

construction sur zones de décharge

Rapport général de

G. Cartier

L. C. P. C., Paris

Introduction

Une des activités importantes de l'homme depuis qu'il vit en sociétés organisées consiste à stocker ou détruire les déchets produits par son activité. C'est, bien entendu, avec la croissance industrielle et la poussée démographique de ces dernières décennies que cette situation est devenue cruciale au point que les problèmes techniques posés nécessitent d'avoir recours à diverses spécialités allant du génie sanitaire à la géotechnique. Ceci n'est pas étonnant si l'on songe que le stockage des différents résidus modernes, dont la production croît plus ou moins exponentiellement avec le temps, est devenu un problème économique majeur pour tous les pays industrialisés et que les solutions pour leur traitement ou leur réemploi ne sont ni simples, ni bien connues. D'après Sowers (1976), la production de déchets aux États-Unis s'élevait en 1976 à 10^9 à 3×10^9 tonnes par an, soit une moyenne de 10 à 30 kg par personne et par jour. Parmi cette quantité, 1 à 2 kg sont imputables à la consommation individuelle journalière. Ceci est à comparer aux chiffres fournis en 1979 dans les cahiers techniques de la Direction de la Prévention des Pollutions, soit 0,6 à 1 kg par habitant et par jour.

De nombreux projets et quelques réalisations existent pour traiter, dès leur production, les résidus ménagers et industriels (Maes, 1980) :

— *le recyclage* : il permet de réduire la taille des installations de traitements ultérieurs, d'économiser les matières premières et l'énergie. Toutefois, l'insertion des matériaux récupérés dans les circuits commerciaux et industriels pose un problème déterminant.

— *l'incinération* : elle permet la récupération de l'énergie interne des résidus combustibles. Actuellement, 20 p. 100 du tonnage d'ordures ménagères collectées en France (15 millions de tonnes en 1980) est incinéré; si cette proportion passait à 50 p. 100 une économie d'énergie primaire supérieure à 700 000 t

d'équivalent-pétrole pourrait être réalisée chaque année. Toutefois, aussi parfaits que soient les procédés d'incinération ils nécessiteront toujours l'élimination, et donc le stockage, de résidus solides (mâchefer notamment) qui peuvent difficilement être récupérés par ailleurs, compte tenu de l'irrégularité du marché. De plus, le coût de ces installations pourrait les limiter aux grosses agglomérations.

— *la pyrolyse* : la fermentation méthanique et le compactage sont d'autres exemples de traitements des résidus qui utilisent leurs pouvoirs énergétiques ou fertilisants.

Tous ces procédés, bien qu'extrêmement prometteurs, nécessitent encore de gros efforts de recherches et ne permettront pas, de toute façon, de traiter l'ensemble des résidus (notamment industriels). On se retrouve donc finalement avec une quantité importante de déchets ou de sous produits que l'on peut chercher à réutiliser dans les structures terrestres (remblais par exemple), ou stocker de manière à ce qu'il n'aient pas d'influence sur l'environnement (pollution des nappes notamment) voire qu'ils puissent être utilisés comme terrains de fondation.

Cette dernière possibilité, qui en d'autres termes a pour objectif la *construction d'ouvrages sur zones de décharges*, se retrouve généralement dans les deux cas suivants (Cartier, 1979) :

1) Un projet doit être implanté sur une zone de décharge tout en satisfaisant aux critères des structures projetées (bâtiments, remblais, déblais, ouvrages d'art, ouvrages hydrauliques...); il faut alors évaluer les possibilités de fondation sur ces matériaux compte tenu du coût important qu'entraînerait une substitution. Il peut également s'agir de constructions existantes qui présentent des désordres et dont on veut connaître l'évolution.

2) On doit créer une zone de stockage de résidus et on souhaite, en fin d'exploitation, réhabiliter le terrain pour y construire des structures, généralement

légères, mais néanmoins définitives : dans ce cas, il faut décider des matériels et traitements à utiliser pour accroître les propriétés mécaniques et la densité des résidus et évaluer le comportement ultérieur des matériaux. Pour les déchets industriels, il faut de plus se préoccuper des difficultés liées à l'opération même du stockage et prévoir les dispositions constructives adéquates.

Ces deux situations concernent quasiment tous les types de constructions ainsi qu'en témoignent les communications présentées à ce sous-thème. Ceci confirme d'ailleurs les résultats d'une enquête portant sur 35 sites étudiés dans le réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées (Cartier, 1981) qui indiquaient la répartition suivante :

— Bâtiments - Constructions industrielles	35 %
— Ouvrages en terre	35 %
— Chaussées	18 %
— Ensembles de loisirs	6 %
— Ouvrages d'art	3 %
— Divers (collecteur Ø 2500 par exemple)	3 %

Lors de l'étude de ce type de projet, le géotechnicien est généralement confronté aux questions traditionnelles de la mécanique des sols, mais la nature du matériau de fondation crée des problèmes très spécifiques que Sowers (1968) classe en quatre catégories :

— *Caractérisation du matériau* : c'est essentiellement l'hétérogénéité des constituants, les difficultés de reconnaissance et l'inadéquation des essais courants qui rendent cette phase délicate.

— *Capacité portante* : la faible capacité portante de ces matériaux qui est due essentiellement à la nature élastique des constituants et aux difficultés de compactage, doit pouvoir être évaluée.

— *Tassements* : les tassements immédiats sont assez souvent rapides, importants et différentiels. Par contre, l'activité biochimique des résidus putrescibles assure une phase secondaire qui se traduit par des tassements importants mais différés, ainsi que des problèmes de corrosion. L'évaluation a priori des phases de tassements est bien entendu beaucoup plus délicate que pour les sols : quelques auteurs établissent à cette occasion un parallèle avec les tourbes.

— *Dispositions constructives* : les terrassements réalisés dans ces matériaux sont particulièrement pénibles du fait des émanations de gaz et des odeurs désagréables, mais également de la présence de gros blocs. Quand on a affaire à des déchets industriels particuliers, on peut de plus être exposé à des dangers spécifiques (présence de produits chimiques nocifs, par exemple).

En outre, l'analyse de ces différents problèmes montre que le géotechnicien est tenu de déborder son cadre de compétence traditionnel et qu'il est souvent nécessaire d'évaluer conjointement les problèmes liés à l'influence sur l'environnement (pollution liquide, présence de gaz, ...).

