

FONDATIONS EN MICROPIEUX EN SOLUTION DE CONSTRUCTION EN ZONES DE SEBKHA

Abderrahmane KOUIDRI*, Moustafa KEBAILI et Djemel BOUTOUAOU
¹ *Laboratoire d'Exploitation et Valorisation des Ressources Naturelles en Zones Arides,
 Faculté des Sciences Appliquées, Université Kasdi Merbah Ouargla, Ouargla 30000, Algérie*
 * E-mail : kouidriaer@yahoo.fr

ملخص: تتواجد مساحات شاسعة الأراضي جيدة الموقع الحضري لكنها خالية من المنشآت المدنية بسبب رداءة نوعية تربتها. ذلك هو مثال السبخة المتواجدة حاليا ضمن النسيج العمراني و كل أطراف الأحياء كواحة ورقلة. تشكل قرب الطبقة المائية و هشاشة تربة السبخة الموانع الرئيسية في وجه البناء وفق نظام الأساسات السائدة: أساسات سطحية و منعزلة. تمثل المصلحة العمرانية العنصر الأساسي للبحث عن حلول بديلة عن الوضع التقني المتردي. يكمن الجانب الأكبر من حل هذه المعضلة في نظم الأساسات. تقدم الدراسة الحالية حلا جيوتقني للمشكل المطروح. تقدم الأوتاد المصغرة المدكوكة كبديل عن الإجراءات المتداولة و المتمثلة في الحفر/الضخ/صب الخرسانة. تشير الدراسة علي وجه الخصوص إلي المزايا التقنية و ايجابيات الخل المقترح كما تقدم أرضية مشروع استعمال و تطبيق هذه الطريقة في الإنشاء.

كلمات دالة: سبخة، أساسات، أوتاد المصغرة، الدك، تربة مشبعة، ملوحة.

RÉSUMÉ : De bonnes étendues de terrains urbanistiquement bien situées sont dépourvues de constructions civiles pour cause de la mauvaise qualité de leurs sols. C'est l'exemple des Sebkhass largement rencontrées au sein et en périphéries de villes telles qu'Ouargla. La proximité de la nappe phréatique et la structure, plutôt fragile, des sols des Sebkhass sont les principaux handicaps face au système de fondation usuellement adopté (Semelles superficielles et isolées). L'intérêt urbanistique incite à chercher des alternatives techniques à cette entrave. Une bonne part de solution à ce problème réside dans les systèmes des fondations.

La présente étude propose une solution géotechnique au problème en question. Les micropieux battus sont désignés en substitution à la pratique classique consistant en triplet fouilles/pompage/coulage. L'intérêt et avantages techniques de cette façon de faire sont mis en relief. Un avant projet de vulgarisation est présenté

MOTS-CLÉS : Sebkhass, fondations, micropieux, battage, sol saturé, salinité.

ABSTRACT: Some large and well located areas are non urbanized because of the poor quality of their soils. This are the example of some Sebkhass sites widely found into and surrounding towns like Ouargla cities. The nearness of the water table and the fair soil structure are the main obstacles facing the current foundation system (Shallow and isolated footing). The urban interest, indeed, asks to look for technical solution. A main part of response is recognized to belong to the foundations system.

The present study proposes a technical issue to the problem question. The beaten micropile is proposed as substitution of the classical technique consisting of triplet excavations/pumping/casting the concrete. The technical advantages of this practice are highlighted. A preliminary draft of popularization is presented

Abstract text starts here.

KEYWORDS: Sebkhass, foundation, micropile, beaten, water-logged soil, salinity

I. Introduction

Les zones à sols gonflants ou affaissants, à terrains glissants, inondables ou à risque géotechnique quelconque sont reconnues difficilement urbanisables. La salinité intense et la fluctuation de la nappe dans les zones de Sebkhass constituent un exemple de tels problèmes.

L'alternative d'éviter les terrains de faibles qualité géotechnique n'est pas nécessairement la bonne solution. Des techniques d'amélioration de la qualité des sols ont été inventées et développées par les géotechniciens depuis plusieurs décennies. Celles-ci agissent sur les caractéristiques mécaniques considérées. Certaines de ces méthodes sont anciennes, telles que le battage de pieux en bois, d'autres sont plus récentes, telles l'injection, le pilonnage et la congélation. Ces nouvelles techniques constituent aujourd'hui, une part importante de l'étude géotechnique des sols et leur adaptation aux structures génie civil.

Comme la stabilité des structures génie civil doit inclure la vérification du système de fondations, la présente étude propose la substitution du système de fondation actuel, lequel a bien montré des défauts par un système de fondation sur un micropieu qui, du moins théoriquement, est prévu montrer des meilleurs. C'est un procédé adaptable aux zones de sebkha, lesquelles sont à l'heure actuelle évitées de la part de l'administration d'urbanisation. Si, en effet le système de fondation est prouvé efficace et fiable, l'urbanisation de telles zones serait permise car l'assise des structures sera justifiées.

L'étude en question porte sur la faisabilité du système des micropieux dans les terrains saturés et de faible portance. La profondeur de fichage des micropieux ne dépasse pas 3 à 4 mètres de profondeur. De tels terrains existent, en effet, dans quasiment toutes les villes des régions du centre et sud du pays, et même dans les régions côtières.

