

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Aboubekr Belkaid Tlemcen
Faculté de Technologie
Département de Génie Civil



Mémoire pour l'Obtention du Diplôme
de Master en Génie Civil
Spécialité : Infrastructure de base et géotechnique
Option : Travaux Publics

Thème :

CORRELATIONS DES PARAMETRES DES SOLS COMPACTES

Présenté le 14 Juin 2016 par :

Mlle MECIFI Fayza

Devant le Jury composé de :

Mme BENADLA Z.
Mme ROUISSAT N.
Mlle AYAD F.
Mme BENCHOUK A.
Mr ABOU-BEKR N.

Présidente
Examinatrice
Examinatrice
Encadreur
Encadreur

Remerciements

Avant tout, je remercie Dieu le tout puissant qui m'a aidé et donné la volonté et le courage d'entamer et de terminer ce mémoire.

Ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mme BENCHOUK Assia et Mr ABOU-BEKR Nabil, je les remercie pour la qualité de leur encadrement exceptionnel, pour leur patience, leur rigueur, leur disponibilité, leurs conseils éclairés et les encouragements durant ma préparation de ce mémoire.

Mes vifs remerciements vont aux membres de jury Mme ROUISSAT Nadia et Mlle AYAD Fatima .Qu'ils trouvent à travers ces expressions mes sincères remerciements pour l'honneur qui m'ont fait en acceptant d'examiner ce travail.

Aussi je tiens également à remercier Madame BENADLA Zahira d'avoir accepté de présider le jury de mon projet de fin d'études.

J'adresse également ma profonde gratitude à l'ensemble du personnel de la STARR, l'EGTPH DENNOUNI, le LTPO et la DTP, et en particulier à Mr MCHERNEN Madjid, Mr IKHLEF C, Mr KAMNI Ismail. A Mr MEGNOUNIF Abdesselam MCA à l'université de TLEMCEM, qui m'ont apporté aide et soutien durant mon travail.

Mes sincères remerciements adressés à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents, pour leurs sacrifices et leurs encouragements, et qui grâce à eux j'ai pu achever mes études.

- ▣ *A mes chers et adorables frères Abdelhak & Samir.*
- ▣ *A ma chère sœur Nassima.*
- ▣ *A ma cousine Asma.*
- ▣ *A mon oncle LAKERMI Rachid pour son aide précieux.*
- ▣ *A tous mes amis, sans exception, et en particuliers :
Zineb, Amina, Lila, Lamia, Nor El Houda, Karim,
Sofiane.*
- ▣ *A tous mes amis de 2^{ème} année master Génie Civil
(Promotions 2015 ,2016),*
- ▣ *Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce travail soit possible, je vous dis merci.*

Fayza

RESUME

Le traitement d'un matériau par le compactage est modulé en fonction des objectifs à atteindre en tenant compte de ses principales caractéristiques (résistance au cisaillement, déformabilité, perméabilité, etc...), qui résultent sa composition minéralogique.

Le présent travail concerne les corrélations en mécanique des sols et notamment celles relatives aux sols compactés, qui ont une grande importance dans le métier de l'ingénieur.

Afin de mieux connaître et prévoir le comportement des matériaux compactés de la wilaya de TLEMEN, nous avons appliqué des corrélations proposées par divers auteurs entre les caractéristiques de l'optimum Proctor et les caractéristiques physiques de ces sols. Ces résultats sont analysés et comparés.

Mots clés : compactage, Proctor, énergie de compactage, corrélation, limite de liquidité.

SUMMARY

The treatment of a soil with compaction is modulated according to the objectives to reach, taking into account its main characteristics (shear strength, deformability, etc ...), resulting its mineralogical composition.

This work relates to the correlations in soil mechanics and in particular those relating to the compacted soils. Which have a great importance in the trade of the engineer.

In order to know more and predict the behavior of the soils of wilaya of TLEMEN, we applied a correlations proposed by different authors between the optimum Proctor and the physical characteristics of these soils. These results are analysed and compared .

Keywords : compaction, Proctor, energy compaction, correlation, liquid limit.

ملخص

إن معالجة التربة بالدمك تتعلق بشكل أساسي باغراض متوقعة، هذه الأغراض هي المميزات الرئيسية (مقاومة القص، القابلية للتشوه، النفوذية، الخ...) التي تنتج تركيبها المعدنية.

هذا العمل يتناول العلاقات الإحصائية في ميكانيك التربة و على وجه الخصوص تلك المتعلقة بالتربة المضغوطة، هذه العلاقات لها أهمية كبيرة في عمل المهندس.

و من أجل معرفة أفضل و تكهّن لخصائص و سلوكيات التربة المضغوطة لولاية تلمسان، فقد طَبَّقْنَا علاقات إحصائية متحصّل عليها من مختلف الباحثين بين القيم المثلى لبروكتور والخصائص الفيزيائية لهذه التربة. وقد تمّ تحليل هذه النتائج و مقارنتها

الكلمات الرئيسية: الدمك، بروكتور، طاقة الدمك، العلاقات الإحصائية، الحد السائل

SOMMAIRE

Remerciement	
Dédicaces	
Résumé	I
Liste d'abréviations	III
Liste des figures	V
Liste des Photos	VIII
Liste des tableaux	IX
Liste des projets des essais Proctor normal	XI
Liste des projets Proctor Modifié	XIII
Introduction générale	1

Chapitre I : Les corrélations en mécanique des sols

1. Introduction	3
2. Le sol	4
2.1 Définition du sol	4
2.2 Identification des sols	4
3. Définition des corrélations	5
4. L'importance des corrélations	6
5. Conditions d'utilisation des corrélations	7
6. Domaines de validité des corrélations	8
7. Les différentes types de corrélation de la littérature	8
7.1 Les corrélations de déformabilité	9
7.1.1 L'indice de compression C_c	9
7.1.2 L'indice de gonflement C_s	11
7.1.3 La contrainte de préconsolidation σ'_p	12
7.1.4 Modules de déformations	12
7.1.5 Coefficient de Poisson	13
7.2 Les corrélations de résistance	13
7.2.1 La cohésion effective c'	13

7.2.2	La cohésion apparente (non drainée) c_u	14
7.3	Les corrélations de la perméabilité	15
7.4	Autres corrélations	16
7.4.1	Estimation du rapport de surconsolidation OCR	16
7.4.2	Estimation du coefficient de poussée des terres au repos K_0	16
7.4.3	Estimation de la masse volumique maximale ρ_{opn} et de la teneur en eau correspondante ω_{opn} (Proctor)	17
7.4.4	Les corrélations de Biarez	17
7.4.5	Estimation des résistances au pénétrètres (statique et dynamique) ..	17
8.	Conclusion	18