En première analyse, on ne peut donc que constater que les études de faisabilité pour des constructions sur des zones de décharge posent des problèmes spécifiques qui sont aussi divers que délicats à aborder avec les techniques et méthodologies traditionnelles. A l'évidence, ceci n'a toutefois pas découragé les bâtisseurs puisque la littérature technique, notamment américaine, cite des exemples frappants et très divers de constructions importantes sur des décharges comme par exemple :

— une partie de la ville de San-Diego (Californie), un grand immeuble de bureaux à Memphis (Tennessee), l'université de Seattle (Washington);

— un terrain de golf à Houston (Texas), un complexe de sports et de loisirs à Detroit (Michigan) construit sur une décharge contrôlée et comportant notamment une colline de 60 m de hauteur réalisée avec 6 millions de mètres cube de déchets compactés et destinée à la pratique du ski;

— des gares routières, centres commerciaux, stations services et même des pistes d'aéroport (La Guardia à New York, notamment).

A la lecture de cette bibliographie, presque exclusivement anglo-saxonne, on remarque que la plupart des publications traitent des problèmes sanitaires posés par les décharges (Yen et Scanlon annoncent 450 articles pour la période antérieure à 1971). Par contre, on dispose de très peu d'expérience sur les caractéristiques géotechniques des résidus et sur leur comportement sous chargement ainsi que sur les ordres de grandeur des phénomènes (tassements, capacité portante).

La liste des articles traitant de ce sujet s'étoffe toutefois très vite actuellement, traduisant ainsi l'ampleur des problèmes : on notera notamment que ce sujet a fait l'objet d'une séance spéciale au IX^e Congrès International de Mécanique des Sols et Travaux de Fondation en 1977 à Tokyo, puis d'une séance plénière au X^e Congrès de Stockholm en 1981 et d'une conférence particulière de l'American Society of Civil Engineers (Geotechnical Engineering Division) en Juin 1977.

Ceci confirme, s'il en était besoin, l'importance qu'il faut accorder à ce sous thème et surtout l'utilité des contributions écrites qui ne peuvent qu'enrichir les connaissances actuelles et aider à la mise en place d'une expérience française. L'analyse des communications au sous-thème et la synthèse des connaissances actuelles, qui suivent, sont réalisées dans cet esprit.

Analyse des communications présentées au sous-thème I-4

Quatre communications écrites ont été proposées au sous thème I-4 :

- *Reprise des fondations sur zone de décharge*, par D. Gouvenot de Solétanche Entreprise.
- *La consolidation dynamique rend possible la construction en zone de décharge*, par M. Gambin et P. Guinnement de Techniques Louis Ménard.
- *Constructions de remblais autoroutiers sur ballastières remblayées*, par J.-P. Cudennec, J.-P. Gigan et G. Cartier des Laboratoires des Ponts et Chaussées.
- *Comportement géotechnique des résidus urbains*, par G. Cartier du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

Les deux derniers articles ont été présentés lors de l'intervention du Rapporteur Général alors que les deux premiers ont fait l'objet d'une courte intervention orale par leurs auteurs.

D. Gouvenot rapporte deux cas de bâtiments fondés sur zones de décharge pour lesquels il a fallu recourir à une reprise en sous œuvre afin de stabiliser l'évolution de désordres dans la structure. La technique utilisée consiste à placer une armature métallique dans un forage de petit diamètre (qui ne pose pas trop de problèmes de réalisation à travers les obstacles

couramment rencontrés dans les résidus) et à la sceller au sol par injection de ciment sous pression. Le coulis utilisé peut être associé à une protection du pieu contre la corrosion et également assurer un remplissage des vides du terrain. Les essais de chargement rapportés par l'auteur témoignent du comportement correct de la fondation qui, par ailleurs, ne semble pas poser de problème de flambement, notamment en cas d'évolution des vides de la décharge. Il semble bien, finalement, que l'on dispose avec ce type de procédé d'un moyen efficace de traitement a posteriori de constructions subissant des tassements ou des défauts de capacité portante. Pour les projets une comparaison économique reste à faire avec les autres traitements possibles.

M. Gambin et P. Guinnement développent les principes généraux et les principaux avantages du traitement en masse par la méthode de la consolidation dynamique. Outre quelques références étrangères d'application de la méthode aux zones de résidus, qui seront intéressantes à consulter, les auteurs présentent quatre exemples localisés dans l'ouest de la France. Dans chacun des cas, les objectifs ont été atteints puisque les caractéristiques mécaniques du terrain mesurées au pressiomètre ont généralement été multipliées par un facteur 3 à 4 et que l'évolution des tassements semble avoir été stabilisée, tout en assurant probablement une certaine homogénéisation du matériau. On notera avec les auteurs que les règles d'utilisation de la méthode pour les sols usuels restent difficiles à extrapoler aux remblais d'ordures. De plus, il existe certainement une limite d'efficacité vis à vis de la profondeur (noter que les cas présentés n'excèdent pas 7 m d'épaisseur) et vis à vis des déchets noyés ou très putrescibles (ordures ménagères notamment).

J.-P. Cudennec, J.-P. Gigan et G. Cartier complètent la panoplie des méthodes de traitement des décharges de résidus en montrant à partir de trois exemples largement instrumentés comment le chargement (qu'il soit définitif ou réalisé à titre de préchargement avant construction d'un ouvrage définitif) permet d'augmenter les caractéristiques mécaniques du matériau et quelle est l'allure des tassements correspondants. On retiendra que dans les cas présentés où les résidus étaient essentiellement constitués de gravats et déblais de terrassement, donc avec un faible pourcentage de déchets industriels et ménagers, les tassements ont été assez modestes (3 % de l'épaisseur initiale au maximum) et obtenus en quelques mois, c'est-à-dire en général suffisamment rapidement eu égard aux impératifs des chantiers. Les caractéristiques mécaniques ont généralement été multipliées par deux si l'on en croit les mesures au pressiomètre qui, par ailleurs, semblent pouvoir être utilisées pour la prévision des tassements, sous réserve que l'on puisse aboutir à la définition d'une gamme de valeurs numériques pour le coefficient α qui caractérise le sol et la géométrie du remblai. En tant que traitement, la méthode du préchargement apparaît satisfaisante et il reste à réaliser des comparaisons efficacité-coût, par exemple avec la consolidation dynamique.

G. Cartier dresse un inventaire des problèmes géotechniques posés pour les résidus urbains qui se distinguent des autres déchets par la prédominance de l'activité biochimique due à la forte proportion d'éléments putrescibles. La première partie présente les principales caractéristiques de ces résidus et un état des connaissances bibliographiques sur les tassements, la capacité portante, l'amélioration et le traitement des ordures ménagères. Les mesures

présentées sur l'évolution des tassements de deux décharges montrent toutefois que les corrélations proposées dans la littérature technique méritent d'être précisées sur de plus nombreux sites et que la détermination de certains paramètres, comme la densité ou l'indice des vides, est fondamentale mais délicate à réaliser.