L'étude élaborée présente une solution géotechnique à la problématique en question. Elle fait indication de la technique de battage des micropieux en substitution à la pratique usuelle de fouille/pompage/coulage. Les avantages techniques de la technique proposée sont mis en relief.

II. Revue bibliographique

II.1. Introduction

Une sebkha se caractérise par des croûtes salines reposant sur un matériau limono-sableux. Les sédiments lacustres gypseux altérés en surface et des accumulations secondaires de gypse dans les sols forment les croûtes salines. La nature minéralogique et le taux de salinité de Sebkhas varient avec l'état hydrique lié aux fluctuations de la nappe phréatique.

L'évaporation des eaux superficielles de la Sebkha favorise la formation et la cumulation de sels. Durant la période chaude, des fissures de craquement apparaissent sur la croûte. Ces fissures se développent d'avantage sous l'effet des cycles chaleur/fraicheur entre jour et nuit. Les concentrations en chlorure dans les eaux des Sebkhas sont 3 à 4 fois plus élevées que celles des eaux de mer. Ceci traduit le grand pouvoir d'attaque du béton en infrastructure et des aciers.

D'un point de vue structural, les Sebkhas sont subdivisibles en deux familles :

- **Sebkhas continentales** : Leur formation est attribuée à la transgression de l'eau de mer il y a 300.000 ans. La composition des Sebkhas continentales est principalement du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), de la silice (SiO_2), de la calcite (CaCO_3) et du sel de table (NaCl).
- **Sebkhas côtières** : Il comprend les océans et les mers. Les principaux constituants de ces types de sebkhas sont l'aragonite, la calcite (CaCO_3), le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).

II.2. Dégradation du béton dans de la sebkha

Les solutions aqueuses de sels sulfatés présentes dans les sols des Sebkhas et eaux souterraines attaquent les bétons à base de ciments. La rapidité et la gravité de l'attaque dépendent entre autres de la quantité de sulfate dissout, de la présence d'eau, de la composition du ciment et de la perméabilité du béton. A mesure que progresse cette attaque, la pâte de ciment durcie perd sa résistance. Le processus se termine par la désagrégation du béton. Les éléments dissous dans le milieu environnant l'ouvrage pénètrent progressivement dans le béton. Certains d'entre eux sont agressifs, par exemple le dioxyde de carbone (CO_2), les acides et les chlorures [1].

Le choix des matériaux de construction doit tenir compte du niveau d'agressivité du milieu. De même, les dosages, les adjuvants et les procédés de mise en œuvre sont aussi des paramètres non indépendants de la nature du milieu environnant Utilisation de ciments qui résistent le mieux aux sulfates :

- ciments contenant peu d'aluminate tricalcique tels que le CPA-CEM I ES ou CPJ-CEM II/A et B ES (CEM I CRS ou HTS de l'ancienne norme).
 - ciments très chargés en laitier tels le CHF-CEM IIT/B, CLK-CEM III/C et CLCCEM V/A et B.
- Augmentation de l'enrobage et réduction du rapport E/C tout en gardant une teneur suffisante en ciment.

II.3. Techniques de réalisation sur sols de sebkhas

II.3.1. Méthodes basées sur le traitement du sol

Les problèmes, parmi tant d'autres, ci-dessus indiqués incitent à la recherche de solutions adéquates que ce soit pour la stabilité globale des structures génie civil ou pour le bon fonctionnement de celles-ci

En Arabie Saoudite, AL-Mhaidib (2002) [2] propose le traitement du sol de la Sebkha par additifs chimiques. Le traitement est effectué par incorporation et mélange du ciment et de chaux avec le sol de la sebkha. Sur la base de travaux de stabilisation réalisés sur la Sebkha de la zone Est de l'Arabie Saoudite formé d'un sol argilo-limoneux, l'effet de l'ajout de ciment a bien été constaté. Celui de l'ajout de gypse s'est avéré sommairement insignifiant. L'ajout de 10% du ciment conduit à une augmentation de l'indice CBR jusqu'à 04 fois. Par contre, l'ajout de la chaux semble absorber l'eau de la Sebkha devant servir au gâchage et prise de celle-ci. Notons qu'un ajout de 10% de ciment pour fin de stabilisation du sol est vachement élevé et ne constitue nullement un avantage économique.

La stabilisation des sols de la Sebkha a largement consisté en un chargement de ceux-ci, en particulier lorsqu'ils sont de nature argileuse. Des travaux de compression du sol effectués sur la Sebkha de la zone de Djizane en Arabie Saoudite [2] montrent une diminution de la compressibilité du terrain original. Le chargement a été effectué au biais de 03 couches de remblai d'un mètre chacune et pendant une année chacune. Au bout des 03 années de chargement, le sol a dû tasser de 20 centimètres tout en ayant bénéficié d'un gain de résistance au cisaillement et de portance. Cette façon de faire semble efficace et bon marché, cependant consommatrice de temps.

Les matériaux géotextiles sont en effet utilisables pour fin d'amélioration des qualités mécaniques. Des travaux menés sur des échantillons de sol de la Sebkha de Rais en Arabie Saoudite [2] montrent une augmentation de la portance de ceux-ci de plus de 2,5 fois lorsque traités aux géotextiles. La mise en œuvre sur site n'est cependant pas explicitée et semble relativement délicate à mener.

