

Comportement des ouvrages dans les argiles expansives d'In-Aménas

Z. DERRICHE

*Maître de Conférences,
Inst. Génie Civil, USTHB,
B.P. 32 El-Alia
Bab-Ezzouar
Alger*

L. IGUECHTAL

*Ingénieur, NAFTEC,
H-Dey, Alger*

M. TAS

*Maître assistant,
Inst. Sciences de la terre,
USTHB, Alger*

Résumé

La présence d'argile gonflante cause de sérieux problèmes dans les régions à climat aride. Dans ces régions l'argile se trouve dans un état de dessiccation tellement poussé que l'apport d'une infime quantité d'eau peut libérer une énergie faramineuse capable de provoquer des sinistres importants dans les constructions.

En Algérie les argiles gonflantes constituent un handicap majeur pour le développement des régions du Sud, d'autant plus que ces dernières renferment l'essentiel des ressources pétrolières du pays. On rapporte dans cet article l'expérience de désordres du gonflement vécue dans la région d'In-Aménas. On présente la région dans ses contextes environnemental et géomorphologique puis on analyse le comportement de quelques ouvrages affectés par le gonflement du sol. On termine en inférant quelques recommandations relatives à la réalisation de constructions dans la région.

The behaviour of works on the expansive clays of In-Aménas

Abstract

The occurrence of expansive clays causes serious stability problems in regions with arid climate. In these areas, the clay is so dry that a supply of a tiny quantity of water may release a fantastic energy capable of producing important damage in structures.

In Algeria the problem of expansive clays represents the major hamper for the development of the south. In these regions can be found the major part of the country oil resources. In this work we analyze the case of swell damage experienced in the region of In-Aménas. We present the region with its environmental and geomorphological peculiarities then we study the behaviour of some selected structures affected with swell damage.

Introduction

Les dommages causés par le gonflement des sols peuvent être particulièrement coûteux (Parcevaux, 1980). De nombreuses expériences fâcheuses vécues dans plusieurs pays du monde sont rapportées dans la littérature (Komornik et Zeitlen, 1969, Jones *et al.*, 1973). L'Algérie, à l'instar de ces pays, souffre également du problème de gonflement des sols. Des cas de désordres alarmants se sont déclarés ces dernières années dans plusieurs régions du Sud du pays. Tant et si bien que le problème de gonflement constitue un handicap majeur pour le développement de ces régions. Le cas le plus marquant est sans conteste celui des ouvrages pétroliers de la région d'In-Aménas. L'expérience vécue à In-Aménas est singulière et assez instructive pour mériter d'être portée à l'attention des ingénieurs et spécialistes du métier. Ce travail constitue une contribution dans cette direction.

On analyse dans cet article le comportement global d'un certain nombre d'ouvrages appartenant à une infrastructure pétrolière de la région, différemment affectés par le gonflement des sols de fondation. On tente d'identifier et d'expliquer le pourquoi de la performance de ces ouvrages dans le contexte des conditions géomorphologiques et climatiques du milieu. On donne quelques recommandations qui paraissent évidentes au vu du comportement observé. Enfin, on conclut sur la nécessité d'établir des normes et règles spécifiques pour la conception et la réalisation des ouvrages dans les régions arides.

Situation

La région d'In-Aménas est à 1 600 kilomètres au sud-est de la capitale du pays Alger (Fig. 1). Elle est repérée par 28°5' de latitude N et 9°63' de longitude E.



FIG. 1 Localisation géographique de la ville d'In-Aménas.
In-Aménas geographical situation.

La région se trouve à une altitude de 561 mètres et se caractérise par une morphologie plutôt aplatie avec absence quasi totale de drainages naturels superficiels.

Contexte géomorphologique

La géologie

Les données géologiques locales montrent que la formation principale rencontrée dans la région appartient à la série des argiles triasiques du Zarzaitine : région qui renferme les plus importants gisements pétroliers du Sahara. Des sondages pétroliers ont montré que cette formation d'argile a une puissance supérieure à 180 mètres et surmonte une formation carbonifère très épaisse.

Les multiples études de sols réalisées dans la région ont révélé la présence d'un sol composé essentiellement d'argile rouge bariolée (de mauve, de jaune, de vert et de bleu), très compacte, couverte en surface par une couche d'altération. Cette couche d'altération est le produit de l'action conjuguée du soleil, de la pluie et des vents de sable. Ces phénomènes thermoclastiques sont à la base des fractures subverticales remplies de sable existant dans le sous-sol. Le vent apporte du sable qui est entraîné par les faibles pluies dans les fissures qu'il colmate.

Le climat

Le climat de la région d'In-Aménas se caractérise par une longue saison estivale sèche et chaude et une saison hivernale douce et plus ou moins pluvieuse. La valeur des précipitations est très faible et très variable d'année en année au point de vue quantité et répartition.

Les précipitations

La moyenne des précipitations annuelles déterminée pour la station d'In-Aménas pour la période 1975-1984 est de 29 millimètres. Dans cette région la notion de moyenne ne reflète guère la réalité à cause de la très grande variabilité de la quantité de pluie (Fig. 2). Les pluies tombent pendant 14 jours en moyenne pendant la période hivernale.

Les températures

Les températures moyennes sont comprises entre 10 et 32 degrés. La grande différence entre les températures moyennes de l'été et celles de l'hiver montre l'importance de la chaleur estivale (Fig. 3).

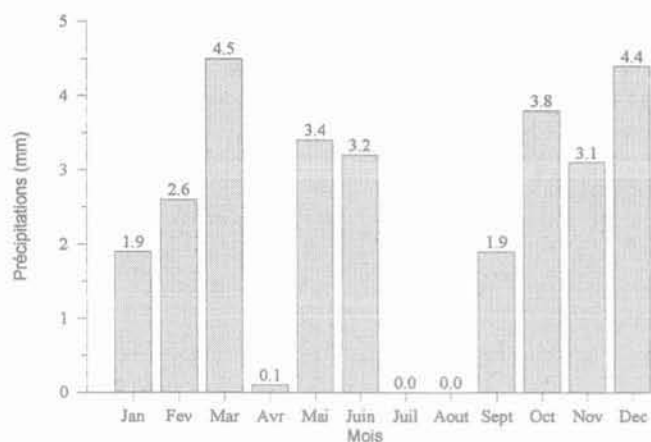


FIG. 2 Moyennes des précipitations mensuelles relevées à la station d'In-Aménas. Mean monthly precipitation recorded at In-Aménas meteorological station.

