque l'eau s'écoule longitudinalement dans un géotextile (rôle de drain) et lorsqu'un géotextile joue un rôle mécanique entre deux corps (rôle d'isolant) ou dans un matériau (rôle d'armature).

Connaissant l'origine et l'orientation des sollicitations, on peut définir huit rôles : drain, étanchéité, clapet, filtre, conteneur, support, isolant, et armature. On peut faire les remarques suivantes sur ces rôles :

1. Le rôle de clapet est intermédiaire entre celui d'étanchéité et de filtre : le géotextile ne laisse passer l'eau que lorsque sa pression est supérieure à celle de la tension capillaire entre filaments. Pour les géotextiles nontissés courants, une hauteur d'eau de quelques centimètres suffit à vaincre la tension capillaire. Un tel géotextile est donc imperméable aux eaux de ruissellement... du moins tant qu'il est sec (en effet, la saturation détruit la tension capillaire). On ne demande pratiquement jamais à un géotextile de jouer le rôle de clapet, peut-être parce qu'on n'y pense pas. On peut cependant estimer que dans certains projets il serait judicieux de tirer parti de ce rôle.

2. Dans les six rôles suivants : étanchéité, clapet, filtre, conteneur, support et isolant, le géotextile constitue un obstacle. Dans les quatre premiers de ces rôles, c'est un obstacle physique (séparateur physique) qui empêche les matériaux de se mélanger (étanchéité : le géotextile retient l'eau ; filtre : il laisse passer l'eau et retient les particules solides ; conteneur : il contient les particules solides sans s'occuper de l'eau ; clapet : rôle intermédiaire expliqué plus haut). Dans les deux derniers de ces six rôles, le géotextile est un obstacle mécanique (séparateur mécanique) qui empêche l'augmentation des contraintes (rôle de support) ou la propagation des déformations (rôle d'isolant).

3. Le rôle de drain et le rôle d'armature ont des points communs : la sollicitation se fait dans la direction du géotextile et, dans de nombreux cas, le géotextile se trouve à l'intérieur d'un massif de sol et non à la séparation de deux sols différents (*fig. 1 et 2, exemples nos 1, 40, 41, et 42*). Il n'est donc pas étonnant

(1) *Note du « Moniteur »* : le terme « géotextile », pour désigner les textiles utilisés en géotechnique, a été proposé par M. J.-P. Giroud au colloque international sur l'emploi des textiles en géotechnique à Paris en avril 1977. L'auteur de cet article enseigne la géotechnique à l'Université de Grenoble où il dirige une équipe de recherches sur les géotextiles. Il a déjà fait, sur ce sujet, des conférences dans de nombreux pays et il a réalisé en juillet 1970, au barrage de Valcros, le premier drain enveloppé de géotextile nontissé, ainsi que la première protection de berge avec géotextile nontissé.

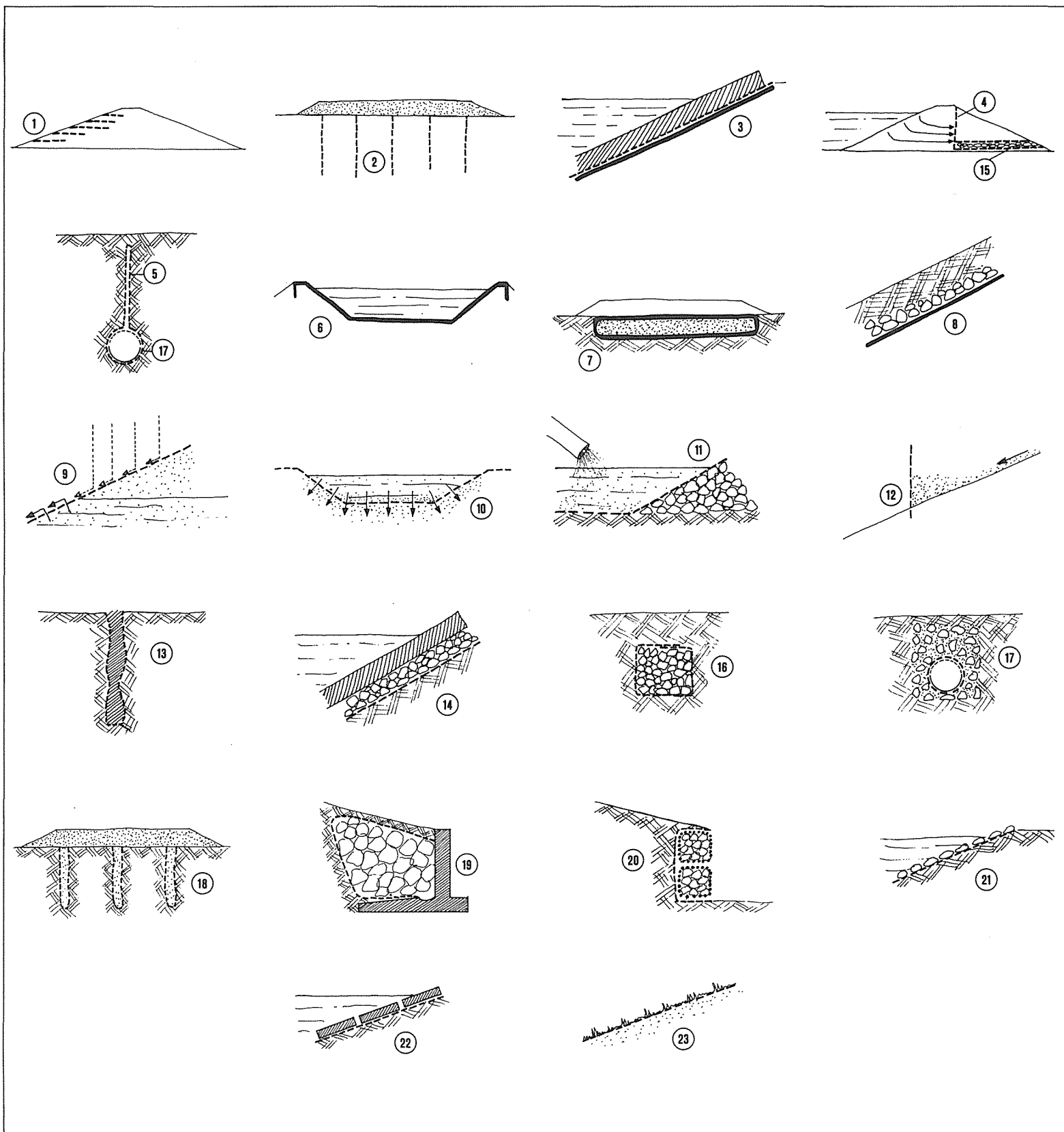


Fig. 1. — Exemples d'utilisation de géotextiles dans les cas où la sollicitation principale vient de l'eau.