Chapitre II : Corrélations pour les sols compactés

1.	Introduction	20
2.	Les sols compactés	20
2.1	Introduction	20
2.2	Définition du compactage	20
2.3	Utilité du compactage	22
2.4	Les facteurs influençant le compactage	23
2.4.1	L'influence de la teneur en eau	23
2.4.2	L'influence de l'énergie de compactage et la nature d'engin	25
2.4.3	L'influence de la nature du sol	27
2.5	L'essai Proctor	27
2.5.1	Introduction	27
2.5.2	But de l'essai Proctor	28
2.5.3	Principe de l'essai Proctor	28
2.5.4	L'indice portant immédiat	32
3.	Les Propriétés des sols compactés	32
3.1	Succion initiale des sols compactés	33
3.2	La perméabilité des sols compactés	34
4.	Les corrélations entre les paramètres des sols compactés et les limites d'Atterberg	35
4.1	Les limites d'Atterberg	36

4.2 Les corrélations entre les paramètres des sols compactés et les limites d'Atterberg	36
5. Les corrélations entre la succion et les limites d'Atterberg	37
5.1 Introduction	37
5.2 Définition de la succion	37
5.3 Les corrélations entre la succion et les limites d'Atterberg	37
6. Conclusion	37

Chapitre III : Application et analyse critique des corrélations pour les sols compactés

1. Introduction.....	40
2. Optimum Proctor normal et limites d'Atterberg	40
3. Description des caractéristiques des sols utilisés dans l'étude	41
4. Résultats de l'application des relations de corrélations	43
4.1 Estimation des paramètres de l'optimum Proctor normal (OPN)	43
4.1.1 La corrélation de POPOVIC (1980)	43
4.1.2 La corrélation de BLOTZ (1998)	45
4.1.3 La corrélation de FLEUREAU (2002)	46
4.1.4 La corrélation de GRESS (2002)	48
4.1.5 La corrélation de GURTUNG (2004)	49
4.1.6 La corrélation d'OSMAN (2004)	51
4.1.7 La corrélation de SIVRIKAYA (2008)	52
4.1.8 La corrélation de NAGRARAJ (2015)	54
4.1.9 La corrélation de KUMBASAR & TOGROL (1969)	55
4.2 Estimations des paramètres de l'optimum Proctor modifié	57
4.2.1 La corrélation de BLOTZ (1998)	57
4.2.2 La corrélation de FLEUREAU (2002)	58
4.2.3 La corrélation de GURTUNG (2004)	60
4.2.4 La corrélation d'OSMAN (2008)	61
5. Choix de la corrélation la plus représentative des sols compactés étudiés	63
5.1 Le coefficient de NASH- Sutcliffe (1969)	63
5.2 Calcul de coefficient de NASH à l'OPN.....	63

5.3 Calcul de coefficient de NASH à l'OPM	64
5.4 Interprétation des résultats	64
6. Proposition d'une corrélation fonction de la limite de liquidité du matériau	65
6.1 La corrélation à l'OPN	65
6.2 La corrélation à l'OPM	66
6.3 Calcul du coefficient de NASH des corrélations proposées	66
7. Conclusion	67
Conclusion générale	68
Références bibliographies	69
Annexes	71

LISTE D'ABREVIATIONS

CPT : pénétromètre statique

DP : pénétromètre dynamique

SPT : essai de pénétration standard

CBR : California Bearing Ration

C_U : le coefficient d'uniformité

C_c : le coefficient de compressibilité

C_S : le coefficient de gonflement

c' : la cohésion effective

c_u : La cohésion apparente (non drainée)

c_{us} : cohésion apparente par scissomètre

D₁₀ : le passant à 10%

e : l'indice des vides.

e₀ : l'indice des vides initiale

E' : module de déformation

E : l'énergie du compactage.

E_{oed} : module oedométrique

E_M : module pressiométrique

I_P : l'indice de plasticité.

I_C : l'indice de consistance

I_L : indice de liquidité

K₀ : coefficient de poussée des terres au repos

K_S : module de réaction

K : coefficient de perméabilité

N_{SPT} : nombre de coups dans un essai de pénétration standard

n : la porosité

q_c : résistance de point statique

q_d : résistance de pointe dynamique

ω_{OPN} : la teneur en eau optimum Proctor

ω_L : la limite de liquidité.

ω_P : la limite de plasticité.

σ_h : la contrainte horizontale totale

σ'_P : la contrainte de préconsolidation effective

σ'_{v0} : la contrainte verticale initiale effective

ρ_{opn} : la masse volumique maximale

ρ_d : la masse volumique sèche

ρ_{1m} : pression limite modifiée (pressiomètre Ménard)

γ_{dmax} : la densité sèche maximum.

ν : coefficient de Poisson

ϕ' : l'angle de frottement effectif

LISTE DES PHOTOS

Chapitre I : Les corrélations en mécanique des sols

Photo I.1 : Les essais in-situ en géotechnique5

Photo I.2 : Les essais effectués au laboratoire en géotechnique6

Chapitre II : Corrélations pour les sols compactés

Photo II.1 : Opération du compactage statique dans différents domaines (chaussée, terrain agricole,.....)22

Photo II.2 : L'opération du compactage statique sur un site de construction22

Photo II.3 : Le moule Proctor normal et CBR29

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : Les corrélations en mécanique des sols

Tableau I.1: les paramètres nécessaires pour les corrélations en fonction du type du sol (Boutonnier, 2007)	9
Tableau I.2 : Corrélations entre la l'indice de compression et la limite de liquidité (Dysli & Steiner, 2011)	10
Tableau I.3 : Corrélations entre l'indice de compression et l'indice des vides (Dysli &Steiner, 2011)	10
Tableau I.4 : corrélations entre l'indice de compression et la teneur en eau (Dysli & Steiner , 2011)	11
Tableau I.5: Corrélations de la contrainte de préconsolidation (Dysli & Steiner, 2011)	12
Tableau I.6 : Les valeurs du module pressiométrique en fonction de la résistance de pointe statique (Dysli & Steiner, 2011)	13
Tableau I.7 : les valeurs du facteur NK (Dysli & Steiner, 2011)	14
Tableau I.8 : Corrélations entre la cohésion apparente et la résistance de pointe dynamique (Dysli & Steiner, 2011)	14
Tableau I.9 : les corrélations entre la cohésion apparente et l'essai pressiométrique (Dysli & Steiner, 2011)	15
Tableau I.10 : Corrélations du coefficient de poussée des terres au repos K0 (Dysli & Steiner, 2011)	16
Tableau I.11 : Les corrélations de Biarez (Biarez & Favre, 1972 et 1976)	17
Tableau I.12 : Estimation des résistances des pénétrètres (statique et dynamique) Dysli & Steiner, 2011)	18

Chapitre II : Corrélations pour les sols compactés

Tableau II.1: Teneur en eau de compactage : comparaison « côté sec »_ « côté humide » (d'après LEONARDS, 1968)	25
Tableau II.2 : Les caractéristiques des essais de compactage Proctor	31
Tableau II.3 : Les corrélations entre les limites d'Atterberg et les paramètres des sols Compactés (Benchouk, 2015)	36
Tableau II.4: Corrélations entre les limites d'Atterberg et la succion	37

Chapitre III : Application et analyse critique des corrélations pour les sols compactés