II.3.2. Type de fondations réalisées sur les sols de Sebkha

Dans la ville d'Ouargla (zone objet de la présente étude), la majorité des fondations pratiquées en zones de Sebkha sont superficielles, isolées ou filantes.

Les fondations isolées sont réalisées sur un sol reconstitué ou sur un socle en gros béton faiblement dosé. C'est une solution à résultat satisfaisant mais au coût relativement élevé au vu du volume de béton mis en place

En vue de l'amélioration de la capacité portante du sol support de semelles isolées, une initiative a été présentée par le bureau d'étude (BEL HADJE, 2005). Celle-ci consiste en la pose des semelles sur des caisses en béton armé préalablement réalisées. Ces derniers sont remplis par une couche de 20 cm de gravier et par la suite par une couche de gros béton jusqu'au niveau de la pose. La réalisation appliquée sur des bâtiments à usage d'habitation, a augmenté la capacité portante sous les semelles isolées à 5bars. Et compte tenu du volume de béton des caisses le long des fouilles et le volume du béton mise en place, cette variante ne peut être économique.

Dans la ville d'Ouargla les fondations à semelles filantes sont applicables pour les structures à caractère administratifs. Ce type de fondation affecte directement l'économie des projets réalisés et demandent des moyens matériels (machines de terrassement, pelles, chargeurs, motopompes,...) en sus du volume important de béton utilisé.

Le radier général est aussi réalisé dans la ville d'Ouargla à des structures hydrauliques comme les réservoirs d'eau et les puisards des stations de relevage des eaux usées. En Arabie Saoudite, ce type de fondation est adopté dans la majorité des structures fondées sur la Sebkha remblayée. Le radier général est reconnu non économique, car consomme une grande quantité de matériaux de construction et nécessite un volume important de terrassement.

III. Contexte géotechnique de la zone d'étude

En rappel les notions géotechniques générales désignées dans la présente étude, on retient :

La région d'Ouargla fait partie de la plateforme saharienne. Elle est caractérisée par :

- un climat aride et des périodes de sécheresse prolongées,
- un été chaud et sec, un hiver plutôt frais, une pluviométrie faible et irrégulière (moyenne de 37mm/an), une forte évaporation et des vents dominants de direction SW et NE,
- des terrains du Mio-Pliocène, seuls visibles en affleurement recouverts par endroits, par une faible épaisseur de dépôts du Quaternaire sous forme de dunes et de cordons d'Erg,
- une formation géologique appartenant à une région tectoniquement calme faisant partie du bassin sédimentaire du Sahara Nord-Est Septentrionale [3]. Les principales formations géologiques rencontrées sont :

Barrémien: constitué de grès et d'argiles, avec intercalations calcaro-dolomitiques. Il est capté à partir de 1500m.

Aptien: constitué de marnes dolomitiques, grises, vertes, brunes ou blanches et de dolomies cristallines avec une épaisseur inférieure à 50m.

Albien: constitué de grès, argiles et sables, avec une épaisseur variable de 417m à 432m. Les éléments détritiques y existent entre 70% à 90 %.

Cénomanién : constituée d'argiles dolomitiques et de marnes grises, avec parfois des argiles brune-rougeâtres ou gris-verdâtres. Son épaisseur varie de 60m à 80m. La série supérieure est formée d'une alternance d'argiles et de marnes dolomitiques grises, parfois d'argiles salifères, de bancs d'anhydrite et de quelques intercalations dolomitiques. Son épaisseur est de l'ordre de 70m.

Turonien : formé de calcaires poreux blancs parfois grisâtres, pulvérulents, de calcaire beige dolomitique et de calcaire fin légèrement dolomitique. Son épaisseur est de l'ordre de 70m.

Sénonien lagunaire: constitué d'une alternance irrégulière de bancs d'anhydrite, de dolomies, d'argiles et de sels. Son épaisseur varie de 120m à 250m.

Sénonien carbonaté: calcaire blanc, tendre à moyennement dure, parfois crayeux à vacuolaire et passées de marne grise tendre à pâteuse dolomitique. Son épaisseur est de l'ordre de 200m

Sénono-Eocène: formé essentiellement de carbonates et de calcaires dolomitiques cristallins ou micro-cristallins parfois vacuolaires ou crayeux ou plutôt argileux ayant une épaisseur comprise entre 150m et 200 m.

Mio-Pliocène: puissant ensemble de sables et d'argiles qui s'étend sur tout le Sahara et reposant en discordance sur le Sénono-Eocène. Son épaisseur varie de 10m à 30m.

Quaternaire: constitué de dépôts sableux et sablo-argileux ayant une épaisseur d'environ 10m à 20m. Il constitue un niveau aquifère renfermant une nappe phréatique.

- un hydrologique dont le bassin sédimentaire du Sahara Nord-Est Septentrional renferme une série de couches aquifères regroupées en deux ensembles [4]:

Le Continental intercalaire : système aquifère multicouche dont la profondeur atteint localement 2000m et dont la puissance varie entre 200m et 400m. La salinité des eaux de ce réservoir est croissante du haut vers le bas. Le faciès chimique est sulfaté-magnésien. La température des eaux est de 47°C à 55°C, le pH de 7,4 à 7,7 et le résidu sec de 1,8g/l à 2,5g/l.