a) *Rôle de drain* (le géotextile transporte l'eau dans son plan). 1 : drainage de la partie amont d'un barrage en terre pour assurer la stabilité en cas de vidange rapide ; 2 : drainage par mèches verticales pour accélérer la consolidation du sol ; 3 : tapis drainant entre géomembrane étanche et revêtement en béton pour transporter l'eau du béton lors de sa mise en place, et l'eau percolant à travers le béton ensuite ; 4 : rideau drainant collectant les eaux de fuite dans un barrage en terre ; 5 : rideau drainant transportant l'eau collectée jusqu'à un tuyau.

b) *Rôle d'étanchéité* (le géotextile associé au bitume, à la résine, à l'élastomère... constitue une géomembrane étanche qui contient l'eau). 6 : bassins, bar-

rages, canaux ; 7 : matelas étanche maintenant constante la teneur en eau, donc la résistance, d'une couche de sol compactée destinée à supporter des efforts ; 8 : étanchéité de la face inférieure d'un drain pour conduire le ruissellement.

c) *Rôle de clapet* (le géotextile est imperméable lorsqu'il n'est pas saturé et que la pression de l'eau est faible et il est perméable lorsque la pression de l'eau dépasse un certain seuil). 9 : le géotextile conduit le ruissellement (pression faible) mais il est traversé par l'eau interstitielle (pression forte).

d) *Rôle de filtre, premier cas* (le géotextile, placé en travers d'un écoulement d'eau chargée de particules solides, la laisse passer tout en arrêtant les particules solides). 10 : bassin de réalimentation de nappe phréatique ; 11 : remblaiement hydraulique ; 12 : bar-

rière d'érosion ; 13 : gaine de pieu, laissant passer l'eau mais arrêtant les particules de béton lors du coulage in situ.

e) *Rôle de filtre, deuxième cas* (le géotextile, placé à la limite d'un massif de sol où s'écoule de l'eau, la laisse passer tout en empêchant les particules solides de se déplacer). 14 : filtre entre le sol et le tapis drainant placé sous un revêtement de canal, bassin, barrage... ; 15 : filtre entourant un tapis drainant de barrage ; 16 : tranchée drainante ; 17 : filtre entourant un tuyau drainant perforé ; 18 : chaussettes entourant des drains verticaux en sable ; 19 : filtre protégeant le drain d'un mur de soutènement ; 20 : filtre entre sol et gabions ; 21 : filtre sous enrochements protégeant une berge contre batillage ou courant ; 22 : filtre sous dalles de protection ; 23 : filtre pour engazonnement.

Fig. 2. — Exemples d'utilisation de géotextiles dans les cas où la sollicitation principale vient de la phase solide du sol.

a) *Rôle de conteneur, premier cas* (le géotextile sépare le sol du milieu extérieur, autrement dit, il contient ou retient le sol). 24 : filet contre éboulements ; 25 : revêtement pour stationnement ou circulation tous terrains ; 26 : revêtement par géomembrane étanche formée de géotextile associé au bitume, à la résine, à l'élastomère... pour protéger une aire ou une pente contre la pluie ; 27 : petit soutènement par bandes de géotextiles fixées sur piquets ; 28 : sacs et boudins ; 29 : parement.

b) *Rôle de conteneur, deuxième cas* (le géotextile sépare deux matériaux qui auraient tendance à se mélanger sous l'effet des charges appliquées). 30 : piste de planches ; 31 : piste en gravier ; 32 : plage artificielle ;

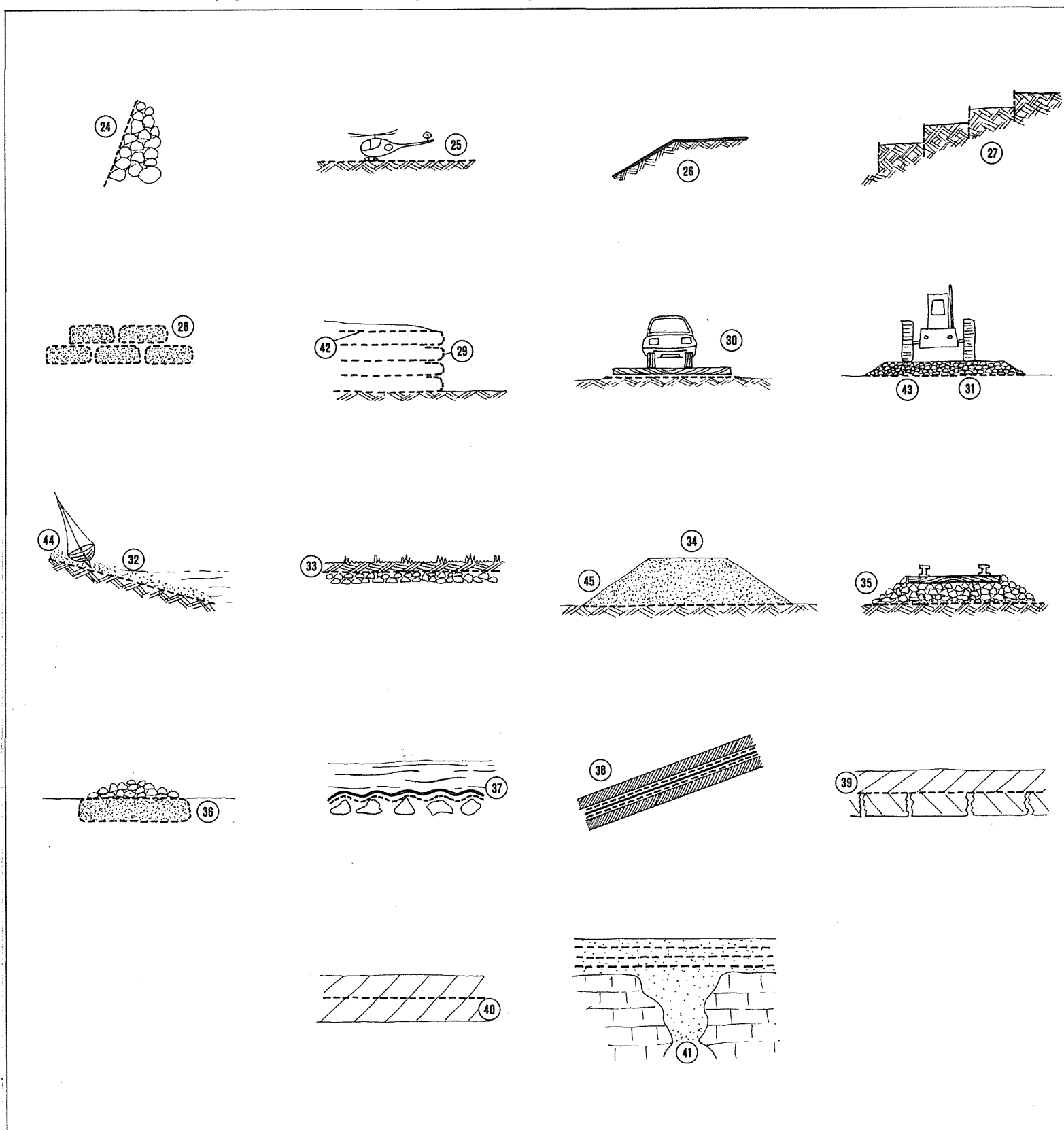
33 : sol sportif ou agricole (dans ce cas, contrairement aux deux précédents, le sol fin se trouve au-dessus, situation que l'on retrouve en partie haute de l'exemple n° 19) ; 34 : remblai ; 35 : remblai de voie ferrée ; 36 : matelas de sable enveloppé de géotextile servant de fondation en terrain très peu porteur (digue sur vase, par exemple).