Caractéristiques des différents types de résidus

Les résidus que l'on peut rencontrer dans les projets de constructions sont très variés et d'un comportement très différent suivant leur composition. On peut les classer grossièrement en trois catégories :

— *Les déchets et sous produits industriels* : ils sont très particuliers suivant leur nature et leur provenance. Les plus couramment rencontrés sont les déchets de mines, les résidus d'incinération, les cendres, les sous produits d'industries textiles et chimiques, les résidus de décantation. Dans la plupart des cas, ils correspondent à une production continue et sont donc relativement contrôlés et homogènes. Leur diversité, par contre, est telle que l'on ne peut pas les caractériser globalement et qu'ils doivent être l'objet d'études particulières. Quand ils ne sont pas organiques et composés d'éléments résistants, ces matériaux se compactent généralement bien et ne posent pas de problèmes insurmontables en tant que terrain de fondation.

— *Les décharges « sauvages »* : les périphéries urbaines sont typiques de ces sites remblayés de façon peu ou pas contrôlée. Il s'agit le plus souvent d'anciennes ballastières que les exploitants ont abandonnées ou ont comblées de matériaux divers. On y trouve des matériaux de démolition (gravats, briques, bois, ...), des exédents de déblais (limons, ...), des « monstres ménagers » (réfrigérateurs, cuisinières, matelas, ...), ainsi que des ordures ménagères mais en quantité généralement faible (fig. 1). Ce dernier point est en fait primordial et il faut, dans ces cas, s'attacher à caractériser le pourcentage de matières putrescibles. Quand il est faible, on peut s'attendre à un comportement global satisfaisant, sous réserve d'un traitement par compactage ou préchargement, ainsi qu'en témoignent Cudennec et al., et Gambin et al. dans leurs communications écrites. Si les matériaux putrescibles prédominent on s'approche du comportement des décharges d'ordures ménagères.



Fig. 1 Ancienne ballastière comblée de résidus divers



Fig. 2 Mise en dépôt de déchets ménagers dans une décharge contrôlée

— *Les déchets ménagers* : les résidus de l'usage domestique sont traditionnellement stockés dans des décharges municipales qui peuvent également recevoir la collecte de déchets variés. Toutefois, la prise en compte de plus en plus fréquente des problèmes d'environnement encourage les municipalités à avoir recours à des installations plus rationnelles facilitant d'ailleurs une réhabilitation des sites après exploitation. Les décharges contrôlées ainsi réalisées consistent essentiellement en un épandage des ordures en couches successives de 2 à 2,5 m d'épaisseur recouvertes chaque jour d'un matériau inerte. Cette opération est assortie d'un compactage à l'aide d'engins munis de roues à bandages spéciaux (type « pied de mouton », par exemple) ou d'un broyage préalable à la mise en dépôt. Dans l'optique d'une utilisation comme terrain de fondation, les matériaux de ces sites présentent l'avantage d'être homogènes et d'avoir une densité élevée (fig. 2).

La composition des décharges d'ordures ménagères varie bien entendu d'un site à l'autre; on notera toutefois sur le tableau I une valeur moyenne française (Maes, 1979) assez comparable aux valeurs trouvées dans la littérature technique. La détermination de cette

composition sur un site donné est particulièrement importante car il apparaît à l'évidence que le comportement global de la construction à réaliser dépendra du comportement des différents constituants. De ce point de vue, on peut dresser un bref inventaire des principales caractéristiques des éléments constituant une décharge d'ordures ménagères (Sowers 1973) :

— *Déchets alimentaires* : Humide. Fermente et pourrit rapidement; compressible.

— *Papiers-Tissus* : Humide. Pourrit et brûle; compressible.

— *Déchets de pelouses, broussailles, souches* : Humide. Fermente, pourrit et brûle.

— *Matières plastiques* : Sec. Compressible; indestructible sauf par combustion.

— *Matériaux métalliques divers (boîtes de conserve, ...)* : Sec; se corrode et s'écrase.

— *Masses métalliques (cuisinières, ...)* : Sec. Rigide; se corrode légèrement.

— *Caoutchouc (pneus)* : Sec. Brûle; compressible mais ne s'écrase pas; ne pourrit pas.

— *Verre* : Sec. S'écrase; indestructible.

— *Matériaux de démolition* : Sec. S'écrase et se comprime.

— *Cendres — Déchets chimiques* : Très humide. Compressible; actif chimiquement; partiellement soluble.

Ces différents processus de décomposition sont directement liés à la teneur en eau (l'expression « teneur en matières liquides » serait peut être mieux adaptée) régnant dans les décharges. Rao (1974) relate des mesures faites à l'Université de Purdue en 1959 qui montrent que la teneur en eau peut être de 65 à 72 % dans les matières végétales et animales et environ de 1 à 3 % dans les résidus plus solides. Ceci correspond à une valeur moyenne de 20 % qu'il faut rapprocher des 20 à 50 % annoncés par Sowers (1973) et de valeurs similaires données par ailleurs (Chen et al., 1977). Malgré la présence d'éléments liquides dans les

Tableau I Comparaison de la composition de quelques décharges municipales

Référence Composition	Madison U.S.A. Chen et al.	Valeurs moyennes Sowers	Carlton Moore et al.	Springvale Moore et al.	Coburg Moore et al.	U.S.A. Valeurs moyennes	FRANCE Valeurs moyennes
Papier, cartons et textiles	44 %	10 à 40 %	42,2 %	28,3 %	22,9 %	42 %	30 %
Matières végétales et animales	29,1 %	20 à 40 %	24,5 %	45,3 %	49,3 %	22,5 %	25 %
Verre	10 %	5 à 15 %	11,5 %	13,6 %	14,8 %	6 %	7 %
Métaux	6,7 %	6 à 16 %	11 %	8,7 %	9,0 %	8 %	6 %
Bois	1,1 %	0 à 5 %	—	—	0,1 %	11 %	—
Plastiques	1,8 %	1 à 2 %	10,5 %	3,6 %	3,1 %	—	5 %
Démolition (briques, béton ..)	7,2 %	0 - 10 %	—	—	—	—	—
Eléments fins	—	0 à 5 %	—	—	—	—	17 %
Divers	—	5 - 10 % (pneus)	0,3 %	0,5 %	0,8 %	10 %	10 %

déchâres, il faut également noter que 45 % du poids total des résidus est susceptible de brûler ou de se consumer, phénomène qui contribue aux tassements.