Le complexe Terminal: renferment deux aquifères qui du haut en bas sont:

*La nappe du Mio-pliocène : contenue dans les sables grossiers atteints vers 30m à 60 m de profondeur. La teneur en sel est d'environ 2g/l à 3g/l.

*La nappe du Sénonien : nappe artésienne exploitée dans les calcaires entre 140m et 200m de profondeur. Le résidu sec y varie entre 2,5g/l et 3,6g/l.

Les eaux du complexe terminal présentent un faciès chloruré-sodique dont la température varie de 23°C à 26°C et le pH de 7,3 à 7,9.

- Une nappe phréatique, rencontrée au premier rang au-dessous du terrain, surmonte le Continental Terminal et se trouve dans les sables fins à moyens gypseux de perméabilité

variable de $5,6 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ à $1,27 \times 10^{-3} \text{cm/s}$. Le résidu sec est compris entre 32g/l et 60g/l au Nord de la cuvette d'Ouargla, entre 8g/l à 16g/l sur l'axe Ouargla-Rouissat, et de 200g/l à 300g/l dans les Chotts et les Sebkhas [5]. L'alimentation de cette nappe s'effectue par déversement des eaux d'irrigation des palmeraies, des rejets d'eaux usées d'origine domestique, des eaux de ruissellement gravitaires et des apports de crues des trois oueds dans la cuvette (Oued N'SA, Oued M'ZAB et Oued MYA).

- Les niveaux piézométriques des eaux de la nappe phréatique sont constatés stables dans le temps, d'une année à l'autre. Les variations journalières du niveau piézométrique dans la cuvette d'Ouargla, sont liées aux variations des débits des eaux de drainage [6].
- Les caractéristiques physiques, et mécaniques des sols des Sebkhas de la cuvette d'Ouargla sont faibles près de la surface, mais devient visiblement bons à partir de la profondeur 2,5m [6].

IV. Fondations sur micropieux

IV.1. Technologique des fondations sur micropieux

Les fondations sur micropieux sont utilisables dans la réalisation de nouveaux ouvrages et dans le renforcement des ceux existants. Leur intérêt technique consiste, entre autre, dans la facilité de l'installation, en particulier dans les sites à accès difficile. Les micropieux sont définis de façons plus ou moins comparables selon les normes en vigueur :

Selon le document technique unifié (D.T.U. 13-2 / Additif, 1991), les micropieux sont définis comme étant des pieux ayant un diamètre inférieur à 250mm. Les micropieux y sont classés en 4 types, selon leur mode de mise en place.

Selon la norme européenne (CEN TC 288, 2002), un micropieu est tout pieu ayant un diamètre extérieur inférieur à 300 mm pour les pieux mis en place sans refoulement du sol, et un diamètre extérieur inférieur à 150 mm pour les pieux mis en place avec refoulement du sol. Cette norme donne une classification informative sur les méthodes de mise en place des micropieux, distinguant deux catégories principales : les micropieux foncés et les micropieux forés. Cette distinction est comparable à celle des pieux refoulant (foncés) ou non refoulant (forés).

IV.2. Présentation de la variante envisagée

Le choix du type de fondation dépend principalement des charges apportées par la structure et des caractéristiques mécaniques. La reconnaissance du sol de fondation s'effectue jusqu'à atteindre, et dépasser légèrement, les couches où les contraintes appliquées par les fondations se dissipent ou deviennent faibles comparativement aux performances du sol. Lorsque le pieu ou le micropieu traverse des couches de portance relativement faible pour atteindre une couche de bonne qualité mécanique, cette dernière est dite couche d'ancrage ou substratum résistant. Le D.T.U. 13-2 (Additif, 1991) recommande l'adoption de la technique de fonçage des micropieux si le sol présente une consistance meuble. La recommandation du D.T.U. 13-2 semble parfaitement coïncider avec la nature des terrains rencontrés dans les Sebkhas. Dans la région d'Ouargla, une couche de sable lâche saturé d'épaisseur 2m est rencontrée. Celle-ci surmonte le substratum sableux grésifié à graveleux dépassant 6m.

Les pieux (ou micropieux) foncés peuvent être réalisés par battage ou par vibrofonçage. En général, le fonçage des pieux s'effectue par battage dans les sols cohérents et par vibrofonçage dans les sols granulaires

Le battage des pieux consiste à faire tomber une masse appelée mouton sur la tête du pieu dans l'objectif de faire enfoncer ce dernier tout en assurant sa verticalité.

Le vibrofonçage consiste à appliquer une vibration verticale en tête du pieu afin de l'enfoncer dans le sol.

Le tableau 1 souligne les aspects les plus distinctifs de la technique de vibrofonçage des pieux par rapport au battage.