c) *Rôle de support* (le géotextile supporte un matériau incapable de résister seul aux efforts qu'il subit). 37 : géotextile placé entre un lit de cailloux et une feuille étanche (plastique, élastomère) qui, seule, éclaterait sous la charge d'eau.

d) *Rôle d'isolant* (le géotextile isole deux matériaux pour éviter que les déformations de l'un entraînent celles de l'autre). 38 : revêtement multicouche pour canal (béton - géotextile - feuille étanche - géotextile - béton) pour assurer une parfaite étanchéité tout en

permettant le déplacement mutuel des différentes couches dû aux sollicitations thermiques et aux tassements différentiels ; 39 : géotextile entre deux couches de revêtement routier pour éviter la propagation de la fissuration.

e) *Rôle d'armature* (le géotextile supporte les efforts de traction auxquels le sol ne peut pas résister). 40 : armature de revêtement (routier, par exemple) ; 41 : multicouche sol-géotextile pour le franchissement d'une zone faible de sol (effondrement karstique, par exemple) ; 42 : remblai multicouche sol-géotextile (si le sol est saturé, les armatures jouent également le rôle de drains, voir exemple n° 1) ; 43 : répartition des charges dues à la circulation ou, 44, au dépôt d'objets lourds ; 45 : amélioration de la stabilité des pieds de remblais du fait de la reprise, par le géotextile, des contraintes horizontales.



SOLLICITATION		ROLE		PROPRIETES REQUISES DU GEOTEXTILE	EXEMPLES (voir fig. 1 et 2)	
Origine	Orientation	Désignation	Commentaire			
Liquide	Dans la direction du géotextile	Drain		Le géotextile conduit l'eau dans son plan	Transmittivité élevée	1 - 2 - 3 - 4 - 5
		Normale au géotextile	Séparateur physique	Etanchéité	Le géotextile, associé à un produit étanche, empêche l'eau de passer	Impédance élevée
	Clapet			Le géotextile empêche l'eau de passer sous pression faible et la laisse passer sous pression forte	Impédance élevée en dessous d'un certain seuil de pression et impédance faible en dessus. Texture serrée.	9
	Filtre			Le géotextile laisse passer l'eau et : — arrête les particules solides — empêche le mouvement des particules solides	Perméance élevée et texture serrée	10 - 11 - 12 - 13 14 - 15 - 16 - 17 - 18 19 - 20 - 21 - 22 - 23
Solide	Normale au géotextile	Séparateur physique	Conteneur	Le géotextile sépare le sol : — du vide extérieur — du matériau voisin	Texture serrée et résistance à la traction (la perméance n'est requise que si le géotextile joue en même temps le rôle de filtre)	24 - 25 - 26 - 27 28 - 29 30 - 31 - 32 - 33 34 - 35 - 36
			Séparateur mécanique	Support	Le géotextile supporte un corps solide incapable de résister seul aux efforts qu'il subit	Résistance à la traction
	Dans la direction du géotextile	Séparateur mécanique		Isolant	Le géotextile isole deux milieux ayant des déformations incompatibles	Frottement et adhérence faibles et/ou déformabilité élevée. Résistance à la traction
			Armature	Le géotextile reprend des efforts de traction auxquels le sol est incapable de résister	Résistance à la traction. Frottement et adhérence élevés.	40 - 41 - 42 - 43 44 - 45

Tableau 1. — Rôle des géotextiles. Définition de quelques termes utilisés. Sollicitation : action exercée sur le géotextile ; transmittivité : produit de la perméabilité du géotextile par son épaisseur (le débit transporté est proportionnel à la transmittivité) ; impédance : rapport épaisseur/perméabilité (plus forte est l'impédance, plus faible est le débit d'eau traversant) ; perméance : inverse de l'impédance (le débit traversant est proportionnel à la perméance) ; texture : disposition géométrique des filaments.

qu'un géotextile puisse jouer simultanément ces deux rôles. On a alors une « armature drainante » qui renforce le massif, d'une part directement et, d'autre part, en accélérant sa consolidation (notons que de multiples autres superpositions de rôles sont possibles).

Le tableau 1 met en évidence les propriétés du géotextile qui sont mises en jeu dans chaque rôle. Trois propriétés apparaissent comme essentielles : perméabilité, texture (disposition géométrique des filaments) et résistance (à la traction). Partant de ces trois propriétés fondamentales, on peut établir le tableau 2, plus schématique que le tableau 1, et qui en constitue, en quelque sorte, le résumé. Nous avons déjà en 1973 proposé la classification élémentaire « drain-filtre-écran-armature » que l'on trouve aujourd'hui dans toutes les brochures de fabricants.

Le point capital qui découle de cette classification logique est que les rôles des géotextiles peuvent se classer en deux catégories selon que la sollicitation provient de l'eau (rôles de drain, étanchéité, clapet et filtre), ou de la phase solide du sol (conteneur, support, isolant, armature). Nous allons examiner successivement ces deux types de problèmes :

- les géotextiles et l'eau ;
- l'association mécanique sol-géotextile.

Les géotextiles et l'eau

La perméabilité

Laissons de côté l'utilisation des géotextiles dans la fabrication des nappes étanches par association avec bitume, élastomères, plastomères... La principale propriété manifestée par un géotextile au contact de l'eau est sa perméabilité :

- perméabilité normale : l'eau traverse le géotextile (cette propriété existe toujours, quel que soit le géotextile) ;
- perméabilité dans le plan du géotextile : l'eau est transportée longitudinalement par le géotextile (cette propriété n'existe qu'avec certains géotextiles nontissés épais).