Le comportement d'une décharge sous chargement est, d'autre part, fortement influencé par l'état de compacité du matériau que l'on peut caractériser par la densité et l'indice des vides. La détermination de la densité des résidus en place reste une opération délicate puisqu'il est difficile de prélever un échantillon représentatif en profondeur. Les densités que l'on trouve dans la littérature sont généralement déterminées par pesées lors de la mise en dépôts. Il s'agit donc de poids volumiques initiaux. Le tableau II donne quelques valeurs typiques du poids volumique des ordures ménagères. On estime généralement qu'après tassements le poids volumique d'une décharge peut atteindre 10 kN/m³.

L'indice des vides correspondant peut varier dans une fourchette très large suivant que les déchets sont bien compactés ($e_0 = 2$) ou non compactés ($e_0 = 15$).

Enfin, une particularité essentielle des décharges de résidus ménagers réside dans la décomposition lente des différents déchets. Une partie de cette décomposition résulte d'activités physico-chimiques (dues notamment aux infiltrations d'eau et à la chaleur dégagée par le pourrissement des matières organiques) : oxydation, entraînement de particules, etc... Les solutions liquides qui s'échappent des décharges contiennent généralement des matières en suspension et des microorganismes susceptibles de polluer l'environnement. L'essentiel de la décomposition résulte en fait de l'activité biochimique qui est continue : elle est anaérobie en profondeur et aérobie en surface et se traduit par la production de liquides et de gaz. Le méthane et le dioxyde de carbone sont les deux principaux gaz et proviennent essentiellement de la décomposition des déchets animaux et végétaux qui contiennent des hydrates de carbone et des sucres qui sont décomposés par les bactéries. La décomposition des graisses ou de la cellulose contenue dans le papier peut durer des années si l'on est en conditions anaérobies (Laguros et Robertson, 1977). On estime généralement que la production de méthane dans les décharges peut durer 20 ans. En général la concentration en méthane augmente avec le temps pendant que

celle en CO₂ diminue. Laguros et Robertson (1977) donnent la comparaison suivante entre le gaz ainsi produit et le gaz naturel :

	Gaz de décharge	Gaz naturel
Méthane	35 à 45 %	95 %
Éthane	0	3 %
Hydrocarbures lourds	0	2 %
CO ₂	36 %	1 %
Azote	15 à 25 %	0

La décomposition des résidus produit également des acides organiques qui sont très corrosifs et attaquent les métaux et le béton (Sowers, 1968) et sont donc un facteur de la décomposition physico-chimique. Cette action s'accompagne d'une élévation de la température des déchets qui est par conséquent indicative de la décomposition. On note des moyennes allant de 35 à 45 °C, voire plus (Rao, 1974).

Problèmes géotechniques rencontrés par les constructions sur décharges

• Techniques de reconnaissance. Essais.

La caractérisation d'une décharge de résidus, tant au niveau de la reconnaissance que de la détermination des paramètres géotechniques, n'est pas, a priori, redevable des techniques habituellement utilisables pour les sols. Lors de la reconnaissance préliminaire on se heurte tout d'abord au caractère très hétérogène du matériau et à la présence de blocs. Taylor (1972) indique qu'il suffit qu'un sondage rencontre un bloc de béton ou même de bois, pour que l'on doive se déplacer de quelques mètres et recommencer le forage. De plus la quantité de matériau récupérée au carottage est souvent faible surtout sous la nappe. Le Comité de l'ASCE (Committee on Sanitary Engineering

Tableau II Valeurs typiques de poids volumiques des déchets ménagers

Référence Traitement	Rao, 1974	Brunner et Keller, 1971	Sowers 1968	Moore et al. 1977	Yen et Scanlon 1975
Sans compactage	1,5 à 2 kN/m ³	-	8	2,5 à 3,5 kN/m ³	-
Faible compactage	3,5 à 6 kN/m ³	3 kN/m ³	à	-	6,5 kN/m ³
Compactage sérieux	-	10 kN/m ³	12 kN/m ³	-	-

Research of the Sanitary Engineering Division) a étudié de nombreuses décharges à partir d'échantillons prélevés avec un carottier d'un pouce de diamètre et six pouces de longueur battu dans le terrain par un marteau de 16 kg et vériné au moment du prélèvement. Il ne fait pas de doute que cela ne permet par contre pas d'identifier les matériaux et de faire des essais classiques en laboratoire. Il faut pour cela avoir recours à de gros forages plus délicats et coûteux à réaliser. Afin de caractériser la résistance globale du matériau et de détecter les passages plus durs ou les blocs, Sowers utilise l'essai standard de pénétration (SPT). Il précise toutefois que les valeurs élevées, mesurées localement, sont rarement représentatives d'une forte résistance et sont généralement dues à un point dur. Le pénétromètre classique à cône est également cité (Florian, 1977). En France, on a utilisé le pénétromètre (généralement dynamique) ainsi que le pressiomètre. Les résultats sont souvent difficiles à interpréter (fig. 3), mais fournissent toutefois des indications notamment sur les hétérogénéités en grand. De plus, Cudennec et al., ainsi que Gambin et al. ont donné des résultats numériques pressiométriques qui semblent applicables pour caractériser les phénomènes (tassements et amélioration de caractéristiques, respectivement).

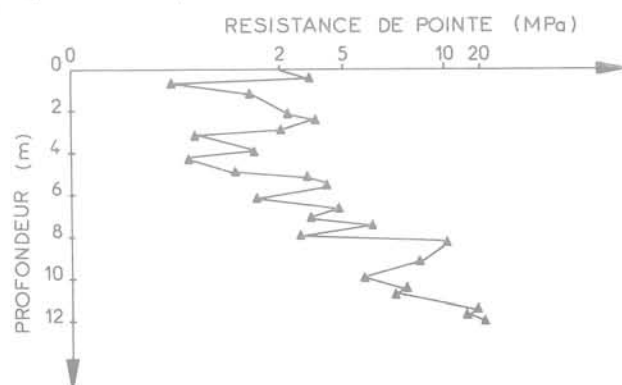


Fig. 3 Exemple de résultats d'un essai pénétrométrique dans une décharge municipale

Pour la détermination de modules de déformation des résidus en place, Moore et Pedler (1977) ont utilisé des essais de plaque de différentes dimensions (diamètres 30, 45 et 60 cm). L'interprétation de ces essais est réalisée à l'aide d'un programme sur la base des solutions théoriques pour les déformations de multicouches élastiques.