3.2.3

Les vents

Dans les régions arides, les vents jouent un rôle primordial dans la formation des reliefs, dans la dégradation de la végétation et de la destruction des sols (Halitim, 1984). Les vents du Sud sont généralement secs et froids en hiver et deviennent chauds et desséchants en été (Sirocco). On estime que le Sirocco sévit pendant environ 15 jours par an en créant des vents de sable. La direction, vitesse et fréquence des vents sont très variables au cours de l'année. Au Sahara, les vents font baisser le degré hygrométrique jusqu'à 20 % (Fig. 3).

3.2.4

La végétation

La végétation de la région est très éparse et de nature basse. Elle est constituée de groupements végétaux, du type steppique, azonaux et de peu d'espèces.

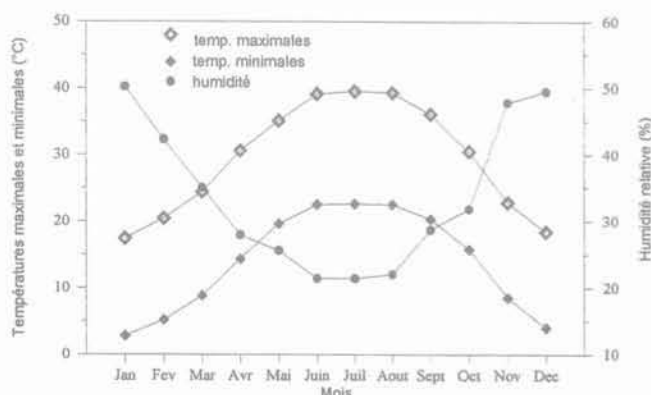


FIG. 3 Moyennes mensuelles des températures minimales et maximales sous abris, humidité relative. Mean monthly minimal and maximal temperatures under shelter and relative humidity.

3.2.5

Classification du climat

Afin de synthétiser les données météorologiques ci-dessus présentées, on utilise les indices climatiques suivants :

- *L'indice xérothermique* : il représente le nombre de jours biologiquement secs au cours de la période sèche. Il est calculé en retranchant du nombre de jours de la période sèche, le nombre de jours pluvieux ou supposés humides.

- *L'indice d'aridité de Martonnet* : il est donné par la relation $Ia = \frac{P}{T + 10}$ dans laquelle (P) est la pluviométrie annuelle en millimètres et (T) est la température annuelle moyenne en degrés Celsius.

- *Le diagramme ombrothermique* : il montre l'importance de la période sèche. Dans ce diagramme les températures sont portées à une échelle double de celle des précipitations ; un mois est considéré sec si la pluviométrie P (en millimètres) est inférieure ou égale au double de la température T (en degrés Celsius).

Le diagramme ombrothermique de la région d'In-Aménas (Fig. 4), indique que pour cette région, tous les mois de l'année sont secs. Par ailleurs, on trouve pour les indices climatiques :

- indice d'aridité (Ia) = 0,92

- indice xérothermique (Ix) = 365 - 14 = 351

Le diagramme ombrothermique et les indices xérothermique et de Martonnet sont indicatifs de l'hyperaridité de la région (Halitim, 1984).

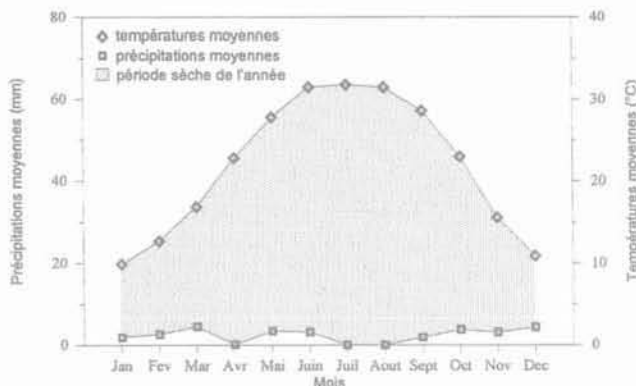


FIG. 4 Diagramme ombrothermique de la région d'In-Aménas. Ombrothermic diagram of In-Aménas region.

3.3

Hydrogéologie

Les sondages géotechniques, effectués à différents endroits de la région, jusqu'à une profondeur de 20 mètres n'ont pas mis en évidence la présence d'une nappe phréatique. Cependant, la ville d'In-Aménas est alimentée en eau potable à partir d'une source qui se trouve à 50 kilomètres de la ville. Les puits forés dans la région d'In-Aménas, à des profondeurs de 180 à 250 mètres, ont mis en évidence la présence d'une nappe souterraine profonde du type albien.

Les sols

3.4.1

Stratigraphie

De nombreuses études de sol ont été effectuées sur les sols d'In-Aménas pour le compte de compagnies nationales implantées dans la région. Ces études ont été réalisées par des laboratoires nationaux et étrangers dans le cadre de conception d'ouvrages ou dans le cadre d'expertises. La synthèse de ces études montre que les argiles de la région se présentent suivant une stratigraphie assez régulière et globalement homogène selon la succession de cinq couches :

- une couverture sableuse ou couche d'altération de quelques centimètres à quelques décimètres par endroits ;

- un horizon supérieur constitué de matériau limono-argileux de couleur rougeâtre (ARG.2). Cet horizon épais de 1,5 mètre en moyenne contient des mud-cracks. Par endroits, ce matériau présente une couleur violette (ARG.3). L'homogénéité de cet horizon en plan est interrompue seulement par de légères variations latérales. Il se présente par endroits plus riche en altérations jaunâtres et en argile ;

- un horizon argileux compact presque dépourvu de fractions sableuses. Cet horizon de couleur rougeâtre est légèrement plus sombre que la couche supérieure. Dans les tranchées, ce matériau se présente en petits blocs compacts séparés les uns des autres par de nombreuses fractures dont les faces sont ondulées et polies, ce qui témoigne de la grande surconsolidation de l'argile (ARG.1). On trouve dans cet horizon des lithotypes bariolés de vert clair parfois argileux parfois sableux se présentant sous forme de lentilles éparpillées ou en noyaux concentrés ou en étages discontinus ;

- un étage argileux verdâtre relativement mince qui apparaît dans les tranchées à une profondeur de 3 à 4 mètres pas toujours bien délimité aux bords (ARG.4) ;

- un horizon inférieur constitué d'argile limono-sableuse rougeâtre identique à l'horizon argileux compact mais visiblement moins compact et plus fracturé.

3.4.2

Minéralogie

Les analyses par diffraction aux rayons X de trois échantillons ont révélé que ces argiles sont à prédominance de kaolinite avec présence, en moindre importance, d'interstratifiés « illite-vermiculite » et de silice cristallisée en minéraux associés (Fig. 5).