Comme on l'a vu dans le tableau 2, la perméabilité normale conduit au rôle de filtre et la perméabilité

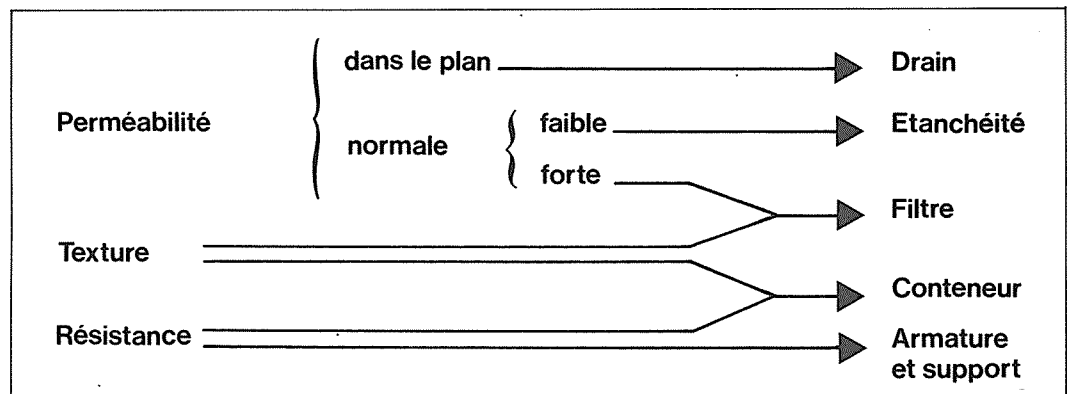


Tableau 2. — Correspondance entre les propriétés des géotextiles et leurs rôles. Les deux rôles du tableau 1 qui ne figurent pas ici sont, en fait, dérivés d'autres : le clapet est une étanchéité jusqu'à un certain seuil, l'isolant est une armature jusqu'à un certain seuil. Rappelons que le rôle d'étanchéité n'est possible que si le géotextile est associé à un produit étanche.

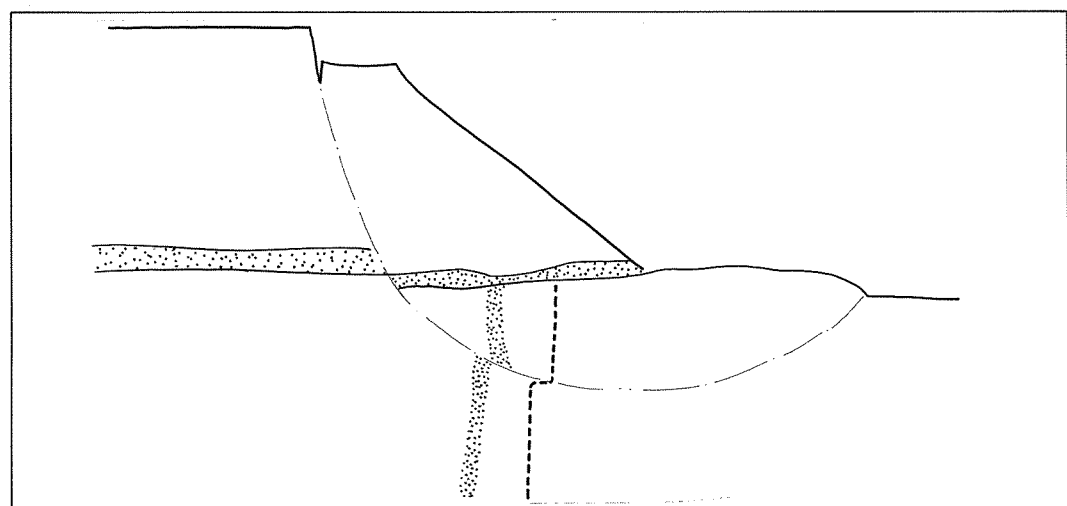


Fig. 3. — Drains verticaux pour accélérer la consolidation du sol sous un remblai. Le drain en sable est cisaillé en cas de glissement alors que la mèche géotextile continue de jouer son rôle.

longitudinale au rôle de drain. Il faut cependant noter une différence fondamentale entre ces deux cas, en ce qui concerne le rôle de l'épaisseur du géotextile : la quantité d'eau transportée par le drain est proportionnelle à son épaisseur alors que celle qui traverse le filtre est inversement proportionnelle à cette même épaisseur (celà d'après la formule de Darcy).

Il faut également remarquer que, dans le rôle de filtre aussi bien que dans le rôle de drain, la résistance à la traction du géotextile, qui maintient sa continuité, joue un rôle essentiel :

— elle permet au drain en géotextile de continuer à fonctionner là où un drain en sable serait cisailé (fig. 3)

— elle empêche le filtre en géotextile d'être entraîné, par un courant d'eau, à travers les cailloux du drain.

Enfin, il faut s'assurer que le fonctionnement du géotextile comme drain ou filtre n'est pas perturbé par le phénomène de colmatage. Examinons d'abord le cas de la filtration.

Les deux types de filtration

Le premier type est celui de la filtration d'un liquide chargé de particules en suspension. Si le filtre est suffisamment fin pour arrêter ces particules, elles s'accumulent à sa surface ou en son sein et, inévitablement, le débit diminue (fig. 1, exemples nos 11, 12, et 13). Et, si l'on veut réaliser une filtration permanente, il faut, périodiquement, changer le filtre ou le nettoyer.

Le second type de filtration est celui d'un sol dans lequel coule de l'eau. Si le sol est normalement compact, l'eau y coule claire, du moins tant qu'on n'y place pas un drain qui vient perturber cet équilibre hydraulique. Le rôle du filtre (géotextile, par exemple) entre sol et drain (graviers, par exemple) n'est pas alors d'arrêter les particules du sol mais, plutôt, de les empêcher d'être entraînées par l'eau. Ce second type de filtration est beaucoup plus fréquent que le premier en géotechnique (fig. 1, exemples nos 14 à 23), et la question du colmatage y est moins simple comme nous allons le voir.

Fonctionnement d'un filtre autour d'un drain

Examinons le système sol-filtre-drain (le drain étant en graviers et le filtre en sable ou en géotextile). Ses caractéristiques hydrauliques sont :

- sol : perméabilité faible, gradient élevé ;
- filtre : perméabilité forte, gradient faible ;
- drain : perméabilité infinie, gradient nul.

La nature n'aime pas les discontinuités. Un phénomène naturel va apparaître pour réduire les discontinuités de caractéristiques hydrauliques aux deux interfaces de ce système. C'est le phénomène du colmatage : les particules de sol se déplacent, entraînées par l'eau, des zones à perméabilité faible vers les zones à perméabilité forte. Le drain a donc tendance à se colmater et le sol à se lessiver. Le rôle du filtre est de limiter ce phénomène. Tout dépend donc de l'« ouverture » du filtre, c'est à dire de la dimension des plus grandes particules susceptibles de le traverser. Pour les géotextiles nontissés courants, l'ordre de grandeur de l'ouverture est d'une centaine de microns.