La détermination des caractéristiques géotechniques en laboratoire est plus difficile pour les résidus que pour les sols. Ceci tient à la difficulté de tailler un échantillon représentatif, mais également au fait que c'est essentiellement les paramètres du comportement différé (tassements secondaires notamment) qui sont intéressants. De plus, ce type d'essai est à l'évidence limité aux résidus possédant une certaine homogénéité et peu de gros blocs (résidus ménagers, certains résidus industriels, cendres, ...). Quelques auteurs, cependant, ont adapté le type de matériel existant pour réaliser des essais de consolidation. Rao (1974) utilise un œdomètre métallique traité à l'époxy, de grande dimension (échantillon de diamètre 60 cm et de hauteur 20 cm). Des ouvertures pratiquées sur le côté de l'appareil permettent de prélever les gaz, et d'autres sous l'échantillon permettent de recueillir les liquides polluants. Des appareillages encore plus sophistiqués ont été construits. Chen, Zimmerman et Franklin (1977) qui ont proposé un modèle pour le comportement des

résidus ont fait leurs essais sur un œdomètre permettant d'appliquer une contre pression, de contrôler le drainage et de mesurer la pression interstitielle à la base de l'échantillon. De nombreux auteurs s'accordent toutefois pour reconnaître que ces essais ont une valeur assez théorique et que l'essai de chargement en vraie grandeur reste une solution mieux adaptée à ces matériaux. Ceci pose toutefois le problème de l'instrumentation de l'ouvrage expérimental qui doit tenir compte de particularités comme la température élevée (dans les décharges d'ordures ménagères) et la présence de points durs qui peuvent, par exemple, détruire les rails reliant les appareils au plot de mesure (généralement des tassomètres).

• Capacité portante. Fondations

La capacité portante des résidus, c'est-à-dire en fait leur aptitude à supporter des charges, est généralement faible. En outre, elle dépend bien entendu des proportions respectives d'éléments très résistants (briques, métaux, ...) et de la façon dont l'ensemble a été compacté. D'autre part, la conséquence directe de cette hétérogénéité est que la capacité portante peut être très variable d'un point à l'autre du site et se traduire par un comportement différentiel de la construction. Une fois encore, on est donc amené à conseiller au projeteur une caractérisation préalable de la constitution de la décharge, par exemple grâce à une campagne pénétrométrique.

Pour ce qui est des ordures ménagères (qui donnent généralement les valeurs les plus faibles) la capacité portante peut être comprise entre 25 et 100 kPa selon l'âge des résidus. Des essais statiques relatés par Rao (1974) indiquent des valeurs de 125 kPa après une période de préchargement d'un an. Sowers (1968) propose par contre de se limiter à 50 à 80 kPa si on ne veut pas risquer une rupture. Divers auteurs notent également que la présence d'une couche de sol bien compacté en surface peut permettre d'éviter des problèmes pendant et après construction, notamment en assurant une certaine diffusion des charges. Quand il apparaît impossible de construire à la surface d'une décharge, on peut bien entendu envisager de se fonder en profondeur au niveau du bon terrain. Ainsi que le souligne Gouvenot ceci pose toutefois des problèmes de réalisation car on peut notamment se heurter à des obstacles infranchissables, même au trépan. De plus, la présence de matériaux en décomposition oblige à protéger les pieux contre toute corrosion.

• **Tassements** : plusieurs mécanismes sont responsables du tassement des décharges de résidus (Sowers, 1973) :

Action mécanique : la distorsion et la réorientation des divers composants produisent une consolidation similaire à celle des sols organiques.

Percolation et ravinement : l'eau qui percole à travers les résidus entraîne les éléments fins vers les vides laissés par les plus gros éléments.

Changements physico-chimiques : il s'agit essentiellement de la corrosion, de l'oxydation et de la combustion.

Décomposition biochimique : la fermentation et la décomposition (aérobie ou anaérobie) des matières végétales et animales se traduisent par des actions continues, à long terme.

Interaction : ces différentes actions interfèrent dans le phénomène du tassement. Les gaz produits par la fermentation brûlent; les acides organiques produisent

de la corrosion; la consolidation engendre des changements de volume propices aux percolations.

Il faut ajouter à ces actions le tassement élastique qui représente un faible pourcentage du tassement total et qui se produit dès l'application de la charge. Il est en général réversible.

Les tassements résultant, qui se traduisent par l'expulsion de liquide et de gaz, ne cessent quasiment jamais, notamment pour les résidus très organiques où la phase secondaire est en général prépondérante. La vitesse de dissipation des pressions dépend en fait de l'indice des vides, de la perméabilité et des caractéristiques de compressibilité du matériau. Zimmerman et al. (1977) ont montré que la variation de la perméabilité des résidus affecte la vitesse de dissipation des pressions alors que les changements dans la matrice solide affectent surtout le taux de fluage. La vitesse de tassement d'une décharge dépend finalement de la température, de la teneur en eau et des conditions d'environnement comme la présence d'une nappe ou de ravinements. Quand la proportion d'éléments putrescibles est importante, le phénomène de décomposition se produit très vite dès la mise en décharge, puis diminue d'intensité avec le temps et la profondeur en fonction des conditions d'exposition des déchets. En effet, selon Merz et Stone (1966) le tassement aérobie peut être quatre à six fois supérieur au tassement anaérobie.

En général, la majorité des tassements se produisent durant la première année de mise en décharge (entre la moitié et les deux tiers du tassement total selon Sowers, 1968) ce qui est favorable pour les constructions réalisées sur zone ancienne. Le tableau montre de plus qu'ils sont souvent importants : ils peuvent atteindre 10 à 30 % de l'épaisseur initiale sous poids propre (Comité de l'ASCE; Rao). Le caractère très hétérogène des décharges provoque par ailleurs des tassements différentiels qui sont particulièrement gênants pour la plupart des structures rigides. Afin de minimiser ce problème, Rogus (1960) recommande une densification de la couche superficielle par l'action de compacteurs lourds, alors que Sowers (1968) suggère le préchargement.

Pour le projeteur, le problème est bien entendu la prévision de ces tassements. Cudennec et al. ont montré dans leur communication à ce sous-thème que le pressiomètre peut être un instrument intéressant. Toutefois, la valeur du coefficient α qui intervient directement dans le résultat reste à caler sur de plus nombreux sites. En fait, bien que les essais en place soient certainement l'outil le plus raisonnable pour ces matériaux hétérogènes, la littérature technique décrit principalement des méthodes de prévision basées sur les théories œdométriques usuelles pour les sols. Sowers (1973) se base notamment sur le comportement des sols organiques et décompose le tassement des résidus urbains en deux phases :

— Une phase primaire qui dure rarement plus d'un mois et pendant laquelle l'indice des vides décroît suivant la relation bien connue :

$$\Delta e = -C_c \cdot \lg \frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma}{\sigma'_0}$$

où σ'_0 est la contrainte effective initiale et $\Delta \sigma$ l'accroissement de contrainte dû à un chargement. L'indice de compression C_c est donné par la figure 4 en fonction de l'indice des vides initial. Moore et Pedler (1977) ont confirmé le fuseau donné par Sowers à l'aide d'essais de chargement à la plaque sur une

décharge contrôlée. Ces résultats, obtenus en supposant une densité des matières solides de 2, sont tout à fait concordants. On a d'autre part porté sur la figure 4 les valeurs obtenues sur les sites de Roanne et d'Arnouville (Cartier, 1981) et qui semblent apporter un certain crédit au fuseau de Sowers.