3.4.3

Composition chimique des minéraux

Plusieurs échantillons d'argile ont fait l'objet d'une analyse chimique. Les résultats de ces analyses (tableau I) font ressortir la forte proportion de silice (> 50 %) comparée à celle de l'alumine (< 20 %). Ces proportions donnent aux échantillons de sol testé des rapports silice-alumine et silice-sesquioxides comparables à ceux des smectites (Caillière *et al.*, 1988).

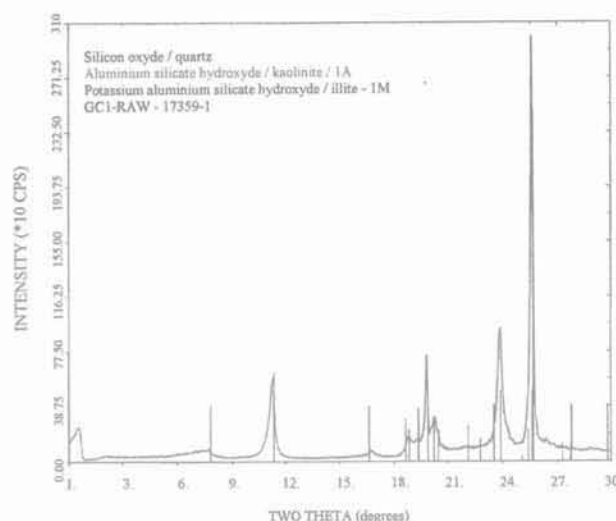


FIG. 5 Diffractogramme aux rayons X d'un échantillon de sol d'In-Aménas - Spectre complet et pics.

X-ray diffractogram of a sample of In-Aménas soil - Full spectrum and pics.

Ce résultat semble indiquer la présence, en proportion non négligeable, de minéraux argileux du type 2:1. Par ailleurs, la teneur en K_2O confirme la présence d'illite dans les argiles d'In-Aménas. On peut grossièrement estimer la proportion d'illite présente dans les sols d'In-Aménas à 10 à 40 %, cela en considérant qu'une illite pure pourrait contenir de 9 à 10 % de potasse.

TABLEAU I Composition chimique des minéraux. Chemical composition of minerals.

	ARG1	ARG2	ARG3	ARG4
SiO ₂	69	56,3	58,7	56,2
Al ₂ O ₃	12,69	15,12	19,32	20,44
Fe ₂ O	-	-	-	-
CaO	0,57	1,54	1,23	1,53
Fe ₂ O ₃	5,69	8,32	7,00	4,81
MgO	-	-	-	-
Na ₂ O	0,67	0,66	0,65	0,67
K ₂ O	1,8	2,8	1,3	2,4
TiO ₂	-	-	-	-
MnO	-	-	-	-
H ₂ O	6,81	9,88	9,5	10,8
SO ₃	-	-	-	-
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	9,21	6,31	5,15	4,66

D'autre part, la forte proportion enregistrée pour la silice souligne, comme il a été noté lors des analyses minéralogiques, la présence de silice en minéraux associés.

Analyse des eaux

3.5.1

Eaux brutes

Une analyse de l'eau provenant du puits de la raffinerie a donné les résultats consignés dans le tableau II. On remarque, d'après ces résultats que les eaux de la nappe sont fortement minéralisées puisqu'on y trouve plus de 1 600 milligrammes de sels par litre d'eau. On peut conclure par conséquent que les nappes de la région présentent un faciès chimique généralement chloruré sodique. Ce qui pourrait indiquer que les sols de la région sont des sols salins à complexe sodique.

TABLEAU II Composition chimique des eaux.
Chemical composition of waters.

Éléments	Eaux brutes	Eaux de rejet
Fe ²⁺	8,84 mg/l	-
Ca ²⁺	180	4,9
Mg ²⁺	129,6	5
CO ₃ ²⁻	0	-
HCO ₃ ⁻	207,4	-
SO ₄ ²⁻	Trace	-
Ba ²⁺	Absence	-
Cl ⁻	519,5	-
Na ⁺	585	4800
P ³⁻	-	18
K ⁻	-	50,5

3.5.2

Eaux de rejet

Parce que les eaux de rejet de l'usine de raffinage représentent la quasi-totalité des eaux d'infiltration du complexe, la composition chimique de ces eaux est analysée (tableau II). Il ressort des résultats trouvés que lors des traitements que subit l'eau brute dans les utilités il se produit dans l'eau une réduction des cations bivalents contre une augmentation considérable des cations monovalents en l'occurrence le sodium et l'apparition de nouveaux ions ; le potassium et le phosphore (élément dispersant) avec en même temps une augmentation nette de la quantité de sels dissous (près de 5 000 milligrammes/litre).

4

Caractéristiques géotechniques

Les caractéristiques géotechniques présentées dans cette section constituent une synthèse des résultats

d'un grand nombre d'études réalisées dans la région et du travail de Tas (1992).

Eu égard à l'aspect lithoïde des sols de la région, le carottage par voie sèche de ces sols est une opération difficile voire impossible à réaliser. De la même manière, le carottage par voie humide, utilisé dans la plupart des études réalisées, n'est pas adapté compte tenu de la nature expansive des sols. Par conséquent, on pense que les résultats donnés dans Tas (1992) sont relativement plus réalistes parce qu'ils représentent les caractéristiques d'échantillons intacts soigneusement taillés dans des blocs prélevés dans des tranchées et puits de reconnaissance. Il convient de souligner à ce niveau la difficulté rencontrée lors de la préparation des échantillons à cause de la grande dureté et de la friabilité des sols testés.

4.1

Caractéristiques physiques

Les analyses granulométriques ont révélé que les argiles testées présentent une grande prédominance de fines (de 25 à 60 %) et contiennent une quantité notable de limon et une proportion variable de sable fin.

La densité spécifique des grains solides a été trouvée égale à 2,75. La limite de liquidité varie de 30 à 85 %, l'indice de plasticité de 20 à 60 %. Les points représentatifs de ces paramètres sur l'abaque de plasticité de Casagrande (Fig. 6) se situent, à l'exception de quelques points au-dessus de la droite A. En effet, on trouve 20 % du total des points dans le domaine des argiles minérales de moyenne plasticité et un peu moins de 80 % des points dans celui des argiles de forte plasticité.

La teneur en eau naturelle des sols varie de 2 à 14 % avec la majorité des valeurs comprises entre 2 et 8 % (Fig. 7). La teneur en eau est très faible et a été trouvée pour beaucoup d'échantillons bien inférieure à la limite de retrait (comprise entre 6 et 14 %). Les grands écarts enregistrés entre la teneur en eau naturelle et la limite de liquidité démontrent l'état de surconsolidation poussé atteint par la dessiccation du sol. Ce constat est en accord avec les valeurs élevées enregistrées pour l'indice de compacité, supérieures à 1,5 pour la plupart, et pour la densité sèche supérieures à 2.