Tableau III.1: Les corrélations donnant les caractéristiques à l'optimum Proctor normal (Benchouk, 2015)	41
Tableau III.2: Les corrélations donnant les caractéristiques à l'optimum Proctor modifié (Benchouk, 2015)	41
Tableau III.3: Les résultats de coefficient de NASH en négligeant le domaine de validité	63
Tableau III.4: Les valeurs du coefficient de NASH en utilisant uniquement le domaine de validité	64
Tableau III.5: La valeur de coefficient de NASH à l'OPM	64
Tableau III.6: Les corrélations de l'étude expérimentale	67
Tableau III.7 : Le coefficient de NASH des corrélations proposées	67

LISTE DES PROJETS DES ESSAIS PROCTOR NORMAL

Numéro d'essai	L'intitulé du projet	Auteur
1	Mémoire d'ingénieur: Contribution à l'étude du compactage au laboratoire: recherche de corrélations pour une éventuelle application aux cas pathologique	IALY RADIO Donat & TERKI HASSAINE Med Issam Eddine 1990
2	Mémoire d'ingénieur: Contribution à l'étude du compactage au laboratoire: recherche de corrélations pour une éventuelle application aux cas pathologique	IALY RADIO Donat & TERKI HASSAINE Med Issam Eddine 1990
3	Mémoire d'ingénieur: Contribution à l'étude du compactage au laboratoire: recherche de corrélations pour une éventuelle application aux cas pathologique	IALY RADIO Donat & TERKI HASSAINE Med Issam Eddine 1990
4	Mémoire de magister: Etude de la stabilité des rives de la piste de l'aérodrome MESSALI EL HADJ, ZENATA-TLEMCEN	KARA ZAITRI Abdelkarim
5	Thèse de doctorat : Contribution à l'étude mécanique et hydraulique des tunnels de configuration tridimensionnelle	EL HOUARI Nesrine 2015
6	Thèse de doctorat : Etude du transfert hydrique dans les sols non saturés : échange sol-atmosphère	ZADJAOUI Abdeldjalil 2009
7	Mémoire de magister: Etude de la stabilité des rives de la piste de l'aérodrome MESSALI EL HADJ, ZENATA-TLEMCEN	KARA ZAITRI Abdelkarim
8	Mémoire de magister: Etude de la stabilité des rives de la piste de l'aérodrome MESSALI EL HADJ, ZENATA-TLEMCEN	KARA ZAITRI Abdelkarim
9	Mémoire de master: Etude expérimentale de la dispersion des argiles	BOUZIANE Zeyneb 2014
10	Mémoire de master: Etude expérimentale de la dispersion des argiles	BOUZIANE Zeyneb 2014
11	Mémoire de master: Etude expérimentale de la dispersion des argiles	BOUZIANE Zeyneb 2014
12	Mémoire de master: Etude expérimentale de la dispersion des argiles	BOUZIANE Zeyneb

		2014
13	Mémoire de magister: Erosion régressive interne des sols fins	BECHLAGHEM Rokia 2006
14	Mémoire de magister: Erosion régressive interne des sols fins	BECHLAGHEM Rokia 2006
15	Thèse de doctorat: Stabilisation des sols gonflants	BELABBACI Zeyneb 2014
16	Thèse de doctorat: Stabilisation des sols gonflants	BELABBACI Zeyneb 2014
17	Mémoire de magister: Erosion régressive interne des sols fins	BECHLAGHEM Rokia 2006
18	Thèse de doctorat: Stabilisation des sols gonflants	BELABBACI Zeyneb 2014
19	Mémoire de master: L'effet du compactage sur les caractéristiques de perméabilité et de résistance d'un sol fin	MECHERNENE Madjid & BOUKLIKHA Rachid 2015
20	Thèse de doctorat: Etude de transfert hydrique dans les sols non saturés : échange sol-atmosphère	ZADJAOUI Abdeldjalil 2009
21	Thèse de doctorat: Etude de transfert hydrique dans les sols non saturés : échange sol-atmosphère	ZADJAOUI Abdeldjalil 2009
22	Mémoire de magister: Erosion régressive interne des sols fins	BECHLAGHEM Rokia 2006
23	Thèse de doctorat: Stabilisation des sols gonflants	BELABBACI Zeyneb 2014
24	Thèse de doctorat: Contribution à l'étude mécanique et hydraulique des tunnels de configuration tridimensionnelle	EL HOUARI Nesrine 2015

LISTE DES PROJETS DES ESSAIS PROCTOR MODIFIE

Numéro d'essai	Intitulé du projet	Auteur
1	Réalisation de la trémie de Maghnia	DENNOUNI
2	Divers projets	DENNOUNI
3	Réalisation de la trémie de Maghnia	DENNOUNI
4	Raccordement de la ville de Béni Saf au réseau ferroviaire national sur 3kms	STARR
5	Réalisation d'un célibatorium douanes Akid Lotfi	DENNOUNI
6	Réalisation de la RN2	DENNOUNI
7	Réalisation de la RN2	DENNOUNI
8	Expertise de la RN22 du PK94+000 au PK 152+000	LTPO
9	Modernisation du tracé du CW 109 sur 7km	LTPO
10	Reconstruction de la RN22 entre Sebdou et Aricha sur un linéaire de 58,32 km du PK 93+600 au PK 151+920	LTPO
11	Evitement de Boukanoun	DENNOUNI
12	Trémie Hennaya	STARR
13	Terrassement et revêtement à l'hôpital de Chetouane (provisoire)	STARR
14	Construction d'un échangeur sur RN22 (entrée Remchi)	STARR
15	Evitement de Maghnia	LTPO
16	Réhabilitation de la RN02 entre l'échangeur de l'autoroute est/ouest et Benskrane sur 12km	STARR
17	Expertise de la RN22 du PK94 au PK152	LTPO
18	Modernisation du tracé du CW104 sur 20km entre la RN22 et Honaine	LTPO
19	Modernisation du tracé du CW104 sur 20km entre la RN22 et Honaine	LTPO
20	Modernisation du tracé du CW104 sur 20km entre la RN22 et Honaine	LTPO
21	Evitement Boukanoune en allant vers Marsat Ben M'hidi	DENNOUNI
22	Modernisation du tracé du CW109 sur 75km	LTPO
23	Réhabilitation et modernisation de la RN02 entre TLEMCEN et limite de AIN TEMOUCHENT sur 25km	LTPO
24	Expertise de la RN22 du PK94 au PK152	LTPO
25	RN7A	DENNOUNI
26	Réalisation d'un célibatorium douanes Akid Lotfi	DENNOUNI
27	Lot n°3 : construction d'un échangeur (trémie) sur RN22/RN22A a Ain Youcef	STARR
28	Expertise de la RN22 du PK94+000 au PK152+000	LTPO
29	Evitement de Maghnia	LTPO
30	Modernisation du CW 100 sur 36km reliant le centre de Sellam-Bab El Assa-Nedroma et Souani	LTPO
31	Modernisation du CW 100 sur 36km reliant le centre de Sellam-Bab El Assa-Nedroma et Souani	LTPO
32	Etude APD de la desserte ferroviare Hassi Mesfoukh	STARR