Tableau 1 : Aspects comparatifs entre les des deux méthodes vibrofonçage et battage

Critère		Vibrofonçage	Battage
Technologique		<ul style="list-style-type: none"> - Economie en énergie - Rapidité de mise en œuvre - Indiqué dans les terrains sableux et les terrains alluvionnaires - Soumet l'acier ou le matériau constitutif du pieu à des contraintes inférieures à sa limite élastique 	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôle moins rigoureux de la portance lors de la mise en place d'éléments porteurs - Performant si le terrain présente une forte résistance au poinçonnement.
Nature du terrain	favorable	<ul style="list-style-type: none"> - Sols composés de sable à grains arrondis et de graviers - Sols mous - Sols humides, immergés ou complètement saturés. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sols meubles tels que vases et tourbes - Dépôts lâches de sables grossiers ou moyens - Graviers sans inclusions rocheuses - Généralement les sols humides, immergés ou complètement saturés
	défavorable	<ul style="list-style-type: none"> - matériaux à grains anguleux - sols compacts - sols secs - sous-sols granulaires préalablement compactés par les vibrations 	<ul style="list-style-type: none"> - dépôts denses de sables fins, moyens ou grossiers - argiles dures et couches rocheuses tendres à moyennes

La distinction entre le domaine d'utilisation du vibrofonçage et le domaine d'utilisation du battage est difficile à faire, notamment parce que ces domaines sont proches et ont parfois des caractéristiques communes. Pour le cas de la Sebkhah, les caractéristiques mécaniques et la nature du sol favorise l'utilisation de la technique vibrofonçage.

IV.3. Evaluation de la portance des micropieux par rapport au sol de la Sebkhah de Ouargla

IV.3.1. Caractéristiques géotechniques du sol de la zone étudiée

Des résultats d'essais au pénétromètre dynamique réalisé par le laboratoire des Travaux Publics du Sud (LTPS) et par le Laboratoire d'Etude et Contrôle des matériaux (LEC) ont été recueillis dans le but d'évaluer la portance des micropieux dans la zone d'étude. Les résultats des pénétromètres dynamiques sur trois (04) sites dans la Sebkhah sont présents dans la figure 1.

L'examen analytique des résultats des essais pénétrométriques montrent :

- que la résistance est relativement faible près de la surface mais devient élevée aussitôt franchis les deux premiers mètres.
- Les couches représentatives d'un même site sont comparable dans la forme et sensiblement distincts des autres sites.

Les projections des résultats pénétrométriques sur les faciès surfaciques trouvés au bas des sondages carottés, et des fouilles montrent que :

- la résistance de pointe dynamique dans les formations de sable de dune, beige fin à moyen gypseux, varie de 8bars (à 0,5m) à 112bars (à 60m) comme valeur maximum.
- au-delà de 3m de profondeur, la résistance de pointe dynamique dépasse 150bars. Le sol est formé de sable rouge graveleux et de blocs de pierre compacte.

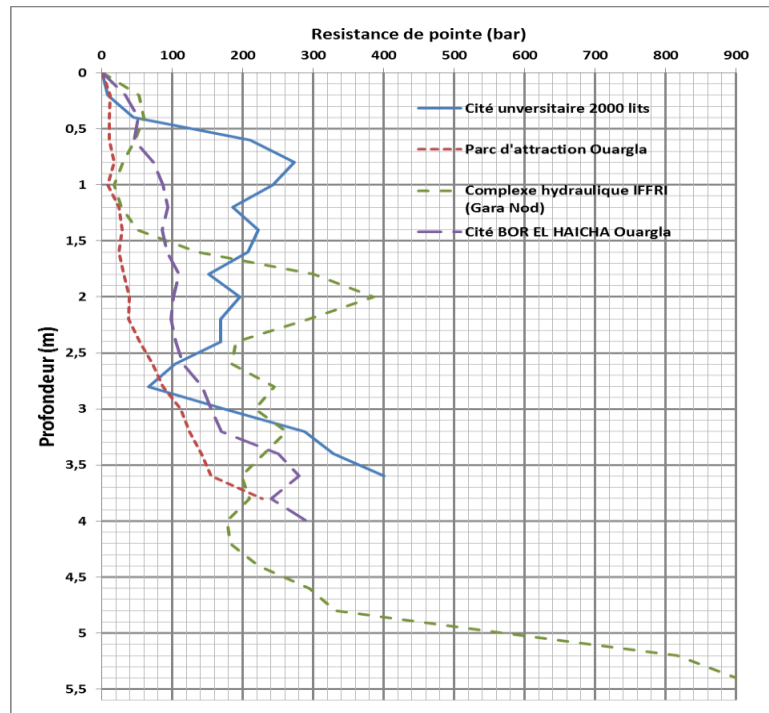


Figure 1 : Graphes des pénétromètres dynamiques

Par ailleurs, des essais de laboratoire ont été effectués par le LTPS et le LEC. Les résultats des travaux réalisés sont indiqués dans le tableau 2

Tableau 2 : Résultats d’essais de laboratoire

Désignations		Profondeur (m)		
		0-1	2 -5	5-10
Masse volumique sèche (t/m ³)		1,21-1,47	1,27-148	1,28-1,48
Teneur en eau (%)		14-34	17-28	15-24
Caractéristiques de résistance au cisaillement	φ (°)	30-34	29-35	-
	C (bar)	0-0,22	0-0,26	0-0,11
Composition chimique (%)	Insolubles	35-62	4-24	77-97
	Sulfates	20-42	54-80	11-20
	Carbonates	0,5-8	2,5-8	1

IV.3.2. Evaluation de la portance des micropieux

Selon le projet Eurocode 7-1 (2001), la capacité portante des pieux est vérifiée dans seulement l’ELU. L’ELS est considérée dans l’estimation des déplacements probables.