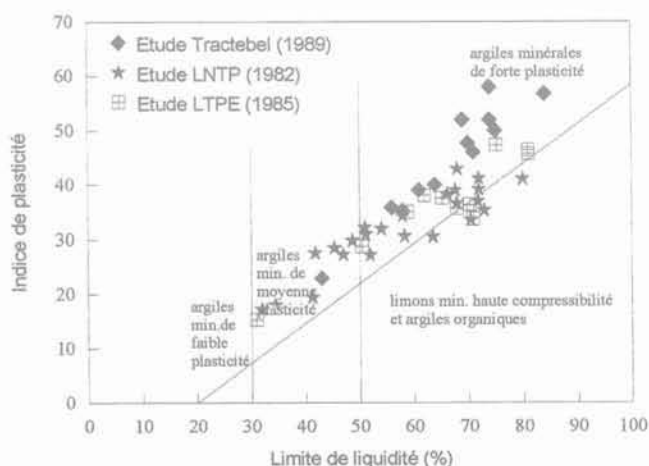


FIG. 6 Situation de sols testés sur l'abaque de plasticité de Casagrande.
Plasticity situation of studied soils on the Casagrande plasticity chart.

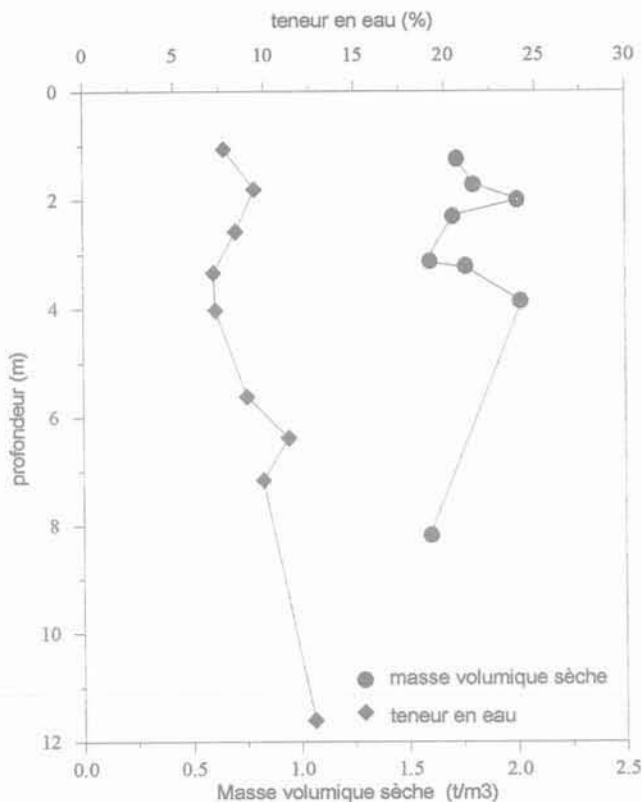


FIG. 7 Variation de la teneur en eau et de la densité du sol avec la profondeur.
Variation of water content and density of soil with depth.

4.2

Caractéristiques mécaniques

Un grand nombre d'essais pénétrométriques a été réalisé au moyen du pénétromètre dynamique léger DL030. La plupart des essais devaient commencer dans des forages au-dessous du niveau du sol, le refus ayant été obtenu après quelques centimètres. Le nombre élevé de coups enregistré témoigne de la grande compacité des terrains traversés. Il convient de souligner que seulement quelques essais ont pu atteindre la profondeur de 5 à 6 mètres.

La résistance à la compression a été mesurée sur des échantillons intacts prélevés entre les profondeurs de 1,5 et 19 mètres. Par endroits les valeurs enregistrées ont atteint des valeurs extrêmes de 3 000 voire même 5 000 kPa mais globalement on a trouvé des valeurs comprises entre 80 et 820 kPa.

Concernant l'activité au gonflement des sols testés, on montre dans la figure 8 que les points représentatifs des sols étudiés sur l'abaque de Van Der Merwe donnent un nuage dans le domaine d'activité allant de 0,6 à 1. Ce résultat confirme la présence d'illite en grande proportion dans ces sols. Les valeurs extrêmes de l'activité (valeurs supérieures à 2) indiqueraient que la présence de montmorillonite ou d'interstratifiés serait importante pour certains échantillons. De la même manière et conformément à la classification de Williams et Donaldson (1980), les sols d'In-Aménas présentent un pouvoir de gonflement très élevé.

Des essais de gonflement réalisés à l'œdomètre selon les normes A, B et C (ASTM/D. 4546) ont donné des

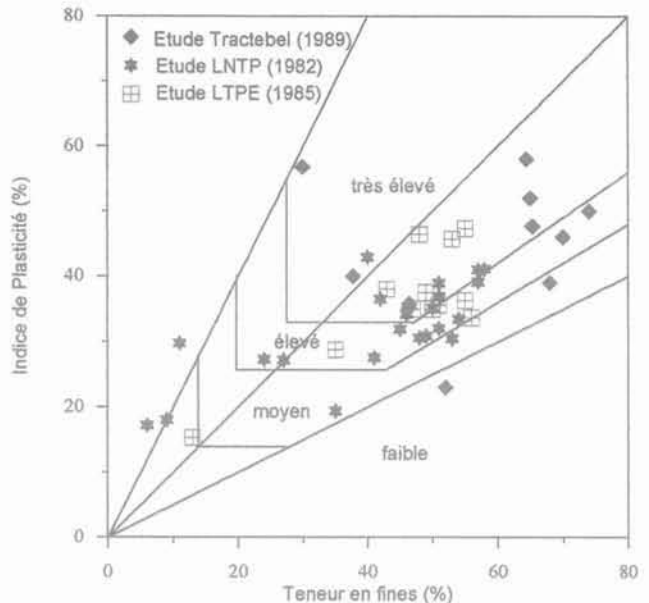


FIG. 8 Activité et potentiel de gonflement des sols d'In-Aménas sur l'abaque de Van Der Merwe (1964).
Activity and swell potential of In-Aménas soils after the Van Der Merwe chart (1964).

résultats qui ont confirmé le caractère potentiellement gonflant des sols d'In-Aménas (tableau III).

TABLEAU III Caractéristiques de gonflement de l'argile de la raffinerie.

Swell properties of a clay taken from the oil plant area.