	Mostaganim (50km)	
33	Rocade cotière Ghazaouet	DENNOUNI
34	Expertise de la RN22 du PK94+000 au PK152+000	LTPO
35	Entretien du chemin commun reliant RN99 à la localité Mezazgua sur 4 km	STARR
36	Modernisation du CW 100 sur 36km reliant le centre de Sellam-Bab El Assa-Nadroma et Souani	LTPO
37	Modernisation du CW 100 sur 36km reliant le centre de Sellam-Bab El Assa-Nadroma et Souani	LTPO
38	Etude APD de la desserte ferroviare Hassi Mesfoukh Mostaganim (50km)	STARR
39	Dédoublement de la RN7A sur 13km entre Maghnia et Maghagha	STARR
40	Dédoublement de la RN7A sur 17km entre Maghnia et Maghagha	LTPO
41	Modernisation du tracé du CW 100 sur 19kms	STARR
42	RN7A	DENNOUNI
43	Réhabilitation et modernisation de la RN02 entre TLEMCEN et limite de la wilaya de AIN TEMOUCHENT	LTPO
44	Réhabilitation et modernisation de la RN02 entre TLEMCEN et limite de la wilaya de AIN TEMOUCHENT	LTPO
45	Evitement de Maghnia	LTPO
46	Dédoublement de la RN7A sur 13km entre Maghnia et Maghagha	LTPO
47	Dédoublement de la RN7A sur 13km entre Maghnia et Maghagha	LTPO
48	Dédoublement de la RN7A sur 13km entre Maghnia et Maghagha	LTPO
49	Dédoublement de la RN7A sur 13km entre Maghnia et Maghagha	LTPO

INTRODUCTION GENERALE

En génie civil, les sols (et les roches) préexistent sur le site des travaux, la première phase de toute étude géotechnique consiste à définir la nature et l'état de ces terrains. Là où les ingénieurs géotechniciens sont confrontés à la nature du sol qui est rarement homogène, cette hétérogénéité rend la détermination des paramètres physiques et mécaniques tel que : l'identification, la déformabilité, la résistance et la perméabilité, en chaque point difficile et coûteuse.

C'est dans ce contexte qu'on fait appel aux corrélations dans un avant projet pour des estimations préliminaires, dans les projets pour éclairer l'interprétation des mesures ou éventuellement pour compléter une information qui manque et qu'on n'a pas pu mesurer, et aussi pour vérifier les rapports géotechniques.

Le compactage se fait dans le génie civil, pour les sols supports des ouvrages et des matériaux de remblais pour les barrages et les routes, pour améliorer les caractéristiques d'un sol. Cette opération mérite une attention particulière à accorder aux normes, exigences et contrôle du compactage.

De nombreuses recherches ont été pratiquées dans beaucoup de pays sur les propriétés des matériaux compactés, sur les meilleures conditions de compactage, sur les caractéristiques des matériaux après densification et sur les variations de ces propriétés en fonction des paramètres de compactage et sur les meilleures configurations à donner aux engins. Compte tenu des intérêts techniques du compactage, il y a donc lieu à ne pas lésiner sur la qualité du compactage.

Le présent travail englobe deux parties complémentaires à savoir :

- Le concept des corrélations, leurs intérêt pour le géotechnicien ainsi que la présentation des différentes relations corrélées appliquées sur différents paramètres et types de sols, en particulier des sols compactés.
- Mise en évidence des corrélations entre les paramètres des sols compactés et les limites d'Atterberg, cette partie a été basée sur l'application de ces corrélations sur des résultats d'essais de compactage relevés dans de rapports géotechniques. Le cas réel de l'application est la wilaya de TLEMCEM. Ces résultats nous ont conduits à la recherche de modèles de corrélations applicable aux matériaux de la wilaya.

Enfin, on termine par une conclusion générale qui regroupera l'ensemble des résultats trouvés.

Chapitre 1 :

LES CORRELATIONS EN MECANIQUE DES SOLS

1. INTRODUCTION :

Dans le génie civil le sol est à la fois, un support pour les ouvrages et un matériau de construction pour les routes et les barrages (**Costet & Sanglerat, 1969**).

Tout projet de construction doit être étudié avec des données complètes ce qui suppose une bonne reconnaissance du sol utilisé. Les ingénieurs géotechniciens, ont pour principal objectif de comprendre le comportement du sol et de la roche, et de fournir les recommandations appropriés pour contrôler et atténuer les risques géotechniques associés à tout projet. Ces conseils doivent citer les paramètres nécessaires pour évaluer, analyser et résoudre les problèmes en utilisant les outils suivants (**BRAJA & al, 2016**) :

- ✓ Les essais au laboratoire.
- ✓ Les essais in situ
- ✓ Les essais et/ou la surveillance pendant la construction.

Les essais in situ et au laboratoire permettent la détermination des paramètres physiques et mécaniques. Ces essais nécessitent au préalable d'effectuer des sondages en différents points du terrain étudié mais à cause de l'hétérogénéité des sols (le sol est rarement homogène), ça rend la détermination des paramètres physiques, mécaniques, de déformation et de perméabilité en chaque point difficile et coûteuse. C'est dans ce contexte qu'on fait appel aux corrélations afin de compléter une information manquante ou même de vérifier des résultats expérimentaux effectués au laboratoire ou sur site.

L'Eurocode 7 : calcul géotechnique (EN 1997-partie 1) demande, entre autres, que les valeurs caractéristiques des propriétés des sols soient établies par des méthodes statistiques introduisant un intervalle de confiance et qu'elles soient contrôlées au moyen de corrélations publiées entre les paramètres. Le but principal de ces recherches est de fournir aux géotechniciens des moyens pour déterminer ces valeurs caractéristiques lorsque le nombre des essais réalisés in situ ou en laboratoire n'est pas très importants.

Dans ce chapitre on va présenter l'importance des corrélations pour le géotechnicien ainsi que la présentation de plusieurs relations corrélées appliquées sur différents paramètres et types de sols (intact, compactés, ...).

2. Le sol :

2.1 Définition du sol :

Les sols peuvent être définis comme des agrégats dans lesquels les particules sont faiblement liées et peuvent être séparées par une action mécanique légère.

Un sol en place est constitué de grains solides baignant dans l'eau, dans l'air ou dans un mélange (eau + air).

Le sol est essentiellement un milieu constitué de trois phases. **(Benaissa, 1992) :**

- ✓ une phase solide ou squelette (incompressible), constituée de grains de toutes tailles (agrégats minéraux ou débris organique).
- ✓ une phase liquide peu compressible et difficile à évacuer (eau de pureté variable).
- ✓ une phase gazeuse compressible et facile à compacter (air et éventuellement vapeur d'eau).

L'arrangement des grains correspond à la structure du squelette. On a ainsi :

- ✓ une structure imbriquée, roche fissurée.
- ✓ une structure fermée, sable et gravier.
- ✓ une structure ouverte ou alvéolaire, argile.

2.2 Identification des sols :

Pour caractériser un sol, il faut déterminer les paramètres de nature et les paramètres d'état.

Les paramètres de nature indiquent les caractéristiques intrinsèques du sol. Ils ne varient pas au cours du temps (poids volumique des grains solides, granularité, argilosité, limites d'Atterberg, teneur en matières organiques,...).