Si toutes les particules de sol ont une dimension supérieure à l'ouverture il n'y a évidemment pas de risque de colmatage... mais ce cas ne se produit pratiquement pas car de tels sols sont perméables et n'ont pas besoin d'être drainés.

Si le sol a une granulométrie continue avec des particules supérieures à l'ouverture et d'autres inférieures, ces dernières, lorsqu'elles se trouvent près du filtre sont entraînées par l'eau. Mais ce phénomène est limité car les particules fines situées plus loin du filtre sont emprisonnées entre des particules plus grosses. Cette création d'un « autofiltre » dans le sol, en amont du filtre, que nous venons de présenter schématiquement, a été observée au microscope. On voit donc que le nombre de particules fines lessivées du sol est limité. Mais, où vont-elles ? S'arrêtent-elles dans le textile ou vont-elles dans le drain ? Nous examinerons cela plus loin, mais, auparavant, il faut parler d'un troisième type de sol.

Si toutes les particules de sol ont une dimension inférieure à l'ouverture du filtre, on peut craindre

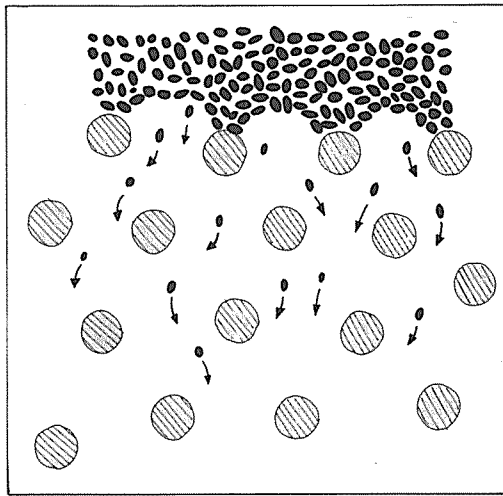


Fig. 4. — Coupe schématique représentant un sol composé uniquement de particules très petites au contact d'un géotextile (dont la section des filaments est représentée par des ronds hachurés) : apparition de voûtes stables après le départ de quelques particules entraînées par l'eau.

qu'elles passent toutes à travers. C'est ce qu'elles feraient, en effet, si elles étaient en suspension dans l'eau. Mais, lorsque ces mêmes particules, inférieures à une centaine de microns, constituent un sol normalement compact, elles sont liées entre elles par une cohésion qui est généralement d'autant plus forte que la dimension de ces particules est plus faible. Il y a alors, au droit des ouvertures du filtre, constitution de petites voûtes stables et, là encore, la quantité de particules lessivées est limitée (fig. 4).

On voit donc que les risques de migration importante de particules viennent de deux types de sol :

- les sols peu compacts ou les sols à granulométrie discontinue dans lesquels les particules fines ne sont pas bloquées : dans de tels sols, l'eau ne coule pas claire et l'on est ramené au cas de la filtration d'un liquide chargé de particules en suspension ; on sait que, dans ce cas, un colmatage important est inévitable ;

- les sols dont toutes les particules sont très fines et qui n'auraient pas de cohésion : ce cas est assez rare (cendres, poussières) et il faudrait alors utiliser des filtres géotextiles plus fins que ceux habituellement disponibles.

La migration des particules fines, limitée dans les cas courants mais importante dans les deux cas ci-dessus, conduit au risque de colmatage.

Le colmatage

Il faut tout d'abord savoir que le colmatage est une diminution de la perméabilité due à l'augmentation du nombre de particules dans un volume donné. Dans le cas du système sol - filtre - drain, chacun des trois éléments peut se colmater.

Concernant le sol, nous avons vu plus haut que deux phénomènes différents peuvent se produire.

- en général, le sol situé au voisinage du filtre perd une petite quantité de particules : il n'y a donc pas colmatage du sol, au contraire ;
- dans les cas (assez rares) apparentés à la filtration des liquides, il y a accumulation de particules fines sur le filtre : il y a donc colmatage du sol en amont du filtre.

La distinction qui précède, entre les deux modes de lessivage du sol, ne dépend pas du filtre. Elle dépend uniquement du sol et de l'écoulement. Mais la quantité de particules fines qui quitte le sol dépend du filtre et conditionne le risque de colmatage du filtre et du drain.

Il serait absurde de vouloir choisir à tout prix un filtre qui ne risque pas de se colmater. Cela conduirait, en effet, à choisir :

- soit une membrane étanche qui arrête tout, même l'eau ;
- soit un textile très ouvert qui laisse généreusement passer toutes les particules de sol, provoquant ainsi le colmatage du drain (et, bien entendu, le lessivage du sol situé en amont).

Le filtre doit donc réaliser un compromis : laisser passer l'eau tout en limitant la migration (inévitabilement) des particules. Certaines de ces particules restent dans le filtre, les autres le traversent et vont dans le drain.

Quelle est la proportion des particules qui traversent et de celles qui restent dans le filtre ?

On peut penser que l'épaisseur du filtre joue un rôle. Il est évident que plus un filtre est épais, plus il y a des chances pour que des particules s'y arrêtent. Mais il y a aussi plus de place pour loger ces particules arrêtées. On ne peut donc pas en conclure, comme l'ont fait certains, que, plus un filtre géotextile est épais, plus il a de chances de se colmater. Et il est évident, par ailleurs, que l'épaisseur joue un rôle très favorable dans le fonctionnement d'un filtre, notamment géotextile, car elle diminue le risque d'avoir localement des ouvertures anormalement grandes par où passeraient des particules assez grosses.

On voit donc que l'épaisseur est un facteur intéressant qui avantage certains géotextiles nontissés par rapport aux géotextiles tissés.

Enfin, il faut bien comprendre que, même avec un certain nombre de particules emprisonnées entre ses filaments, la perméabilité d'un géotextile est encore grande. Même si ce colmatage partiel divise la perméabilité par dix, elle reste encore largement supérieure à celle du sol environnant. Et, par conséquent, le filtre continue de fonctionner parfaitement.

Le problème serait tout à fait différent si le géotextile jouait le rôle de drain. En effet, diviser par dix la perméabilité d'un drain, c'est diviser par dix le débit qu'il peut transporter.

En résumé, on peut dire schématiquement que :

- le risque de colmatage du sol en amont du filtre n'est important que dans certains cas spéciaux ;
- le colmatage d'un géotextile utilisé comme filtre est très limité et n'affecte pratiquement pas son fonctionnement ;
- le colmatage d'un géotextile utilisé comme drain, quoique limité, peut ne pas être négligeable et il faut en tenir compte dans les calculs de débit.

Donc, le seul problème est d'éviter le colmatage du drain et de limiter le lessivage du sol. Ces deux exigences vont de pair et sont satisfaites par le bon dimensionnement du filtre.