Méthode d'essai	$\Delta e / e_0$ (%)	P_g (kPa)	e_0	e_f	γ_{ds} (kN/m ³)	γ_{df} (kN/m ³)
(A) Charge initiale 1 kPa	35,4	2850	0,305	0,767	21,01	15,15
(B) Charge initiale 201 kPa	11,4	3100	0,300	0,440	21,21	19,04
(C) Essai interrompu à 3800 kPa	-	3000	0,297	0,294	-	-

$\Delta e / e_0$ (%)
 P_g (kPa)
 e_0
 e_f
 γ_{ds} (kN/m³)
 γ_{df} (kN/m³)

Expansion relative de l'échantillon.
Pression de gonflement.
Indice des vides avant saturation.
Indice des vides à la fin de l'essai.
Densité sèche avant essai.
Densité sèche à la fin de l'essai.

5

Comportement des ouvrages dans la région d'In-Aménas

Antérieurement à la construction des ouvrages, les études géotechniques réalisées par différents organismes ont bien souligné le caractère particulièrement expansif des sols en place et avaient attiré l'attention du maître d'ouvrage sur le danger que pouvait représenter ce caractère pour les constructions. Ces études avaient en particulier recommandé :

- d'éviter impérativement les infiltrations d'eau à travers le sous-sol et cela en ayant recours notamment à :
 - l'étanchéisation des surfaces autour des installations sensibles par un revêtement fiable et un système de pentes ne permettant aucune accumulation d'eau,
 - l'éloignement des rejets d'eau de surface à 5 mètres au-delà de tout bâtiment ;
 - d'isoler le terrain naturel vis-à-vis du béton de fondation ;
 - de prévoir des vides sanitaires sous les bâtiments.

Bien que ces recommandations aient été plus ou moins mises en application sur le terrain, celles-ci n'ont pas empêché le gonflement des sols de la région de se manifester avec acuité mettant en danger la stabilité des structures en place.

5.1

Cas de la base résidentielle

La construction de cette base, dont la capacité d'accueil est de 1 300 personnes, a été effectuée en 1960. La base est constituée de modules préfabriqués standardisés. Le module est un élément en rez-de-chaussée projeté sur un vide sanitaire. La fondation est constituée d'une structure portante tubulaire en acier forgé dont l'appui est soudé à une platine qui repose, en appui libre, sur du gros béton coulé en pleine fouille. La fouille est remblayée par du sable.

Hormis quelques modules, légèrement affectés par la manifestation du gonflement, on peut dire généralement que le type de support retenu pour cette infrastructure s'est avéré assez fiable. En effet, les appuis étant totalement libres, sont capables d'absorber tous les déplacements possibles dans les sens vertical et horizontal. Il semblerait donc que, grâce à ses fondations souples, la base résidentielle continue à être exploitée sans problèmes majeurs jusqu'à nos jours.

5.2

Extension de la base résidentielle

5.2.1

Cas des 170 studios

La construction des studios a été réalisée en 1977. Ce sont des éléments à rez-de-chaussée sur vide sanitaire de 0,6 mètre. L'ossature est en portiques autostables, le plancher RDC est en dalle pleine, de 10 centimètres d'épaisseur et le plancher terrasse est en poutrelles et corps creux (16 + 4 cm). Les murs extérieurs sont en double cloisons de parpaings séparées par une lame d'air de 10 centimètres. Les fondations sont des semelles isolées ancrées à une profondeur de 1,5 mètre.

Pour ces studios, les désordres sont amorcés dès la réception. Ils progressent très vite et inexorablement jusqu'à la ruine totale des ouvrages et ceci malgré de multiples tentatives de confortement. Les désordres ont fait l'objet d'un suivi qualitatif rigoureux qui a permis d'établir la chronologie des événements ci-après.

1980 Réception des ouvrages. Apparition des premiers indices des désordres : microfissures à peine visibles sur les façades et les cloisons.

1981 Apparition d'importantes fuites par suite de gonflement au niveau des éléments du réseau d'assainissement.

Matérialisation nette des fissures sur les façades et cloisons : ouvertures de quelques centimètres.

Apparition de microfissures sur les portiques en béton armé.

Entreprise des premières actions préventives ; colmatage des fissures avancées et pose de témoins sur les portiques.

1982 Évolution rapide des fissures sur les panneaux de façades.

Matérialisation et ouverture des fissures sur les portiques.

Gonflement et gondolement apparents du sol d'emprise des studios.

Apparition d'un faux aplomb sur les façades.

1983 Évolution accélérée des désordres et mise en quarantaine d'un lot de 15 studios menaçant ruine.

1984 Ruine totale et déblayage d'un premier lot de studios et ce malgré les travaux de confortement répétés plusieurs fois au cours de chaque année depuis 1982.

1985 Ruine totale d'un second lot de 110 studios.

Les figures 9, 10 et 11 montrent un nombre de studios dans un état de dégradation très avancé. Sur les figures 8 et 10 on peut clairement observer des fissures de cisaillement diagonales ouvertes voire même béantes, qui démarrent des ouvertures, et des fissures horizontales de traction situées principalement en haut des murs périphériques. Ces désordres sont la conséquence d'un gonflement différentiel important probablement supérieur à 1/150 (Mouroux *et al.*, 1988) puisqu'ils ont mené par endroits jusqu'à la rupture des poteaux (Fig. 11) et à long terme à la ruine totale des studios.

Les effets du gonflement différentiel apparaissent aussi, et de manière claire, dans le gondolement de la surface du sol et les faux aplombs accusés par les parements des studios (Fig. 10). A cet effet, les photos montrent qu'aucune précaution n'a été prise pour la protection des accotements des studios (ni par pente, ni par trottoir étanche).



FIG. 9 Fissures diagonales de cisaillement dues à un gonflement différentiel à l'angle du studio.

Shear diagonal cracks due to differential heaving at the angle of the studio.



FIG. 10 Perte de verticalité des studios, provoquée par un gonflement différentiel du sol.
Loss of verticality of the studios due to a differential heaving of the soil.

Cette forme de désordres est compatible avec le mode de fondation des studios (Chen, 1984) : structure à un seul niveau fondée sur sols gonflants par semelles isolées.

En définitive, et malgré qu'il reste encore quelques studios dans un état de désordre très avancé, on peut conclure que cette première tentative d'extension des infrastructures de la région par la construction en dur n'aura pas été concluante.



FIG. 11 Rupture par compression d'un poteau d'angle.
Failure by compression of an angle column.

Cette expérience, qualifiée de malheureuse par le maître d'ouvrage, a incité les décideurs à recourir à d'autres choix.

5.2.2

Cas de la nouvelle base résidentielle

Les ouvrages de la nouvelle base résidentielle sont constitués d'éléments en rez-de-chaussée en surélévation de 0,8 mètre par rapport au niveau du sol extérieur. Ils s'étendent sur de grandes surfaces et s'articulent autour d'espaces verts. Ils sont fondés sur pieux dont la profondeur varie de 12 à 15 mètres. Le plancher technique est une structure souple en charpente métallique (Fig. 12). Les cloisons sont en panneaux de placo-plâtre.