Les paramètres d'état sont fonction de l'état du sol et caractérisent le comportement du sol sous l'effet d'un chargement donné (teneur en eau, indice des vides, porosité, Equivalent de sable,...). **(Meftah, 2008)**

3. Définition des corrélations :

Les corrélations sont les différentes relations et formules établies depuis longtemps entre les diverses caractéristiques des sols et les études statistiques entreprises sur des populations importants de sols. La littérature est pleine d'équations et des graphiques empiriques utilisées par les praticiens dans le monde entier (Dysli, 2011).

Les essais in situ (**photo I.1**) et les essais au laboratoire (**photo I.2**), sur des échantillons récupérés sur site restent les deux méthodes préférés pour la détermination des paramètres de conception en géotechnique. Les essais in situ se caractérisent par un coût moins chère, la rapidité et la simplicité, mais comme inconvénient ils n'ont pas une grande précision, par contre les essais au laboratoire ils ont une précision importante mais leurs coût est un peu chère.

Dans les étapes préliminaires, y compris des études de faisabilité quand les fonds sont limités pour l'exploitation des sols ; les corrélations empiriques deviennent très précieux. Par exemple des propriétés d'index simples, on peut obtenir une idée juste sur les caractéristiques de résistance et de consolidation de cisaillement d'une argile ou à eu de frais.



Photo I.1 : les essais in-situ en géotechnique (CDCA, 2012)



Photo I.2 : les essais effectués au laboratoire en géotechnique (CDCA, 2012)

4. L'importance des corrélations :

Dans l'ingénierie géotechnique, l'empirisme a un grand rôle à jouer. Il permet de donner des estimations préliminaires, les corrélations peuvent également être utilisées pour comparer avec les valeurs déterminées à partir des essais in situ et au laboratoire. Il y a tellement des équations empiriques et des graphiques disponibles dans la littérature, qui sont régulièrement utilisées dans la conception du monde entier. Ceux ci sont donnés ou calculés à partir des données de laboratoire ou sur le terrain.

Le plus souvent, il n'y a à la disposition du géotechnicien qu'une morphologie approximative du site obtenue par quelques sondages de reconnaissance ainsi que quelques résultats des essais standard en laboratoire ou en place voirie même aucun.

Enfin, dans la plupart des projets de fondations le nombre des essais géotechniques réalisés ne permet pas la détermination des valeurs fiables sur le plan statistiques.

Dans la première partie de l'EUROCODE 7 (EN1997-1), publié par le comité Européen de Normalisation (CEN), demande l'usage de l'expérience et des corrélations et précise encore que ces corrélations doivent être faites entre les résultats d'au moins deux types d'essais (**Dysli, 2011**).

Les corrélations donnent au géotechnicien un moyen simple pour évaluer les caractéristiques physiques et mécaniques utilisées dans les études d'un avant projet. Lorsque les essais en laboratoire sont inexistantes ou peu nombreux, ou pour contrôler les rapports géotechniques.

Chapitre I : Les corrélations en mécanique des sols

En mécanique des sols les corrélations sont utilisées comme (**Magnan, 1993**) :

- ✓ Un moyen de contrôle des résultats des essais, en place ou en laboratoire, et des rapports géotechniques.
- ✓ Un moyen de fabrication de déduire certains paramètres en fonction d'autres connus.
- ✓ Un moyen de contrôle de l'homogénéité des sols ou de la qualité des essais.
- ✓ Un moyen d'estimation de certaines propriétés des sols (souvent des propriétés mécaniques) par des caractéristiques déjà mesurées tels que les des propriétés physiques (teneur en eau, densité,...).

Les corrélations servent à :

- ✓ Relier les paramètres difficilement mesurables à des paramètres facilement mesurables.
- ✓ Eclairer la conduite et l'interprétation d'un essai expérimental.
- ✓ Vérifier une mesure expérimentale.

Le but de la compilation de corrélations entre diverses caractéristiques des sols est avant tout pratique. Il s'agit de mettre à disposition des projeteurs, des corrélations qui leur permettent de contrôler ou d'évaluer les paramètres géotechniques qu'ils devront utiliser dans leurs projets. En particulier, si les résultats d'une reconnaissance géotechnique sont à disposition et que des essais en laboratoire ou in situ ont permis de déterminer ces paramètres sur un nombre réduit d'échantillons (ce qui est très souvent le cas), ces corrélations permettront de valider les valeurs provenant de la reconnaissance (**Dysli, 2011**).

5. Conditions d'utilisation des corrélations :

Les conditions d'utilisation de corrélations dans les études géotechniques dépendent de la fiabilité des corrélations utilisées. Certains paramètres sont liés, à l'intérieur d'une couche de sol d'un site déterminé, par des relations proches d'une relation mathématique exacte.

Par contre, si l'on analyse simultanément des données provenant de deux sites, pour des sols de même nature, on trouve en général que les valeurs des paramètres sont plus dispersées, et cette dispersion augmente quand le nombre de sites s'accroît et quand on regroupe des données relatives à différents types de sols. Les erreurs expérimentales, lors de la détermination des paramètres qui servent à établir les corrélations, exercent également une

influence défavorable sur la qualité des corrélations obtenues. Il est, pour cette raison, indispensable de connaître l'origine des corrélations que l'on envisage d'utiliser dans le cadre d'une étude géotechnique, et d'être conscient de la variabilité possible des paramètres autour de leur relation moyenne affichée. (Magnan, 1982).

6. Domaines de validité des corrélations :

Habituellement, la validité des corrélations est limitée à la nature du sol étudié, par exemple certaines corrélations établies sur un site sont parfaites pour ce site peuvent aussi être inadaptés pour un autre site même si le deuxième site est de même nature que le premier ce qui exprime l'influence d'autres paramètres que ceux qui sont analysés, par exemple l'influence de l'état de sol, en plus de sa nature.

7. Les différents types de corrélations qui existent dans la littérature :

Dans la géotechnique on utilise plusieurs paramètres pour décrire les propriétés physiques et mécaniques des sols, ces paramètres sont de nature variée on distingue :

- ✓ **Paramètres d'identification et d'état** : porosité, indice des vides, densité, densité relative, limites d'Atterberg, etc....
- ✓ **Paramètres de déformabilité** : indice des compression, indice de gonflement, module oedométrique, module pressiométrique, etc....
- ✓ **Paramètres de résistance** : cohésion, angle de frottement interne, pression limite pressiométrique, résistance de cône statique ou dynamique, etc....
- ✓ **Paramètres de perméabilité.**

Ces différents paramètres vont être utilisés dans les différents calculs des corrélations suivant le type de sol, ci après un tableau qui donne quelque exemples de ces paramètres :

Chapitre I : Les corrélations en mécanique des sols

Tableau I.1 : les paramètres nécessaires pour les corrélations en fonction du type du sol
(Boutonnier, 2007)

Auteurs	Type de sol	Paramètres utilisés dans la corrélation
Fleureau et al (2002)	Sols fins	- ω_L - ω_{opt} (pour Proctor normal et modifié)
Aubertin et al (2003)	Sols granulaires	-L'indice des vides e - D_{10} (passant à 10%) - C_u
Aubertin et al (2003)	Sols fins	- L'indice des vides e - ω_L - ρ_s
Coté et Kounard (2003)	Matériaux granulaires avec faible pourcentage de fines (assise de chaussées)	-La porosité n (ou indice des vides e) -La courbe granulométrique -La surface spécifique de la fraction fine.