La vérification vis à vis des états limites ultimes est faite par rapport à la charge limite (Q_u) et celle vis à vis des états limites de service en est par rapport à la charge critique de fluage (Q_f). L’évaluation des valeurs de Q_u et Q_f est évaluée sur la base de la courbe de l’essai de pénétromètre dynamique (figure 2). Les combinaisons d’action à prendre en charges pour le cas des micropieux réalisés dans la Sebkhha de la région d’Ouargla (sismicité nulle selon le RPA 2003) sont celles fondamentales et quasi-permanentes.

Selon le fascicule 62 titre V

A l’état limite ultime (ELU) **-23,60t ≤ Q ≤ 416,60t**

A l’état limite de service (ELS) **-16,5t ≤ Q ≤ 291,60t**

Selon l’Eurocode 7-1 **-26,4t ≤ Q ≤ 530,18t**

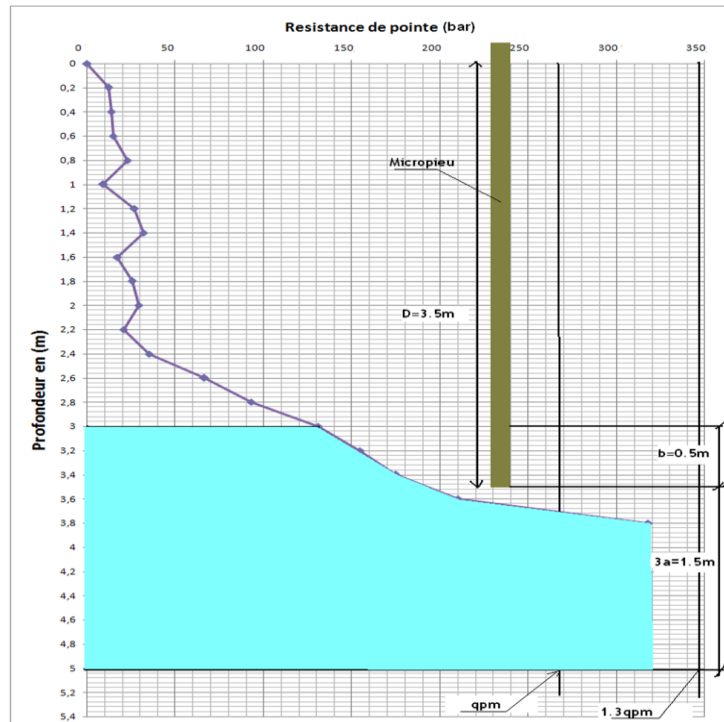


Figure 2 : Calcul de la portance d'un micropieu à partir des résultats pénétrométrique dynamiques

V. Avant-projet de vulgarisation de la technique

V.1. Justification du choix des micropieux vibrofoncés

Les micropieux vibrofoncés disposent d'avantages technologiques opportuns pour les zones de Sebkhah. A défaut d'un prototype permettent l'acquisition de résultats réels et en vraie grandeur, les aspects ci-dessous sont soulignés. Ils sont mis en relief à titre de rappel, d'autant plus qu'ils sont exposés dans la bibliographie :

- Préparation soignée des micropieux dans un atelier de préfabrication, ce qui souligne la qualité du produit et un gain le temps,
- Mesure de la résistance des micropieux lors du fonçage. Ceci justifie pleinement le résultat requis,
- Opération de mise en œuvre non désavantagée par existence de la nappe.

V.2. Portance du sol

Le calcul de capacité portante du sol fait intervenir conjointement :

- les caractéristiques géotechniques du sol,
- le type et forme des fondations adoptées,
- les dimensions des fondations,
- le type de charges à supporter.

Sur la base des prospections géotechniques menées sur les sebkhas de la région d'Ouargla (chapitre III), et compte tenu des dimensions proposées et vérifiées des micropieux, la capacité portante du micropieu vibrofoncée est estimée d'au moins 900kN. Cette portance du micropieu peut convenir à des structures de moyenne importance telles que celles généralement réalisées dans la région.

V.3. Faisabilité technico-économique des micropieux vibrofoncés

V.3.1. Estimation financière des micropieux vibrofoncés

Dans la présente section l'étude technico-économique des micropieux préfabriqués en béton armé battus par vibrofonçage sur un terrain en Sebkhha est effectuée. Celles-ci sont comparées à des fondations en semelles isolées sur caissons en béton cyclopéen.

Les travaux de fabrication et de battage des micropieux sont évalués par comparaison à des travaux similaires de préfabrication de buses et de battage de palplanches. Sur le tableau 3 est montré un devis comparatif entre deux techniques de réalisation de fondation : la technique classique de fondation en semelle isolée sur sol reconstitué, et la technique de fondation sur micropieu.

Tableau 3 : Devis comparatif

Type de fondation	Montant en Hors Taxe (DA)
Fondation en semelle isolé	5 694 000,00
Fondation en micropieux	6 251 000,00

L'étude comparative des devis de réalisation entre le système de fondations classiques (semelles isolés) et le système des micropieux préfabriqués en béton armé battus par vibrofonçage sur un terrain de Sebkhha, montre que le montant du premier est supérieur de 1.1% par rapport au second. Le prix de revient d'un système de fondation sur micropieu est, de ce fait, comparable à celui usuel. L'avantage du micropieu est mis en relief sur les pans délais d'exécution et portance.

V.3.2. Avantages et inconvénients de la technique de la solution des micropieux

Les principaux avantages et inconvénients des deux techniques de fondations (isolées en béton en cyclopéens et micropieux) sont présentés sur le tableau 4.