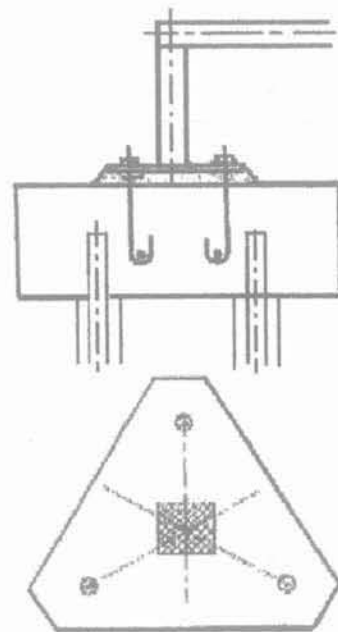


FIG. 12 Système de fondation de la nouvelle base résidentielle.
Foundation system of the new residential base.

La réception de la nouvelle base a été effectuée en 1986. Très vite après cette date on pouvait déjà facilement noter que les portes étaient bloquées, que les planchers techniques étaient sérieusement déformés et éventrés et que les fissures sur les cloisons étaient déjà importantes, en raison de l'arrosage des espaces verts périphériques.

Une étude diagnostic réalisée en 1989 a conclu à l'existence de pieux cisailés au niveau du bâtiment de réception. Cette étude avait recommandé de cesser impérativement l'arrosage des espaces verts jugé préjudiciable pour la tenue des bâtiments. A l'heure actuelle, mis à part les désagréments qu'ils occasionnent dans l'exploitation des lieux, les désordres enregistrés ne sont pas jugés encore critiques pour la stabilité des ouvrages. La performance relativement bonne de ces ouvrages est due au fait que le plancher en charpente métallique offre une grande flexibilité ce qui permet d'encaisser sans grands dommages les effets du gonflement.

Cas de la raffinerie

La raffinerie d'In-Aménas est implantée à l'ouest de la ville dans la zone industrielle. Elle est située à proximité du parc des réservoirs de stockage de brut de SONATRACH. Elle est constituée des principaux ensembles suivants :

- une unité de distillation atmosphérique ;
- une unité de traitement de kérosène ;
- des utilités (gaz, énergie électrique, air, vapeur...);
- une unité de stockage, transfert et chargement de produits finis ;
- des bâtiments annexes aux installations (salle de contrôle, laboratoires, maintenance, sécurité...).

La construction de la raffinerie s'est déroulée durant la période septembre 1976 et février 1980. Au stade de la construction, le gonflement ne s'était pas manifesté avec acuité. On avait quand même relevé l'apparition de quelques fissures sur les fondations des bacs de stockage (les galettes). L'exploitation de la raffinerie a été commencée en mars 1980. Ses unités sont maintenues en service, à une cadence de 4 mois par an, jusqu'à mai 1986. A cette cadence la raffinerie devait répondre aux besoins de consommation locale.

Très vite après le démarrage de l'exploitation les premiers indices de désordres sont apparus au niveau de la salle de contrôle et du laboratoire et puis se sont étendus aux unités et utilités (mai 1981). Très rapidement après les désordres ont affecté les superstructures et les équipements élancés (juin 1981).

Le cisaillement des ouvrages en béton est noté en 1982. Le cisaillement des boulons et le flambement des contreventements des superstructures sont relevés en 1983. Les déformations ; écarts de niveau, faux aplomb, ont progressé très vite atteignant des amplitudes qui pouvaient mettre en péril la stabilité des installations. En 1986 la raffinerie est mise à l'arrêt.

Globalement les désordres dus au gonflement des sols ont touché toutes les structures de la raffinerie. Dès leur amorce, ces désordres ont fait l'objet d'étude et de suivi. Des relevés périodiques de déformations et d'inclinaison des équipements principaux sont réalisés sur la période allant de 1981 à 1998. Parallèlement à ces relevés, des études diagnostics sont menées sur site, notamment en 1981-1982, en 1985 et 1988-1989 ainsi qu'en 1995-1996 et en 1998.

On analyse ci-après l'évolution des désordres des équipements majeurs, structures particulièrement sensibles aux déformations et dont la stabilité a été mise en péril par les effets du gonflement.

Ces ouvrages sont des structures élancées qui constituent l'équipement principal des unités de fabrication (four, colonne de fractionnement/stabilisation, stripper).

Ces équipements ont subi des écarts de verticalité importants. On donne dans la figure 13 l'évolution dans le temps des écarts de verticalité des colonnes DA101, DA102 et DA103. Si on compare les amplitudes des inclinaisons relevées à celles tolérées pour chaque ouvrage, on remarque que ces dernières sont atteintes et dépassées très vite après le démarrage de la raffinerie en 1981 et sont multipliées plusieurs fois les années d'après. Il convient de souligner à ce niveau que la direction des vents est dans le sens contraire des inclinaisons majeures enregistrées.

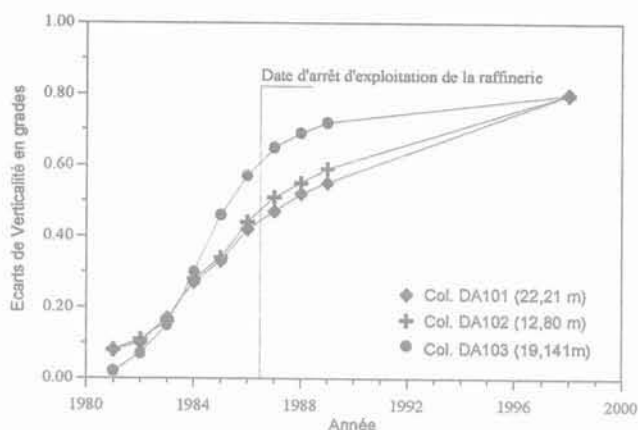


FIG. 13 Évolution dans le temps des écarts de verticalité des équipements élancés. Progression in time of the leaning of slender structures.

Par ailleurs, l'examen des courbes d'évolution permet de distinguer 3 branches dans l'avancement des inclinaisons. La première est dans la période 1981-1983 dans laquelle les déformations sont relativement lentes. Cette branche représente la phase d'amorce du processus de déformations. La seconde, qui va de 1983 à 1986, présente une pente très importante qui indique une grande accélération des déformations. La troisième branche apparaît durant la période 1986-1998. Elle présente une pente très faible ce qui exprime une diminution nette de la vitesse de déformations qui s'installe progressivement après l'arrêt d'exploitation de la raffinerie. Cette évolution des écarts d'inclinaison semble indiquer que les désordres de gonflement sont liés à l'exploitation même de la raffinerie. D'ailleurs ce constat pouvait être fait, qualitativement du moins, pendant les arrêts techniques pour la reconstitution des réserves de stockage. Pendant ces arrêts les déformations relevées restaient plus ou moins stationnaires.