7.1 Les corrélations de déformabilité :

Pour le calcul des déformations pour les sols fins compressibles des ouvrages (surtout les tassements) on utilise essentiellement les paramètres suivants :

7.1.1 L'indice de compression C_C :

Avec la limite de liquidité : la corrélation entre l'indice de compression et la limite de liquidité est la meilleure, elle utilise en effet un paramètre qui dépend surtout du type du sol fin (minéralogie, granulométrie de la partie argileuse, etc.) et non pas de son état (e_0 , ω).
(Tableau I.2)

Chapitre I : Les corrélations en mécanique des sols

Tableau I.2 : Corrélations entre la l'indice de compression et la limite de liquidité (Dysli & Steiner, 2011)

Auteur	Corrélation
Rivard & Goodwin (1978) : Argiles alluviales et glaciaires	$C_c=0,0047\omega_L-0,003$
Mayne (1980)	$C_c=0,0092\omega_L-0,119$
Skempton (1944) : Argiles remaniées	$C_c=0,007\omega_L-0,049$
Skempton : sol intact	$C_c=0,009(\omega_L-10)$
Terzaghi & Peck (1967) : Argiles normalement consolidées	$C_c=0,009\omega_L-0,09$
Azzouz (1976) : Toutes les argiles	$C_c=0,006\omega_L-0,054$

✓ Avec l'indice des vides initial e_0 : (Tableau I.3)

Tableau I.3 : Corrélations entre l'indice de compression et l'indice des vides (Dysli & Steiner, 2011)

Auteur	Corrélation
Dascal & Laroque (1973) :	$C_c=1,43 e_0-1,11$
Dascal & Laroque (1973) : Argile très grande plasticité	$C_c=0,92 e_0-0,56$
Dzwilewski & Richards (1974) : Argile limoneuse	$C_c=0,34 e_0+0,02$
Krizek, Corotis, El-Moursi (1977)	$C_c=0,35 e_0-0,059$
Kogure, Ohira(1977) : Tourbe & argile varvée	$C_c=0,37 e_0^{1,17}$
Leroueil, Tavenas (1983) : Argiles marines	$C_c=0,65 e_0^2+0,15 e_0-0,5$
Moulin (1989) : Argiles surconsolidée	$C_c=0,15 e_0^2+0,125 e_0-0,025$
Nishida (1956) : Toutes les argiles	$C_c=0,54 e_0-0,19$
Hough (1957) : Limons à argiles inorganiques	$C_c=0,29 e_0-0,08$
Hough (1957) : sols fins organiques	$C_c=0,35 e_0-0,18$
Sowers (1970) : Sols peu plastiques	$C_c=0,75 e_0-0,38$

Chapitre I : Les corrélations en mécanique des sols

- ✓ Avec la teneur en eau (ω) : pour les corrélations fonctions de la teneur en eau, le problème est que l'on ne connaît pas sa valeur par rapport à la limite de liquidité ou, en d'autres termes, que l'indice de liquidité I_L ou l'indice de consistance I_C sont inconnus.

Dans les sols très organiques ou très plastiques, leurs teneur en eau s'écarte grandement de cette limite, ce qui explique leurs corrélations très différentes des autres sols. La corrélation de HELENELUND (1951) est souvent utilisée dans la littérature, il est déconseillé cependant son usage pour estimer un indice de compression. (**Tableau I.4**).

Tableau I.4 : corrélations entre l'indice de compression et la teneur en eau (Dysli & Steiner, 2011)

Auteur	Corrélation
Dascal, Laroque (1973) : Argiles lacustres très plastiques	$C_c = 0,042\omega - 1,314$
Dascal, Laroque (1973) : Argiles marines varvées silteuses	$C_c = 0,022\omega - 0,452$
Nishida (1956)	$C_c = 0,014\omega - 0,189$
Terzagui, Peck (1967) : Argiles normalement consolidées	$C_c = 0,009\omega - 0,090$
Rivard, Godwin (1978) : Argiles alluviales et glaciaires	$C_c = 0,0102\omega - 0,004$
Helenelund (1951) : Argiles finlandaises	$C_c = 0,085 (\omega / 100)^{3/2}$
Moran et al (1958) : Limons et argiles organiques, tourbes.	$C_c = 0,0115\omega$
Azzouz et al (1976) : Toutes les argiles	$C_c = 0,01\omega - 0,05$
Koppula (1981) : Toutes les argiles	$C_c = 0,01\omega$
Herrero (1983) : Toutes les argiles	$C_c = 0,01\omega - 0,075$
Peck, Reed (1954) : Argiles glaciaires	$C_c = 1,766(\omega/100)^2 + 0,593(\omega/100) - 0,0135$

7.1.2 Le coefficient de gonflement C_s :

Toutes les corrélations donnant l'indice de gonflement en fonction de différentes caractéristiques du sol sont mauvaises. La seule qui donne de bons résultats est celle l'évaluant par rapport à l'indice de compression. La relation approximative la plus connue est (Dysli & Steiner, 2013):

$$C_s = C_c / 100$$

7.1.3 La contrainte de préconsolidation σ'_p :

La contrainte de préconsolidation est un paramètre très important qui est souvent difficile à estimer par un essai oedométrique, sa mauvaise estimation peut conduire à de grossières erreurs dans l'estimation des tassements.

Des corrélations permettant d'évaluer cette contrainte sont donc I_L présentées dans le tableau suivant :

Tableau I.5 : Corrélations de la contrainte de préconsolidation (Dysli & Steiner 2011)

Auteur	Corrélation
Peters & Lamb (1979) : Argiles non remaniée	$\sigma'_p = 107.10^{((I_L - 0.68)/0.88)}$
Kogure & Ohira (1977) : Tourbe et argiles varvées	$\sigma'_p = 165 e_0^{-0.988}$
Kogure & Ohira (1977) : Tourbe et argiles varvées	$\sigma'_p = 4390. \omega^{-0.913}$

7.1.4 Modules de déformations :

Les modules de déformations se déterminent avec ces paramètres et le coefficient de Poisson ν .

Pour les sols grossiers on utilise :

-Un couple de modules de déformation, par exemple E' et ν .

- Le module de réaction K_S .