— Une phase secondaire qui résulte de la compression secondaire, de l'action physico-chimique et de la décomposition biochimique et qui se traduit par la relation :

$$\Delta e = e_2 - e_1 = -\alpha \cdot \lg \frac{t_2}{t_1}$$

entre l'indice des vides et le temps. Le coefficient de compression secondaire α est donné par la figure 5 suivant les conditions de la décomposition.

Ces dernières valeurs sont généralement considérées pessimistes. Keene (1977) a réalisé des mesures de tassement à diverses profondeurs d'une décharge. Cela conduit à une valeur moyenne du coefficient α qui est assez proche de la limite « conditions non favorables à la décomposition ». Ceci est confirmé par Yen et Scanlon (1975) sur la base de comparaisons de vitesses relatives de tassements de trois décharges

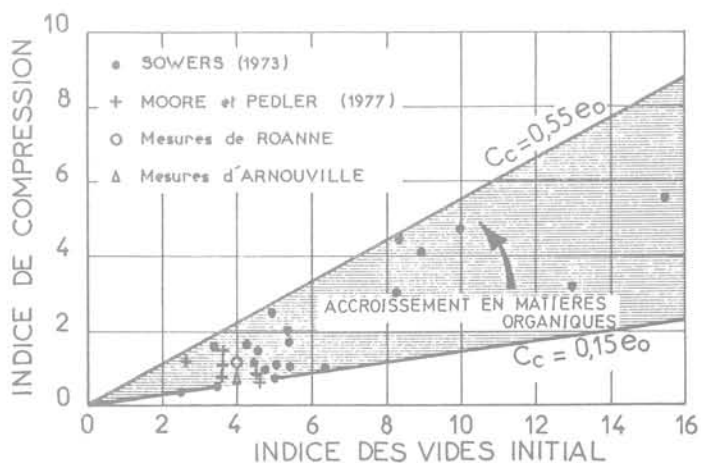


Fig. 4 Indice de compression en fonction de l'indice des vides initial

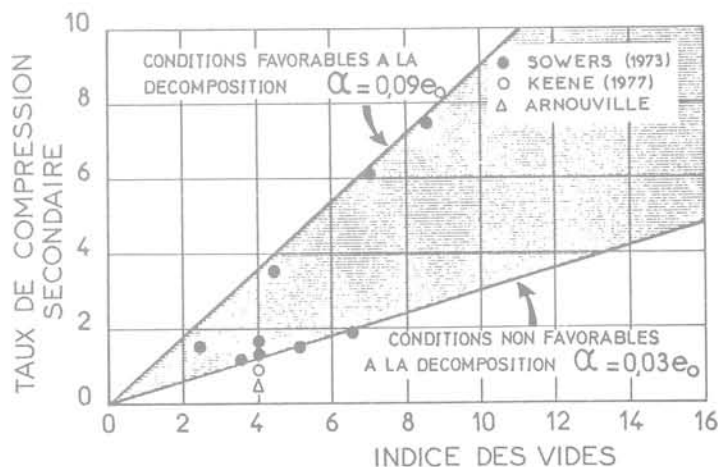


Fig. 5 Taux de compression secondaire en fonction de l'indice des vides initial

contrôlées dans la région sèche de Los Angeles. La valeur tirée de la décharge d'Arnouville est par contre plus faible que la borne inférieure du fuseau. Ceci pourrait provenir du fait que les conditions de décomposition de cette décharge contrôlée sont parfaitement anaérobies et que le compactage a été très énergique.

Les valeurs de Sowers semblent donc pouvoir être utilisées pour des projets, bien que les paramètres à introduire (conditions de la décomposition, indice des vides, pourcentage de matières organiques) paraissent bien délicats à estimer avec précision. On peut également reprocher à ce modèle qu'il soit calqué sur le comportement des sols, alors que la plupart des hypothèses habituelles ne sont pas satisfaites. En effet, on n'a vraisemblablement pas la saturation complète (présence de gaz), les grains et le liquide interstitiel ne sont pas incompressibles, la validité de la loi de Darcy est très douteuse et, surtout, on a prépondérance des phénomènes secondaires. Pour tenir compte de ces effets particuliers, divers auteurs ont proposé des modèles plus sophistiqués. Zimmerman et al. (1977), notamment, ont bâti une relation entre la dissipation de pression interstitielle et le temps qui se présente sous forme d'une équation de continuité incluant l'influence des déformations, de l'activité chimique et biologique et de la variation du degré de saturation avec le temps.

Les essais de consolidation en laboratoire, réalisés par Rao (1977) puis Chen et al. (1977), ont montré une bonne concordance entre les mesures et les prédictions faites suivant ce type de modèle. Toutefois, l'allure des courbes de tassements mesurés en laboratoire est très différente de ce que l'on obtient en général in-situ et la distribution en fonction du temps que l'on peut calculer dépend essentiellement de la théorie choisie pour tenir compte des effets secondaires. A l'évidence, de nouvelles recherches, aussi bien en laboratoire qu'in-situ, semblent nécessaires si l'on veut développer des méthodes de prédiction des tassements et affiner les ordres de grandeur des paramètres. En pratique, les calculs de tassements restent délicats et, chaque fois que cela est possible, le suivi d'une planche expérimentale en vraie grandeur est le meilleur outil de prévision du comportement de l'ouvrage définitif.

• Phénomènes liés à l'activité biochimique

Le méthane contenu dans le gaz des décharges est légèrement soluble dans l'eau et très léger, ce qui explique qu'il se dégage verticalement. Quand il rencontre des vides importants, il s'y accumule ce qui peut être très dangereux lors d'excavations ou de sondages (formation de grisou). Stone (1978) et Mac Farlane (1969) relatent ainsi un certain nombre d'accidents avec morts d'hommes ou dégâts matériels importants (explosion, feux).

Laguros et Robertson (1977) montrent de plus que selon les caractéristiques de la décharge (perméabilité, pouvoir d'absorption, minéralogie des sols, nature du gaz) la nappe de gaz peut se propager sur des distances de l'ordre de 200 m.