Dimensionnement du filtre

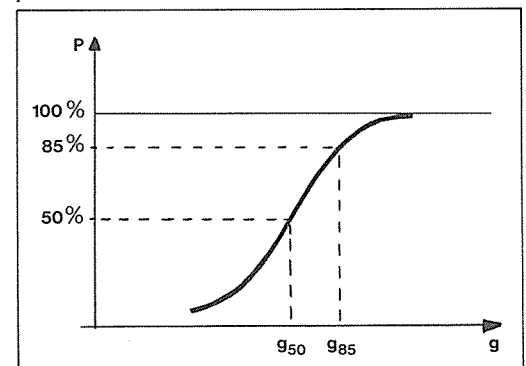
D'après ce qui précède, le choix de l'ouverture du filtre dépend de son épaisseur, de la granulométrie du sol et de sa cohésion. Reste à indiquer comment mesurer l'ouverture du filtre. S'il s'agit d'un géotextile tissé, il suffit de mesurer l'ouverture des mailles. S'il s'agit d'un géotextile nontissé, il faut donner la courbe porométrique (fig. 5), qui représente la distribution des espaces entre filaments. L'obtention de cette courbe, très délicate, se fait :

- soit par mesure directe et classement statistique d'une multitude d'espacements entre filaments ;
- soit par une mesure indirecte en faisant passer des billes de verre de très petit diamètre à travers le géotextile.

La mesure directe ne se fait actuellement qu'à titre de recherche alors que la mesure indirecte peut se

Remplacer "sol" par "geotextile"

Fig. 5. — Courbe porométrique d'un sol donnant la distribution p (%) des espacements g entre filaments (g_{50} et g_{85} : espacements correspondant respectivement à 50 et 85 p. 100).



pratiquer dans tous les laboratoires. D'après quelques comparaisons, ces deux méthodes semblent conduire à des résultats à peu près concordants.

Un certain nombre de raisonnements et de comparaisons de recherches expérimentales, que nous ne pouvons détailler ici, conduisent aux règles approximatives suivantes :

Sol pulvérulent

- géotextile tissé : $g \leq d85$
- (avec g : ouverture du textile ; $d85$: dimension correspondant à 85 p. 100 de la courbe granulométrique du sol) ;
- géotextile nontissé mince : $g85 \leq d85$
- géotextile nontissé épais : $g50 \leq d85$
- (pour $g50$ et $g85$ voir fig. 5)

Sol cohérent

- géotextile tissé : $g < 50$ microns
- géotextile non tissé mince : $g85 < 50$ microns
- géotextile nontissé épais : $g85 \leq 100$ microns

Ces conditions ne sont qu'approximatives : elles dépendent de la méthode de mesure de l'ouverture g . De plus, elles doivent encore être vérifiées par d'autres essais. Pratiquement elles ne doivent être utilisées (et encore avec prudence) que pour un sol compact et un courant d'eau lent (à l'exclusion notamment des courants alternés dus aux vagues).

Ce résumé de quelques idées actuelles sur le colmatage illustre l'extrême difficulté du problème. Et encore n'avons-nous pas parlé de certains aspects chimiques et électriques... ni du risque de colmatage par compactage d'un sol très humide sur un géotextile.

L'association mécanique sol-géotextile

Les sollicitations mécaniques

Les différentes sollicitations mécaniques que peut subir un géotextile sont représentées sur la figure 6. Plusieurs classifications sont possibles :

- selon la répartition, on peut définir les couples (« répartie - concentrée ») suivants : « compression - poinçonnement », « traction - déchirure », « flexion - pli » et « frottement - accroc » ;
- selon l'orientation : normales (compression - poinçonnement et flexion - pli) et dans la direction du géotextile (traction - déchirure et frottement - accroc).

Fig. 6. — Classification des sollicitations.

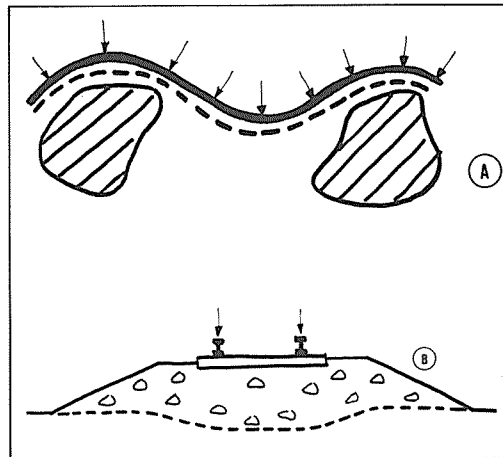
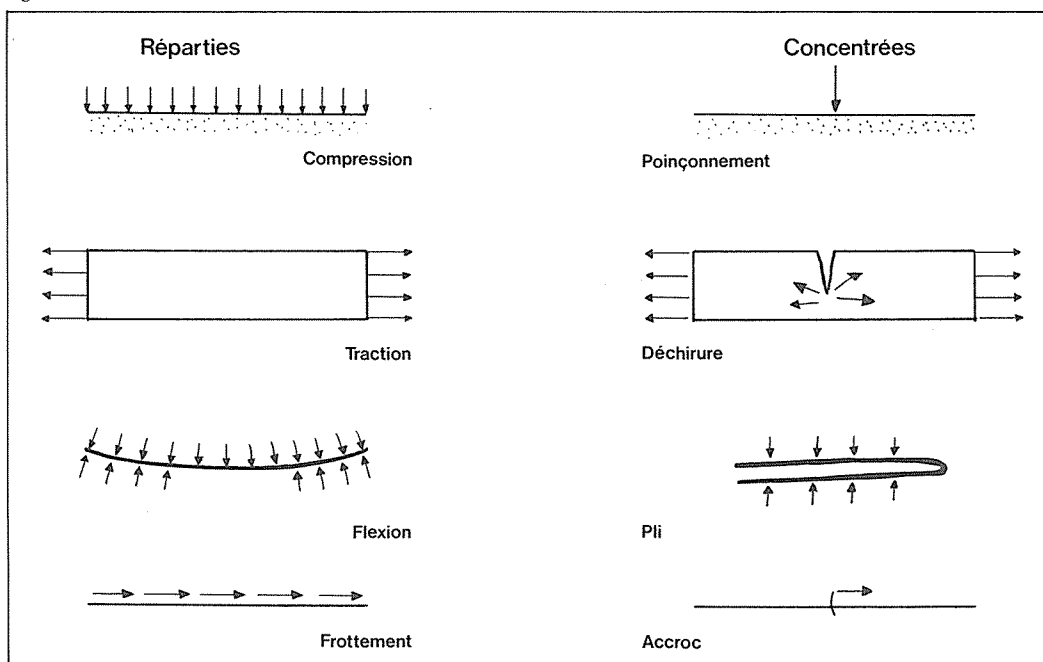


Fig. 7. — Sollicitations du type flexion : à petite échelle lorsque le géotextile joue le rôle de support d'une feuille étanche soumise à la pression de l'eau (la distance entre cailloux est de l'ordre du centimètre) ; b) à grande échelle sous le ballast d'une voie ferrée.