- ✓ **Module oedométrique** : en fonction de la résistance de pointe statique q_c (CPT) :

$$E_{\text{oed}} = \alpha \cdot q_c$$

- ✓ **Module pressiométrique E_M** : par résistance de pointe statique q_c (CPT).
Le tableau suivant montre les valeurs de E_M en fonction de q_c :

Chapitre I : Les corrélations en mécanique des sols

Tableau I.6 : les valeurs du module pressiométrique en fonction de la résistance de pointe statique (Dysli & Steiner, 2011)

I_b	q_c (CPT)	E_M (MPa) (drainé)
Très faible	0 – 2,5	<10
Faible	2,5 – 5	10 – 20
Moyenne	5 – 10	20 – 30
Grande	10 – 20	30 – 60
Très grande	>20	60 – 90

7.1.5 Coefficient de Poisson :

Lors du calcul d'un module de déformation avec les indices de compression ou de gonflement, la connaissance du module de poisson ν est souvent nécessaire, la corrélation la plus connue et la plus utilisée est celle du hongrois JAKY (1944) :

$$\nu = (1 - \sin \phi') (2 - \sin \phi')$$

7.2 Les corrélations de résistance :

Pour les calculs des états limites des ouvrages le géotechnicien a besoin de quelques paramètres qui sont :

- L'angle de frottement effectif ϕ' et la cohésion effective C' pour une analyse drainée.
- La cohésion apparente (non drainée) C_u pour une analyse non drainée.

7.2.1 La cohésion effective C' :

Avec l'indice de consistance : les corrélations qui devraient permettre d'évaluer la cohésion effective sur la base d'autres paramètres conduisent presque toujours à des coefficients de corrélations très faibles. Les seules corrélations intéressantes trouvées dans la littérature sont celles présentées par **Bjerrum** en 1951 :

$$I_C (\%) = (\omega_L - \omega) / I_P$$

7.2.2 La cohésion apparente (non drainée) C_u :

- ✓ Avec la résistance de pointe statique q_c (CPT) :

Les essais aux pénétromètres statiques ou dynamiques sont un bon moyen pour estimer la résistance au cisaillement non drainée. Avec le pénétromètre statique CPT et pour des sols limoneux et argileux, on peut utiliser l'équation :

$$C_u = (q_c - \sigma'_{v0}) / N_K$$

- ✓ Avec N_K est un facteur donné par divers auteurs comme il montre le tableau suivant :

Tableau I.7 : les valeurs du facteur N_K (Dysli & Steiner, 2011)

Auteur	N_K
L'Herminier	11
Skempton	10
Meyerhof	9
Caquot et Kérisel	7
Steiner & Togliani (1998) : Argiles de l'arc alpin	15

- ✓ Avec la résistance de pointe dynamique q_d (DP ou SPT) :

Le tableau I.9 présente une estimation de C_u en fonction de q_d :

Tableau I.8 : Corrélations entre la cohésion apparente et la résistance de pointe dynamique (Dysli & Steiner, 2011)

Auteur	Corrélation
Zhou (1997) : Argile molle	$C_u = q_d / 11,4$
Gourvès & Barjot (1995) : sol fin de compacité moyenne	$C_u = q_d / (15 \text{ à } 20)$

- ✓ Avec l'essai pressiométrique : des relations du type $C_u = (p_{1m} - \sigma_h) / cste$, ont été proposées par différents auteurs, le **tableau I.19** tiré de Clarke (1992) les récapitule.

Tableau I.9 : les corrélations entre la cohésion apparente et l'essai pressiométrique (Dysli & Steiner, 2011)

Auteur	Corrélation
Ménard (1957)	$C_U = (\rho_{1m} - \sigma_h) / 2 \dots 5$
Cassan (1988), Amar & Jézéquel (1972) : Argile molle à ferme	$C_U = (\rho_{1m} - \sigma_h) / 5,5$
Dito : Argile ferme à dure	$C_U = (\rho_{1m} - \sigma_h) / 8$
Dito : Argile dure à très dure	$C_U = (\rho_{1m} - \sigma_h) / 15$
Marsland & Randolph (1977) : Argile dure	$C_U = (\rho_{1m} - \sigma_h) / 6,8$
Lukas & LeClerc de Bussy (1976) : toutes les argiles	$C_U = (\rho_{1m} - \sigma_h) / 5,1$
Amar et Jézéquel (1972) : dito	$C_U = ((\rho_{1m} - \sigma_h) / 10) + 25$
Martin & Drahos (1986) : Argile dure	$C_U = (\rho_{1m} - \sigma_h) / 10$
Johnson (1984) : Argile molle à dure	$C_U = (\rho_{1m} / 10) + 25$

7.3 Les corrélations de la perméabilité :

Le but de ce type de corrélation est d'évaluer le coefficient de perméabilité K verticale pour des sols le plus souvent hétérogènes.

- **Corrélation par la granulométrie** : c'est le seul type de corrélation qui donne des résultats utilisables. Le meilleur marqueur de la granulométrie est le diamètre d_{10} à savoir le diamètre à 10% de la courbe granulométrique.

Dans la littérature se trouvent trois corrélations celle de **Slichter (1988)** pour les sols fins, de **Hazen (1911)** et du **NAVFACDM-7**. Ce sont les plus intéressants car elle sont en fonction de d_{10} et de l'indice des vides e_0 , ces trois corrélations suivent une loi « puissance » de la forme :

$$K = C \cdot d_{10}^2$$

Avec C : constante

7.4 Autres corrélations :

7.4.1 Estimation du rapport de surconsolidation OCR :

Ce paramètre est très important car il permet d'apprécier le degré de surconsolidation des sols :

$$\text{OCR} = \sigma'_p / \sigma'_{v0}$$

La seule corrélation trouvée dans la littérature de ce paramètre est celle proposée par **Mayne et Mitchel (1988)**, elle concerne des argiles (probablement aussi des limons argileux) de consistance molle à moyenne :

$$\text{OCR} = 4,31 (C_{US} / \sigma'_{v0})$$

7.4.2 Estimation du coefficient de poussée des terres au repos K_0 :

Le coefficient de poussée des terres au repos est souvent difficile à estimer. Le **tableau I.10** présente les différentes corrélations trouvées dans la littérature en fonction de différents paramètres :

Tableau I.10 : corrélations du coefficient de poussée des terres au repos K_0
(Dysli & Steiner, 2011)

Auteur	Corrélation
Jaky (1944) : sols normalement consolidés	$K_0 = 1 - \sin \phi'$
Brooker & Ireland (1965), Lambe & Whitman (1969) : sols normalement consolidés	$K_0 = 0,95 - \sin \phi'$
Alpan (1967)	$K_0 = 0,19 + 0,233 \log I_p$

La forme la plus courante de la relation $K_0 = f(\phi', \text{OCR})$ est :

$$K_0 = (1 - \sin \phi') \cdot \text{OCR}^\alpha$$

Avec α : un coefficient peut prendre plusieurs valeurs suivant les auteurs :

$$\alpha = 0,5 \quad \text{selon Schmidt (1965)}$$

$$\alpha = \sin \phi' \quad \text{selon Kulhawy et al (1989)}$$

$$\alpha = 0,46 \pm 0,05 \quad \text{selon Jamiolkowski et al (1979)}$$

Pour un angle de frottement interne de 30° ($\alpha = 0,5$) et pour un OCR de 10 (sol fortement surconsolidé), $K_0 = 1,6$.

Pour un OCR de 10, les corrélations de **Brooker et Ireland (1965)** donne un K_0 d'environ 1,4.