Le contrôle de la concentration des gaz (avant qu'elle ne devienne dangereuse), nécessite un appareillage particulier. York et al. ont développé cet aspect du problème en réalisant des mesures in-situ à l'aide de différentes méthodes (tubes événements ou membranes emprisonnant le gaz en surface) et de différents appareils (analyseur de gaz, mesure de pression, mesure du débit, etc.). Le géotechnicien, de son côté, est concerné par les dispositions constructives

permettant de récupérer le gaz ou d'assurer une ventilation en toute sécurité à proximité des constructions. Parmi les nombreuses méthodes existantes on citera les tranchées (autour et dans la décharge) remplies de graviers ou les tuyaux d'aération (fig. 6). On peut également avoir recours à des recouvrements imperméables et des membranes mais ces dernières sont parfois incompatibles avec des grandes déformations. Dans tous les cas le réseau doit être dimensionné pour éviter toute sous pression sous les ouvrages et être équipé de tuyaux de ciment résistants au sulfates et munis de joints souples pouvant admettre des déformations différentielles.

La décomposition produit également des acides organiques qui attaquent les tuyaux d'acier, les drains, les fondations de bâtiments. Un tuyau d'acier galvanisé peut, en effet, être piqué en un an s'il n'est pas traité avec un revêtement résistant à la corrosion. C'est également le cas du ciment qui est attaqué par l'ion sulfate.

Les problèmes de pollution du sous-sol par les liquides s'écoulant de la décharge nécessitent, bien entendu, d'être évalués en même temps que les aspects géotechniques.

• Terrassements

On dispose de très peu de renseignements sur les problèmes posés par les terrassements dans les résidus. On comprend que le caractère hétérogène et la présence de blocs ne facilitent pas la réalisation d'excavations et conduisent à prévoir un matériel approprié à ces conditions. Dans les décharges de résidus uniquement ménagers on a noté que le matériel traditionnel pour les terrassements (Scraper, dumper) était peu efficace notamment à cause du caractère très fibreux du matériau et du fort coefficient de foisonnement dans les bennes. Dans ce cas, l'utilisation d'une pelle hydraulique qui « coupe » le matériau est préférable. Bien entendu les cadences s'en trouvent réduites et les coûts augmentés d'autant. Enfin, Sowers signale également l'aspect pénible de ce travail et relate même des cas d'asphyxie ou de maladie du personnel.

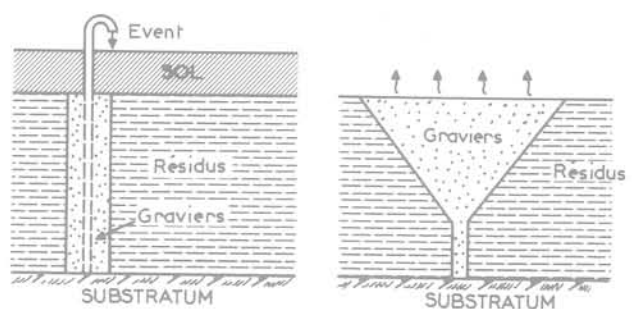


Fig. 6 Systèmes d'aération d'une décharge

Amélioration et traitement des décharges de résidus

Les différents problèmes qui peuvent se poser lors de la construction sur décharges de résidus ayant été quantifiés selon les quelques règles précédentes, on est assez souvent amené à envisager une amélioration du site, notamment afin d'augmenter la capacité portante et de réduire ou anticiper les tassements. Pour cela diverses techniques sont envisageables sans que, dans l'état actuel des connaissances, on soit

parfaitement capable de dire lesquelles sont les mieux adaptées en fonction des différentes conditions rencontrées.

- **Compactage** : bien que la densité d'une décharge augmente naturellement avec le temps, il est intéressant de densifier les résidus lors de leur mise en dépôt puisque l'on a vu que ce facteur influe sur le comportement sous charge. Il permet de diminuer le volume initial, de réduire les vides et d'uniformiser le matériau. Le résultat final dépend évidemment de l'équipement utilisé, du nombre de passes et de l'épaisseur des couches compactées mais également de la teneur en eau lors du compactage. Le matériel spécialement conçu pour les décharges contrôlées est généralement lourd et permet de niveler et de broyer les résidus (pieds de moutons). Sowers indique que l'efficacité du compactage est maximale durant les 8 à 12 premières passes et limitée en profondeur à environ 3 mètres.

Quand la décharge est déjà en place au moment où on réalise le projet, le compactage en surface devient peu intéressant mais on peut alors avoir recours à la consolidation dynamique qui, comme le montrent Gambin et al., permet d'augmenter les caractéristiques de déformabilité et d'homogénéiser la masse de terrain.

- **Préchargement** : cette méthode, qui consiste à placer une charge sur le terrain jusqu'à ce que la vitesse de tassement soit compatible avec les critères de l'ouvrage à construire, est classique et efficace pour les sols. Pour les résidus, les essais à la plaque de Moore et Pedler (1977) ont montré l'influence positive d'un préchargement sur la vitesse et la valeur des tassements à court terme (fig. 7). Toutefois, leur amplitude finale est gouvernée par le comportement à long terme et il subsiste dans ces résultats un doute quant à l'efficacité du préchargement sur la compression secondaire. Les mesures rapportées par Cudenec et al. montrent toutefois que sur les sites de résidus divers comportant une faible proportion d'éléments putrescibles, le préchargement est tout à fait efficace vis-à-vis des tassements, qui se stabilisent en quelques mois, et vis-à-vis des caractéristiques mécaniques qui sont facilement doublées.

- **Injections** : Rao (1977) a réalisé des essais en laboratoire et en cuve sur des résidus traités aux cendres volantes, elles-mêmes intéressantes à réutili-

ser. Les résultats sont toutefois encore insuffisants et de nouvelles recherches seraient souhaitables ainsi que sur les injections de produits accélérant la décomposition (mélange d'azote, de phosphore et de potassium).

Conclusions

Les projets actuels conduisent de plus en plus souvent les géotechniciens à étudier la faisabilité de constructions sur zones de stockage de résidus. Les problèmes qui se posent lors de ces études sont divers et délicats à aborder, ainsi qu'en témoigne l'analyse de la bibliographie et de quelques cas réels rapportés à ce sous-thème :

- **Caractérisation des matériaux** : l'hétérogénéité des constituants, les difficultés rencontrées lors des reconnaissances et l'inadéquation des essais courants ne permettent pas de fournir une modélisation simple du matériau en vue d'une quantification des phénomènes.

- **Capacité portante** : la faible capacité portante de la plupart des résidus peut être améliorée par compactage, mais les auteurs recommandent toutefois de prendre des valeurs admissibles assez faibles pour éviter toute rupture.