Compte tenu de la nature consommatrice d'eau des installations, ce constat met naturellement le doigt sur une mauvaise performance des réseaux de collecte et de drainage de la raffinerie.

A cet effet, les multiples études diagnostics ont signalé bien des irrégularités observées sur les ouvrages de collecte et de drainage des eaux. Parmi ces irrégularités, certaines retiennent particulièrement l'attention :

- rupture des joints bitumineux n'associant plus la continuité de l'étanchéité des surfaces ;
- disparition du système de pente des dallages par suite des déformations et dénivellations de ces derniers ;
- position des puisards et avaloirs d'eaux résiduaire à des niveaux hauts ne leur permettant pas de remplir leur fonction correctement : recueillir les eaux de surface ;
- état défectueux et déformé des caniveaux.

Ces points représentent autant de raisons pour conclure que les réseaux de collecte et de drainage de la raffinerie n'ont pas fonctionné correctement. Une partie des eaux résiduaire de surface, sensée être canalisée vers le système de drainage construit à cet effet, a transité par les joints de dallage et s'est infiltrée dans les couches sous-jacentes du sol. La masse d'eau infiltrée a provoqué le gonflement des sols lequel gonflement a affecté les réseaux de drainage.

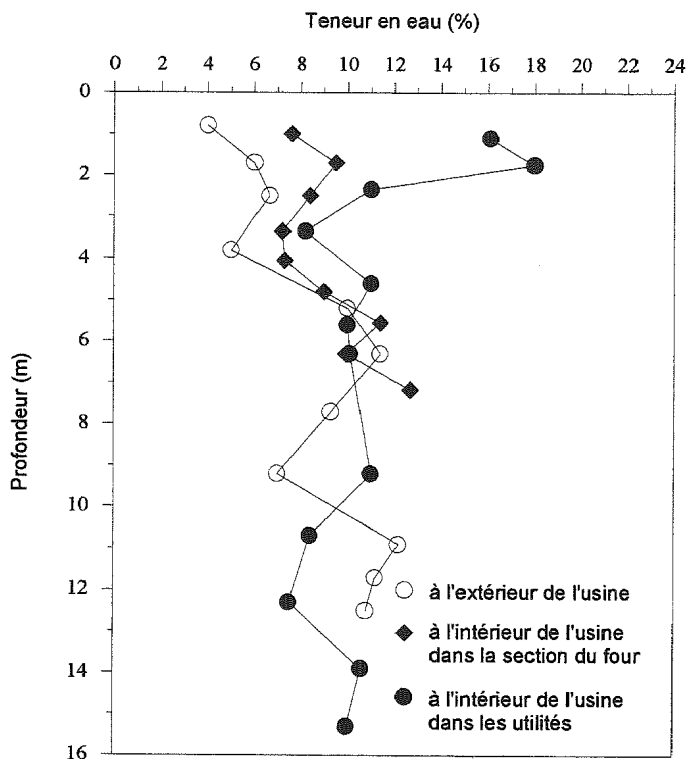


FIG. 14 Profils des teneurs en eau à des emplacements à l'intérieur et à l'extérieur de la raffinerie.
Moisture content profiles at locations inside and outside of the refinery.

A cet effet on peut remarquer sur la figure 14 que la présence de la raffinerie a provoqué une augmentation de la teneur en eau des sols jusqu'à une profondeur de 6 mètres. Cette augmentation de la teneur en eau est sensiblement plus importante à proximité des utilités où sont consommées eau et grande chaleur.

Les effets des désordres enregistrés en infrastructures se sont répercutés sur les superstructures et particulièrement sur les tuyauteries aériennes dans lesquelles il a été constaté :

- le désaxage des lignes dans les trois plans ;
- le fléchissement de la majorité des lignes ;
- le désaxage des brides et fuites de produits au niveau des jointures ;
- des fuites multiples au niveau des vannes de soupape.

6

Discussion. Recommandations

On a analysé dans les sections précédentes le comportement d'un certain nombre d'ouvrages, qui composent une infrastructure pétrolière, et qui sont implantés dans un milieu particulièrement défavorable. On a rapporté que tous les ouvrages ont subi des dégâts plus ou moins sérieux. Ces dégâts ont compromis la stabilité de certains équipements et ont mené d'autres jusqu'à la ruine totale. En général, les désordres sont amorcés dès la réception des ouvrages et ont évolué d'une manière anormalement rapide pour atteindre très vite des dimensions alarmantes. Ainsi, malgré les travaux de confortement répétés, une période de deux à trois années a suffi pour mettre en danger imminent les ouvrages.

Il convient de souligner que la conception de ces ouvrages a été effectuée d'une manière trop classique ; le caractère gonflant des sols n'a été pris en considération que dans la formulation des dispositions constructives (prévoir un vide sanitaire, éviter les infiltrations d'eau, prévoir un système de pentes...) étant entendu que la conception des ouvrages sur sols gonflants doit incorporer comme paramètre principal l'agressivité du milieu ou de l'environnement.

Si on analyse de près quelques particularités du milieu d'In-Aménas, on peut mettre en avant des justifications et causes logiques à la nature des événements qui s'y sont produits.

En effet, le milieu se caractérise par :

- un climat hyper-aride dans lequel les sols sont dans un état de dessiccation tellement poussé que l'apport d'une infime quantité d'eau peut libérer dans les sols une énergie qui peut développer des pressions faramineuses (supérieures à 3 MPa). Ce niveau de pression pourrait peut-être expliquer la gravité des dégâts enregistrés ;
- une topographie plate qui n'offre pas de possibilités de drainage naturel, ce qui complique considérablement la tâche de protection contre les infiltrations et accumulation d'eau. Ce problème est d'autant plus sérieux que les constructions en question sont consommatrices d'eau ;
- une composition chimique des eaux de rejet particulièrement défavorable. L'expérience a montré que les solutions hydratantes à cations monovalents (comme le sodium) provoquent un gonflement des sols plus important que celles à cations bi- ou trivalents (comme le calcium et le magnésium) (Derriche, 1994) ;
- des températures très importantes qui peuvent expliquer l'évolution rapide des déformations. Philipponnat, (1976) a montré que la consolidation des sols peut être accélérée par l'augmentation de la température. On est en droit de croire que ce phénomène est aussi valable pour le gonflement. En effet, la température diminue la viscosité de l'eau et augmente la perméabilité du sol ce qui se traduit par une accélération du processus d'absorption de l'eau et donc le gonflement.