Tableau 4 : Avantages et inconvénients des techniques comparées.

Micropieux en béton armé préfabriqué	Semelles isolées sur caissons en béton cyclopéen
Avantages	
<ul style="list-style-type: none"> - Réparation des micropieux avant mise en œuvre sur site, - Fonçage non pénalisé par existence de la nappe, - Faible variation de la poussée d'Archimède liée aux fluctuations de la nappe phréatique, - Fonçage au profil de la compacité du sol, - Assurance d'une résistance suffisante, - Disponibilité des espaces entre axes, ce qui permet une meilleure ouvrabilité et confort pour la réalisation des divers réseaux, - Gain de temps à raison de 20mn à 30 mn de fonçage par micropieu, les délais d'exécution sont bien réduits, - Gain en espace sur chantier - Encouragement de services annexes : Préfabrication, transport et manutention, vente de béton frais..... 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas des moyens matériels spécifiques ni main d'œuvre qualifiée.

Inconvénients	
<ul style="list-style-type: none"> - Moyens matériels spécifiques(en particulier appareillage de fonçage) et main d'œuvre qualifiée, - Manque d'usines de préfabrication dans la région. 	<ul style="list-style-type: none"> - Grande quantité de matériaux de construction, - Conditions difficiles de coulage des semelles sur place, surtout en présence de la nappe, - Pompage continu des eaux de la nappe dans les fouilles de fondation, - Instabilité des tranchées de fondations ce qui requiert des blindages en profondeur, - Grand terrassements, - Grande probabilité de tassement dans le temps, - Encombrement de déplacement et de circulation à l'intérieur du chantier vu le volume important des terrassements.

V.3.3. Exécution des micropieux vibrofonçés

a) *Manutention et protection de la tête et la pointe du micropieu*

Lors de la manutention des pieux, les contraintes admises pour le béton et les aciers prévues dans le calcul doivent être respectées. Pendant le battage, la tête des pieux préfabriqués est protégée d'une coiffe métallique avec intercalation d'une pièce en bois dur (figure 3) :

- le sabot est une pointe en d'acier ou en fonte facilitant la pénétration du pieu dans le sol,
- le corps du pieu est de section carrée, polygonale ou circulaire,
- la tête du pieu est réalisée en béton fretté pour résister au battage. Elle est souvent surmontée d'un casque de battage évitant sa détérioration.

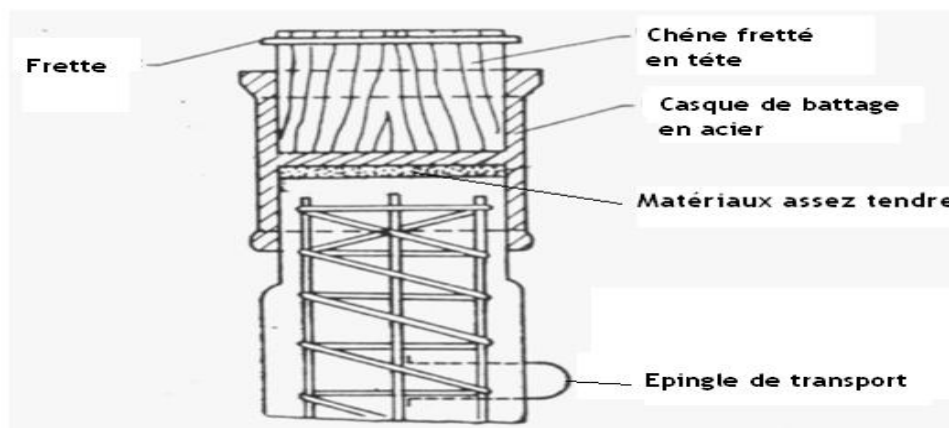


Figure 3 : Composants du micropieu en zone de battage

b) *Rallongement des micropieux*

S'il s'avère après le battage d'un pieu, que celui-ci doit être ancré à une profondeur encore supérieure (comparativement à la longueur théorique initiale), le pieu est rallongé dans sa partie supérieure jusqu'au niveau des chainages. La tête du pieu est décapée sur une hauteur équivalente à celle de chevauchement des armatures. Des éléments supplémentaires sont reliés aux armatures existantes préalablement mises à nu. Le béton présentant une résistance caractéristique identique à celle du pieu est mis en œuvre et est vibré avec soin à l'aide d'un appareillage approprié.

A chaque battage de pieu, un diagramme de battage est établi. Ces derniers font objet d'une étude comparative. En cas de distinctions apparentes sur les diagrammes de battage, des vérifications sont réalisées sur les pieux soupçonnés.

c) Reçage des micropieux

L'élimination, sur une certaine hauteur, de la partie supérieure d'un pieu en béton, est toujours nécessaire. La hauteur minimale de reçage est imposée par la cote d'arase du plan de béton armé. Les têtes des pieux sont reçées jusqu'à 5 cm au-dessus du niveau d'assise de la liaison avec la semelle de fondation ou la longrine. Les armatures sont mises à nu sur une longueur d'ancrage suffisante pour assurer une liaison efficace.

d) Liaison entre micropieux et superstructure.