- **Tassements** : on assiste généralement à une première phase rapide, importante et différentielle suivie d'une phase secondaire qui dépend de la teneur en matières organiques. Divers modèles tenant compte de ces effets différés ont été proposés pour les ordures ménagères, mais les résultats restent dispersés et il apparaît qu'il faudrait entreprendre d'autres recherches, aussi bien en laboratoire qu'in-situ, si l'on veut développer de meilleures méthodes de prédiction des tassements et affiner les ordres de grandeur des paramètres. En ce qui concerne les résidus de comblement de ballastières et certains résidus industriels où la proportion de sol l'emporte sur celle des matières putrescibles, les tassements doivent être plus rapides et peuvent certainement être anticipés par préchargement avant construction.

- **Dispositions constructives** : les projets doivent tenir compte du caractère polluant des résidus et notamment de la production de liquides corrosifs et de gaz toxiques. Quelques indications sont données dans la littérature vis-à-vis de ces phénomènes, ainsi que sur le traitement que l'on peut appliquer aux résidus pour diminuer les conséquences de l'activité biochimique (compactage, préchargement, injections, ...). Ce dernier aspect, fondamental pour les projets réels, reste toutefois à développer si on veut disposer de méthodes bien adaptées aux différents cas.

Ces différents aspects spécifiques des décharges de résidus font que le géotechnicien est actuellement relativement mal armé pour dimensionner des structures sur ces sites. Dans l'état actuel de nos connaissances, l'alternative passe par un suivi de plaques d'essai en vraie grandeur permettant notamment de suivre les mouvements induits. Pour l'avenir, l'accumulation de ces cas devrait de plus permettre de classer de façon plus fine les différents matériaux et de définir une méthodologie d'étude, depuis la reconnaissance jusqu'au dimensionnement. On ne peut que souhaiter par ailleurs que cette méthodologie inclue des préoccupations plus vastes que celle de la seule mécanique des sols et notamment tout ce que le mot environnement englobe dans le langage actuel.

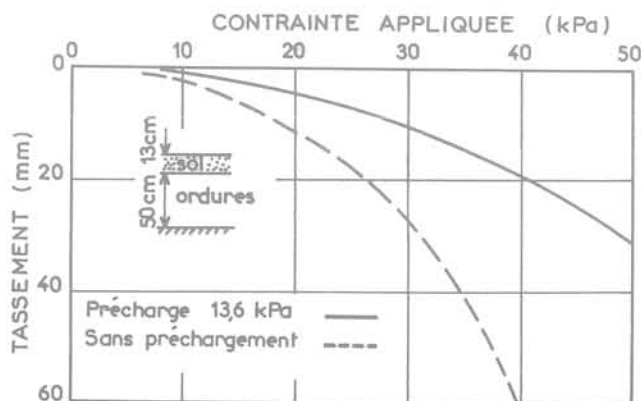


Fig. 7 Influence d'un préchargement sur les tassements de résidus provoqués par un essai de plaque

Références bibliographiques

- ANRED (1979), Cahiers techniques de la Direction de la Prévention des Pollutions «Élimination des déchets des ménages».
- G. Cartier (1979), Les résidus urbains et industriels comme sous-sol de fondation, Colloque national «Connaître le sous-sol» (1), p. 407-416, Lyon.
- G. Cartier (1981), Enquête sur les problèmes de construction sur résidus, Rapport de recherche interne LCPC.
- G. Cartier, N.T. Long, P. Pouget, R. Bargillat et J.P. Cudennec (1981), Déchets urbains et pneumatiques usagés en génie civil, X^e CIMSTF, p. 603-606, Stockholm.
- W.H. Chen, R.E. Zimmerman et A.G. Franklin (1977), Time settlement characteristics of milled refuse, Spec. conf. of the GED, ASCE, Univ. of Michigan, p. 136-152.
- Committee on Sanitary Engineering Division (1959), Refuse volume reduction in a sanitary landfill, Proc. ASCE, J. SED, n° SA6, novembre, p. 37-50.
- G.F. Florian (1977), Landfill of solid waste on soft subsoil, IX^e CIMSTF, session spéciale n° 11, Tokyo, p. 131-136.
- P. Keene (1977), Sanitary landfill treatment : Interstate highway 84, Spec. conf. of the GED, ASCE, Univ. of Michigan, p. 632-644.
- J.G. Laruros et J.M. Robertson (1977), Generation, movement and control of gas in sanitary landfills, IX^e CIMSTF, Session spéciale n° 11, Tokyo, p. 295-304.
- I.C. Mac Farlane (1969), Muskeg Engineering Handbook, Univ. of Toronto Press (cité par RAO, 1974).
- M. Maes (1980), Les grandes options techniques de l'assainissement contemporain, Le Moniteur des T.P., 3 mars 1980, p. 43-46.
- R.C. Merz et R. Stone (1966), Sanitary landfill behavior in an aerobic environment, Public works, janvier, p. 67-70 (cité par RAO, 1974).
- P.J. Moore et I.V. Pedler (1977), Some measurements of compressibility of sanitary landfill material, IX^e CIMSTF, Session spéciale n° 11, Tokyo, p. 319-330.
- S.K. RAO (1974), Prediction of settlement in landfills for foundation design propose, Ph. D. Thesis, West Virginia Univ.
- S.K. Rao, L.K. Moulton et R.K. Seals (1977), Settlement of refuse landfills, Spec. conf. of the GED, ASCE, Univ. of Michigan, p. 574-598.
- G.F. Sowers (1968), Fondation problems in sanitary landfills, Proc. ASCE, Journal of the SED, n° SA1, p. 103-116.
- G.F. Sowers (1973), Settlement of waste disposal fills, VIII^e CIMSTF, Moscou, vol. 2, p. 207-210.
- G.F. Sowers (1976), Discussion on : Sanitary landfill settlement rates, Journal of the GED, Proc. ASCE 102, n° GT6, p. 653.
- R. Stone (1978), Preventing the underground movement of methane from sanitary landfills, Civil Engineering - ASCE, janvier, p. 51-53.
- M.J. Taylor et A.I. Buchignani (1972), Field test of debris fill over soft soil, ASCE Spec. conf. on earth structures performance, Purdue, vol. 1, p. 395-414.
- B.C. Yen et B. Scanlon (1975), Sanitary landfill settlement rates, Journal of the GED, Proc. ASCE 101, n° GT5, p. 475-487.
- D. York, N. Lesser, J. Bellatty, E. Irsai et A. Patel (1977), Terminal development on a refuse fill site, Spec. conf. the GED, ASCE, Univ. of Michigan, p. 810-830.
- R.E. Zimmerman, W.H. Chen et A.G. Franklin (1977), Mathematical model for solid waste settlement, Spec. conf. of the GED, ASCE, Univ. of Michigan, p. 210-226.