L'expérience vécue à In-Aménas a démontré l'inefficacité des dispositions constructives classiques utilisées pour les sols gonflants.

On doit accepter que réaliser des canalisations parfaitement étanches et garantir une protection totale contre les infiltrations d'eau est une tâche impossible. Pour lutter contre les effets du gonflement, il faudrait plutôt recourir, et cela autant que possible, à des moyens qui permettent :

- d'isoler les fondations du contact direct avec le sol gonflant. Les pressions et déformations du sol se développent dans toutes les directions. Les fondations en contact avec le sol gonflant subissent des efforts de poussée et de soulèvement qui peuvent compromettre la stabilité de la structure et bien souvent même la stabilité interne de la fondation. On a bien noté le cisaillement de pieux dans quelques éléments de la nouvelle base résidentielle. La réalisation autour du pieu d'un manchon en matériau granulaire et le remblayage des fouilles des semelles par du sable fin peuvent permettre cette isolation ;
- de contrôler constamment l'état des réseaux de collecte et de drainage des eaux et d'intervenir lorsque la nécessité se fait sentir. Cela est faisable lorsque ces

ouvrages sont en aérien et sont démontables et renouvelables.

Parmi les ouvrages analysés, deux se sont distingués en montrant des performances relativement bonnes. Ce sont tous les deux des constructions à structure support métallique qui continuent à être exploitées quasi normalement jusqu'à nos jours. Ces constructions offrent une grande souplesse qui leur permet d'encaisser assez favorablement les déformations dues au gonflement. Le comportement de ces constructions, comparé à celui des ouvrages en béton armé, appelle une réflexion quant au type de structure viable dans la région.

Par ailleurs, il n'est pas exclu que les désordres enregistrés soient aussi le résultat d'une mauvaise performance du béton. La gravité des dégâts observés ; écroulement des studios, laisse supposer qu'il y a eu à bien des endroits dépassement de la limite de résistance du béton. La rupture par compression des poteaux en est un exemple.

A cet effet, il est important de signaler que les conditions d'In-Aménas sont aussi très défavorables pour l'exécution des ouvrages en béton armé. Compte tenu de l'éloignement de la région, le ciment est livré après de très longs voyages et parvient sur les lieux plus ou moins éventé.

Les températures élevées et le degré hygrométrique particulièrement bas provoquent un début de prise avant la mise en place du béton et aussi une évaporation de l'eau avant la fin de la prise du béton coulé. Dans ces conditions les limites de résistance théoriques ne sont jamais obtenues pratiquement (Alexanderson, 1973).

Ainsi l'impact de l'environnement agressif de la région affecte aussi bien les fondations que la qualité des bétons constituant la structure des constructions. A l'heure actuelle et au vu de l'expérience vécue, des recherches sont plus que nécessaires pour établir les normes et règles spécifiques pour la conception et la réalisation des ouvrages dans la région d'In-Aménas.

On pense que des études complétées par des analyses économiques devraient indiquer clairement s'il n'est pas plus avantageux pour la région d'opter pour des ossatures métalliques avec remplissage en panneaux légers à la place d'ossatures en béton armé et remplissage en maçonnerie.

Comme il convient de rappeler que les sites argileux et particulièrement ceux de la région d'In-Aménas sont des milieux très allergiques à la présence d'eau. Ces milieux se caractérisent notamment par une autorégulation dans leur environnement par un phénomène thermo-osmotique. Tout apport d'eau amorce dans ces milieux une activité dont les conséquences en surface ne peuvent qu'entraîner des désordres irréversibles mettant en péril les infrastructures construites sur ces sols.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à exprimer leurs remerciements à l'entreprise NAFTEC d'Alger pour avoir gracieusement mis à leur disposition la documentation relative à la raffinerie d'In-Aménas et assurent cette entreprise de leur profonde reconnaissance.

Bibliographie

- Alexanderson J. – « Strength loss in heat curing – causes and counter measures, behaviour of concrete under temperature extremes. » Amer. Concr. Inst. Sp. Publicn., 1973, n° 39, p. 91-107.
- Caillère S., Henin S. – La minéralogie des argiles. Masson, 1988.
- Chen F.H. – Foundations on expansive soils. Elsevier, 1988.
- Chen F.H., Huang D. – « Lateral expansion pressure on basement walls. » 7^e Conf. Int. Sols Expansifs, 1987.
- Derriche Z. – Influence du fluide hydratant sur le gonflement des argiles pures. 7^e Congrès international de l'AIGI, 1994, p. 437-443.
- Derriche Z., Kebaili M. – « Prédiction du gonflement des argiles d'In-Aménas. » *Bulletin de Liaison des LPC*, 1998, n° 218.
- Halitim A. – Soils des régions arides d'Algérie. Alger. Office des Publications Universitaires, 1984.
- Justo J.-L. – « Engineering geological aspects of foundations in swelling soils. » 5^e Congr. Int. de l'AIGI, 1986, p. 2209-2228.
- Jones D.E. Jr, Holtz W.G. – « Expansive soils – The hidden disaster. » *Civil Engineering*, vol. 43, n° 8, 1973, p. 49-51.
- Komornik A., Zeitlen J.G. – « Damage to structures on preconsolidated clays. » Proc. 7^e Conf. Int. de mec. des sols., 1969, vol. 1, p. 141-148.
- L.N.T.P. – Rapport d'étude géotechnique réalisée sur le site de la raffinerie par le laboratoire national des Travaux publics du Centre (Algérie), 1982.
- L.T.P.E. – Rapport d'étude géotechnique réalisée sur le site de la raffinerie par le Laboratoire des Travaux publics de l'Est (Algérie), 1985.
- Mouroux P., Margron P., Pinte J.-C. – La construction économique sur sols gonflants, *Manuels et Méthodes*, n° 14, BGGM.
- Parcevaux – « Étude microscopique et macroscopique du gonflement des sols argileux ». Thèse de Docteur-Ingénieur, École des mines de Paris, 1980.
- Philipponnat G. – « Désordres dus à la présence de sols gonflants dans la région parisienne. » *Annales de l'ITBTP*, n° 364, septembre 1978.
- Tas M. – « Influence des procédures expérimentales sur l'estimation en laboratoire des paramètres de gonflement des argiles expansives. » Thèse de Magister, École nationale polytechnique d'Alger, 1992.
- Tractebel – Rapport d'étude géotechnique d'expertise réalisée sur la raffinerie par l'entreprise Tractebel (Bruxelles, Belgique), 1989.
- Williams A.A.B., Donaldson G. – Building on expansive soils in South Africa. 4^e Conf. Int. Sols Expansifs, 1980, Denver, vol. 1.