Les éléments qui assurent la liaison entre les fondations profondes et la superstructure en béton armé sont (figure 4) :

- les têtes de micropieux : ce sont des massifs en béton armé permettant le respect de l'exécution. C'est généralement un rattrapage de décalage entre le poteau et le pieu.
- les longrines : ce sont des poutres en béton armé comparables à des semelles filantes. Elles supportent les charges transmises par les voiles, les murs en maçonnerie et les poteaux, et les reportent sur les pieux.

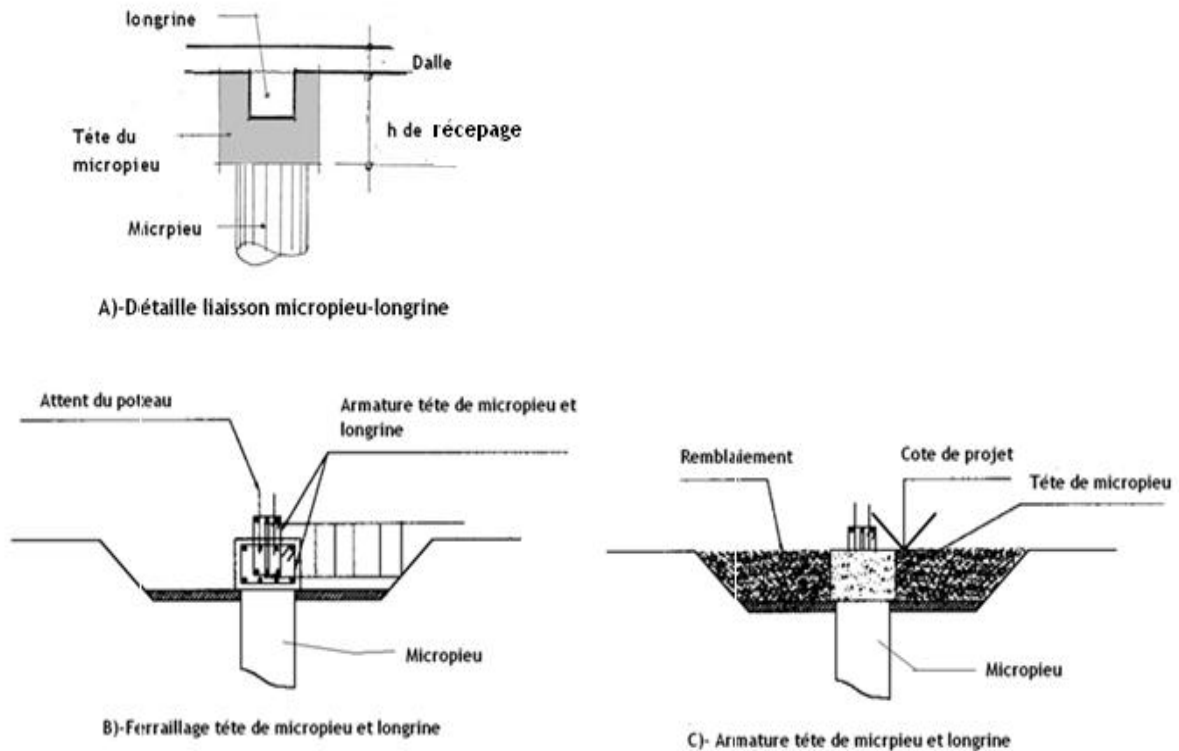


Figure 4 : Liaison tête de micropieu / longrines.

VI. Conclusion générale

Les micropieux sont de ce fait jugés pratiques de par leur commodité de mise en œuvre :

- utilisation dans des sites difficilement accessibles,
- restriction de l'élargissement de la fondation existante,
- grande capacité portante en compression et en traction.

La présente étude vise, entre autres, à inviter les instances techniques à considérer la faisabilité de la technique proposée. Ce, dans l'objectif stratégique d'exploitation des espaces de Sebkhha se trouvant aux alentours des villes.

L'impact économique issu de l'utilisation d'une telle technique (après approbation) est reconnu intéressant. D'autres contributions scientifiques et techniques sont nécessaires pour fin d'optimisation de la technique en question.

Références

- [1] Baron et Jean-Pierre Ollivier ; La durabilité des bétons. Presses des Ponts et Chaussées, Paris, France, ISBN 2-85978-184-6, 453p (1992).
- [2] ABDULLAH I. AL-MHAIDIB ; 'Sol de Sebka dans le royaume de l'Arabie Saoudite : Caractéristiques et traitement' ; Journal du département de génie civil, université Rahadh Arabie Saoudite J14, série 2, pp 29-80 (2002).
- [3] FABRE J. ; Introduction à la géologie du Sahara algérien ; SNED, Alger, Algérie, 422p (1976).
- [4] OSS ; Système Aquifère du Sahara Septentrional : De la concertation à la gestion commune d'un bassin aquifère transfrontière ; Projet SASS. Rapport interne. Tunis, Tunisie, 58p (2002).
- [5] NEZLI I.E., ACHOUR S. et DJABRI L. ; 'Approche géochimique des processus d'acquisition de la salinité des eaux de la nappe phréatique de la basse vallée de l'oued m'ya (Ouargla)' ; Laboratoire de recherche en hydraulique souterraine et de surface d'Université de Biskra, Journal LARHYSS, ISSN 1112-3680, n° 03, Décembre 2007, pp.121-134 (2007).
- [6] ANRH ; 'Inventaire des forages et enquête sur les débits extraits de la Wilaya de Ouargla' ; Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), Ouargla, Algérie (2002).