On peut également remarquer que les sollicitations du type flexion et frottement se traduisent généralement, dans le géotextile, par une traction. Finalement, il n'y a que deux types de sollicitations fondamentales : la compression et la traction. Mais on peut alors remarquer que la réponse du géotextile à ces deux sollicitations est tout à fait différente :

- réponse passive à la compression : l'épaisseur du géotextile diminue, sans action bénéfique pour l'ouvrage, au contraire ;
- réponse active à la traction : le géotextile supporte des contraintes intolérables par le matériau environnant (le sol en général, le béton quelquefois, une feuille plastique assez souvent...)

En conclusion, c'est donc la traction qui nous intéresse surtout. Mais il est très rare qu'une traction soit directement exercée sur le géotextile dans un ouvrage en terre. En général, les tractions proviennent, soit des sollicitations du type flexion, soit des sollicitations du type frottement.

Sollicitation par flexion

Si l'on exerce, sur l'une de ses deux faces, une pression plus élevée que sur l'autre, le géotextile prend une forme courbe jusqu'à ce que sa tension équilibre la pression appliquée. Si l'équilibre ne se fait pas, il y a éclatement du géotextile.

L'étendue de la forme courbe prise par le géotextile peut varier beaucoup d'un problème à un autre : de

quelques centimètres (fig. 7 a) à quelques mètres (fig. 7 b). La déformabilité des géotextiles, en particulier des nontissés, est grande.

Dans le cas où la forme courbe est de petite étendue (fig. 7 a), le géotextile peut facilement avoir un grand allongement, donc une grande tension, et, par conséquent, il peut jouer un rôle mécanique important. En revanche, lorsque la forme courbe est très étendue et que le tassement est peu important (fig. 7 b) l'allongement du géotextile est faible et on peut se demander si son action mécanique est efficace.

Cependant au moment de sa mise en place, on peut exercer une pré-tension sur le géotextile. Et si, par un moyen quelconque, on fait en sorte que cette pré-tension se maintienne, il est évident que la pression que le géotextile peut supporter va augmenter. Les calculs qui ont pu être faits montrent que :

- pour un ouvrage peu déformable, comme une voie de chemin de fer, le géotextile nontissé, même soumis à une forte pré-tension, ne supporte qu'une partie négligeable des charges appliquées ;
- pour un ouvrage très déformable, en revanche, comme une piste de chantier (fig. 2, exemple n° 43), le géotextile nontissé peut supporter une part importante de la charge.

Des calculs analogues montrent, bien entendu, que dans le cas d'une forme courbe peu étendue (fig. 7 a), l'action du géotextile est très importante. Il n'est pas rare, par exemple, grâce au support fourni par un géotextile, de multiplier par dix la pression à laquelle résiste une feuille étanche en plastique.

Enfin, on peut penser que plus le sol est hétérogène, plus il y a de chances d'avoir de grandes déformations locales. Donc, plus il y a de chances de voir le géotextile jouer un rôle mécanique important.

Il y a peut-être là une des raisons qui font que dans les essais sur modèle réduit au laboratoire, où tout est trop parfait, trop homogène, les géotextiles aient une action souvent moins positive que dans la nature. Nous avons cité, au début de cet article, un désaccord entre chercheurs et praticiens, qui pourrait trouver là son origine.

Sollicitation par frottement

Examinons à nouveau le tableau 1. Les rôles d'isolant et d'armature sont radicalement différents. Et pourtant, certains géotextiles jouent tantôt l'un de ces rôles, tantôt l'autre. Y a-t-il là un paradoxe ?

En fait, il est bien évident que le coefficient de frottement sol-géotextile est au plus égal (et, en général, légèrement inférieur) au frottement interne du sol. Cela a été confirmé par de nombreuses expériences. Par conséquent, un géotextile constitue toujours un plan de glissement préférentiel dans le sol.

Si la constitution de l'ouvrage et les efforts appliqués sont tels que le plan de rupture se trouve précisément dans le plan du géotextile, ce dernier à un rôle mécanique négatif : il affaiblit l'ouvrage. Ainsi, il serait absurde, dans un remblai armé par un géotextile (fig. 2, exemple n° 42) de placer les armatures inclinées de $45^\circ + \varphi/2$ sur l'horizontale (φ étant l'angle de frottement du sol) car cette orientation est précisément celle du plan de rupture. Mais, si l'on veut que le géotextile joue le rôle d'isolant, il faut précisément le placer dans le plan de rupture ou plan de glissement.

En effet, le géotextile joue le rôle d'isolant lorsqu'il rend mécaniquement indépendants les deux corps qu'il sépare, par exemple en leur permettant de glisser librement l'un par rapport à l'autre. (C'est évidemment le cas représenté par l'exemple n° 38, de la figure 2)

Le cas représenté par l'exemple n° 39 de la figure 2 est, quant à lui, un peu différent : c'est la protection d'un revêtement neuf contre la propagation de fissures existant dans le revêtement inférieur. Dans ce cas, il faut éviter tout glissement du géotextile qui provoquerait une instabilité de la chaussée. Le géotextile doit donc parfaitement adhérer aux deux couches de revêtement et, par conséquent, lorsque les fissures s'écartent, il se distord dans son épaisseur. Il faut donc, dans cette application, avoir un géotextile assez épais, quoique, s'il l'était trop, sa compressibilité nuirait au bon comportement de la couche supérieure du revêtement lors du passage des véhicules.

Revenons au rôle d'armature. La question essentielle est de savoir comment se fait la transmission des efforts tangentiels entre le sol et le géotextile. Il

est clair que la rugosité d'un géotextile dépend de l'échelle à laquelle on se place. A l'échelle des filaments, la surface d'un géotextile, particulièrement nontissé, est très rugueuse. Au contraire, dans son ensemble, un géotextile constitue une surface assez régulière, donc assez lisse.

Il semble nécessaire, pour une bonne transmission des efforts, que la dimension des grains de sol, immédiatement en contact avec un géotextile, soit de l'ordre de grandeur des espaces entre filaments. Ce qui importe, ce n'est pas de mettre en contact avec le géotextile le sol qui a le plus fort coefficient de frottement, mais plutôt le sol qui, par sa granulométrie, « accroche » le plus le géotextile.

Cette notion de continuité granulométrique entre sol et géotextiles est à rapprocher des conditions de fonctionnement des filtres : cela montre que les problèmes posés par les géotextiles relèvent non seulement de la mécanique des milieux continus, mais aussi de la mécanique des milieux granulaires.

On notera enfin qu'une éventuelle anisotropie mécanique du géotextile peut être très utile dans le cas d'une sollicitation exercée par frottement alors qu'elle serait plutôt nuisible dans le cas d'une sollicitation par flexion. On aurait pu, de même, souligner l'intérêt d'une anisotropie hydraulique lorsque le géotextile joue le rôle de drain.

Evolution dans le temps

Il faut, enfin, se préoccuper de l'évolution, dans le temps, des propriétés des deux membres de l'association mécanique : le sol et le géotextile.

Très schématiquement, on peut dire que les propriétés du sol (au contact du géotextile) ont plutôt tendance à s'améliorer dans le temps et que les propriétés du géotextile (au contact du sol) ont plutôt tendance à se détériorer.

En ce qui concerne le sol, citons au moins deux actions positives du géotextile :

— le géotextile protège le sol du remaniement lors de la construction de l'ouvrage en répartissant les charges exercées par les engins ;

— certains géotextiles nontissés, jouant le rôle de drain, accélèrent la consolidation du sol, et, par conséquent, contribuent à l'amélioration de ses propriétés mécaniques.

En ce qui concerne le géotextile, citons deux causes de variation dans le temps des propriétés mécaniques :

— vieillissement chimique : aucun géotextile actuel ne résiste de façon satisfaisante à une exposition prolongée à la lumière ; en revanche, tous les bons

géotextiles ont une résistance à l'enfouissement dans le sol qui permet de les utiliser dans des ouvrages construits pour très longtemps, comme les barrages en terre ;

— certains géotextiles s'allongent en fonction du temps lorsqu'ils sont soumis à une charge constante : c'est le phénomène de fluage, influencé par la température ; il en résulte que le rôle mécanique de l'armature diminue avec le temps ; il faut donc éviter l'emploi de tels géotextiles comme armature.

Pour conclure cette rapide étude de l'association sol-géotextile, on peut rappeler les points suivants : — dans les cas où la sollicitation est du type « flexion », les multiples hétérogénéités locales du sol peuvent jouer un rôle important (alors que, dans les calculs classiques de géotechnique, on néglige ces hétérogénéités locales en les fondant dans une homogénéité d'ensemble) ;

— dans les cas où la sollicitation est du type « frottement », c'est l'anisotropie du textile qui peut jouer un rôle important ;

— dans tous les cas, les propriétés des géotextiles peuvent évoluer dans le temps et il ne faut pas oublier ce point dans les calculs de prévision.

Bilan et prospective

Une autre raison de succès

Pourquoi un tel succès des géotextiles ? Dans l'introduction nous avons donné la réponse du fabricant. Essayons de répondre ici sur le plan théorique.

On peut schématiquement dire que les géotextiles ont eu du succès parce qu'ils ont apporté au sol une hétérogénéité voulue, aussi bien dans les problèmes de l'eau que dans l'association mécanique sol-géotextile. On retrouve la même idée dans d'autres problèmes de géotechnique : par exemple, on a fait des progrès dans les barrages en terre quand on est passé des barrages en terre homogène aux barrages hétérogènes. Le bénéfice de l'hétérogénéité vient de la séparation des fonctions qu'elle implique : le sol joue son rôle et le géotextile le sien (voir *tableau 1*).

Avec les géotextiles, l'hétérogénéité est très marquée : inclusion d'un milieu bi-dimensionnel dans un massif tri-dimensionnel. La mécanique des milieux continus permet de traiter les problèmes qui en découlent. Mais, le massif tri-dimensionnel étant formé de grains et le milieu bi-dimensionnel de filaments, il faut faire intervenir la mécanique des milieux discrets (particules et fils) pour traiter certains problèmes comme la filtration ou le frottement.

Etude de l'hétérogénéité apportée par un géotextile dans un sol et mécanique des milieux discrets, voici deux voies de recherches qui devraient porter leurs fruits dans les années à venir.

Rançon du succès

Aujourd'hui plus personne ne veut avoir l'air d'ignorer les géotextiles. Alors on les utilise abondamment, sans toujours savoir pourquoi.

Une fois de plus, la mode s'est emparée des textiles !

Mais cet engouement, même s'il fait vendre des géotextiles, porte en lui le germe des contre-performances. De plus, les utilisateurs sont déroutés par le nombre et la complexité des essais. Certains utilisateurs sont tentés de ne pas faire du tout d'essais en se disant qu'après tout, pour les premières applications, réalisées avec succès, on ne s'est pas posé tant de problèmes. Ce à quoi on peut répondre deux choses : — on ne connaît que les succès des premières applications, non les échecs ;

— on ne choisit pas un million de mètres carrés de géotextile pour un grand projet comme on choisit un « géotextile de dépannage » pour piste de chantier.

Il est donc nécessaire de choisir judicieusement les mesures à faire, de définir leur mode opératoire et de spécifier les résultats requis. Il serait trop long de traiter cette question ici et nous renvoyons le lecteur à l'étude que nous avons déjà publiée sur ce sujet (2).

Dans le sens du progrès

Le brassage de disciplines, provoqué par les recherches sur les géotextiles, a des retombées positives, notamment sur la géotechnique traditionnelle : ainsi on n'a jamais autant étudié le colmatage des sables que depuis que l'on étudie le colmatage des textiles !

L'hétérogénéité et la continuité bi-dimensionnelle, apportées par le géotextile dans le massif de sol permettent de modifier la conception habituelle des ouvrages. On peut même aller jusqu'à modifier la notion habituelle de sécurité des ouvrages, imaginant des dispositifs, tirant parti de certaines propriétés des géotextiles, et fonctionnant automatiquement selon certains scénarios de catastrophe prévus à l'avance : le géotextile est un matériau essentiel pour une géotechnique en évolution.

Enfin il est clair que bien des progrès, notamment ceux concernant les méthodes d'essais, ne pourront être accomplis que dans la mesure où il y aura une étroite collaboration entre fabricants et instituts de recherche. Et cela, quelle que soit leur nationalité. Le chercheur géotechnicien, qui jusqu'à présent ne parlait qu'au créateur de la terre, doit désormais également parler aux fabricants de géotextiles.

On peut donc en conclure que l'intrusion des textiles dans le champ de la géotechnique se traduit par un style nouveau, générateur de progrès.

Jean-Pierre GIROUD (*)

(*) Nous tenons à remercier Monique Monnet et Sophie Geray pour leur collaboration.

(2) J.-P. Giroud et J. Perfetti : « Classification des textiles et mesure de leurs propriétés en vue de leur utilisation en géotechnique », comptes-rendus du colloque international sur l'« Emploi des textiles en géotechnique » (Paris, 1977), 345-352.