7.4.3 Estimation de la masse volumique optimale ρ_{opt} et de la teneur en eau correspondante ω_{opt} (Proctor) :

La masse volumique optimale ainsi que la teneur en eau correspondante peuvent être estimées en fonction de la limite de liquidité et en fonction du pourcentage des grains $< 0,08$ mm .

7.4.4 Les corrélations de Biarez :

Sur la base de corrélations bien établies, **Biarez & Favre (1972,1976)** ont établi un graphique liant les principaux paramètres caractérisant un sol (**Tableau I.11**) , ce graphique donne des relations entre les valeurs tirées de l'essai oedométrique, les limites de consistance et la cohésion non drainée C_U pour les argiles ordinaires, remaniées et saturées, de compacité moyenne à très faible. Ces relations ne donnent qu'un ordre de grandeur à titre indicatif seulement.

Tableau I.11 : les corrélations de Biarez (Biarez & Favre, 1972 et 1976)

Les paramètres	La corrélation de Biarez
Le coefficient de compressibilité	$C_C = 0,009 (W_L - 13)$
L'indice de plasticité	$I_p = 0,73 (W_L - 13)$
La cohésion apparente	$(0,11 + 0,0037 \cdot I_p) \cdot \sigma'_v$

7.4.5 Estimation des résistances des pénétrètres (statique et dynamique) :

Les résistances de pointes statiques q_c et dynamiques q_d ne sont pas équivalents .Il existe plusieurs relations liant ces deux résistances soit entre eux soit avec d'autres paramètres (**Tableau I.12**) :

Tableau I.12 : Estimation des résistances des pénétromètres (statique et dynamique)
Dysli & Steiner, 2011)

Auteur	Corrélation
Buisson, l'Herminier et Tcheng (Sanglerat 1965)	$0,3 \leq \frac{q_c}{q_d} \leq 1$
Cassan (1988) : Limons argileux	$q_d = 0,79 q_c$
Cassan (1988) : Sables argileux	$q_d = 0,93 q_c + 1,88$
Cassan (1988) : Les sables limoneux et les limons argilo-sableux	$q_d = 0,3 q_c$
Cassan (1988) : Les sables et graviers saturés	$q_d = 0,4 q_c$
Sanglerat & Gielly (1974) : Sols cohérents saturés	$q_d = q_c \cdot (10 \text{ à } 100)$
Waschkowski (cité par cassan 1988) : Argiles et limons surconsolidés	$q_d = 0,2 N_{SPT}$
Waschkowski (cité par cassan 1988) : Argiles sableuses et limons sableux	$q_d = 0,3 N_{SPT}$
Waschkowski (cité par cassan 1988) : Sables	$q_d = 0,4 N_{SPT}$
Waschkowski (cité par cassan 1988) : Sables plus ou moins graveleux	$q_d = 0,8 N_{SPT}$
Zhou (1997) : Argiles	$q_d / (\rho_{1m} - \sigma_h) = 4,6$
Zhou (1997) : Limons	$q_d / (\rho_{1m} - \sigma_h) = 6$

8. Conclusion :

L'emploi judicieux des matériaux utilisés dans la construction exige la connaissance de leurs diverses propriétés : physico-chimiques, hydrauliques, mécaniques, pour permettre de faire un choix répondant à leur destination (**Ghomari, 1989** cité par **Ialy Radio & Terki Hassaine, 1990**).

Dans ce chapitre nous avons présenté l'importance des corrélations pour les géotechniciens. Ainsi que les différents types de corrélations qui se trouvent dans la littérature.

Dans le chapitre suivant, on s'intéressera aux corrélations se rapportant aux sols compactés.

Chapitre 2 :

CORRELATIONS POUR LES SOLS COMPACTES

1. Introduction :

Les sols fins sont utilisés en génie civil, comme remblais des digues ou des routes, et comme un sol support de différents ouvrages. Ces sols sont de nature très complexes, ils ont posé toujours de nombreux problèmes dans le domaine de la géotechnique, ce qui nécessite un traitement approprié pour améliorer leurs caractéristiques lorsque le sol est utilisé comme matériau constitutif des couches de chaussées.

Le traitement par compactage est un des procédés suivi pour stabiliser ou traiter de ces sols de mauvaise qualité.

Dans ce chapitre on s'intéresse qu'au traitement par compactage et surtout l'influence mutuelle entre le compactage et les caractéristiques des sols compactés en utilisant les différentes corrélations qui relient entre les paramètres du compactage et les propriétés du sol.

2. Les sols compactés :

2.1 Introduction :

L'utilisation des sols fins (limons, argiles, etc...) comme remblais des digues ou des routes présente diverses difficultés et conséquences dues à leurs faibles résistances au cisaillement et leurs fortes compressibilité (tassements différentiels, poinçonnement etc...).

Ces sols puissent répondre aux exigences techniques et technologiques des constructions ; il faut recourir à la stabilisation et/ou « traitement » physique et mécanique.(Ialy Radio& Terki Hassaine, 1990) .Parmi ces technique de traitement on trouvera le compactage.

2.2Définition du Compactage :

Le compactage est une réorganisation des grains entre eux sous une action ou une charge appliquée au sol pour avoir une réduction de l'indice des vides et une augmentation de la compacité.

Cette opération se retrouve souvent dans les terrassements, la construction des corps de chaussées routières et des noyaux de barrage en terre.

Lorsqu'on compacte un sol ou un matériau, on réalise une amélioration dans ses caractéristiques mécaniques (la cohésion C et l'angle de frottement ϕ) ainsi que

Chapitre II :Corrélations pour les sols compactés

l'augmentation du module de déformation et par conséquent l'amélioration de la portance du terrain, la diminution des tassements et de la perméabilité sous l'effet de la réduction de la porosité du sol compacté (**Kerfouf, 2012**).

Après cette opération généralement le sol acquière (**cité par BIAREZ, 1974**), une diminution de :

la perméabilité.

-le retrait.

-la compressibilité.

Et une augmentation de:

-la résistance au cisaillement.

-le potentiel de gonflement.

-la densité.

L'étude du compactage revient alors à chercher :

- ✓ Les lois d'augmentation de la densité.
- ✓ Les lois d'augmentation des propriétés mécaniques en fonction de la densité.

On entend par nature du sol les caractéristiques du sol qui ne varient pas ou très peu, lorsqu'on le manipule, que ce soit à l'extraction, au transport, à la mise en remblai ou au compactage. C'est le cas par exemple pour la granulométrie d'un grave et l'argilosité d'un sol fin. Par contre, les caractéristiques d'état d'un sol sont celles qui peuvent être modifiées par l'environnement dans lequel il se trouve. C'est le cas en particulier pour l'état hydrique (**Alshihabi, 2002**).

Il serait préférable de qualifier le « compactage » un ensemble d'opérations permettant d'obtenir à partir d'un matériau donné un autre matériau de caractéristiques appropriées aux fonctions à remplir. Les caractéristiques sont évidemment différentes selon le matériau d'origine (**Photo II.1**), (**Photo II.2**).



Photo II.1 : Opération du compactage statique dans différents domaines (chaussée, terrain agricole,...)

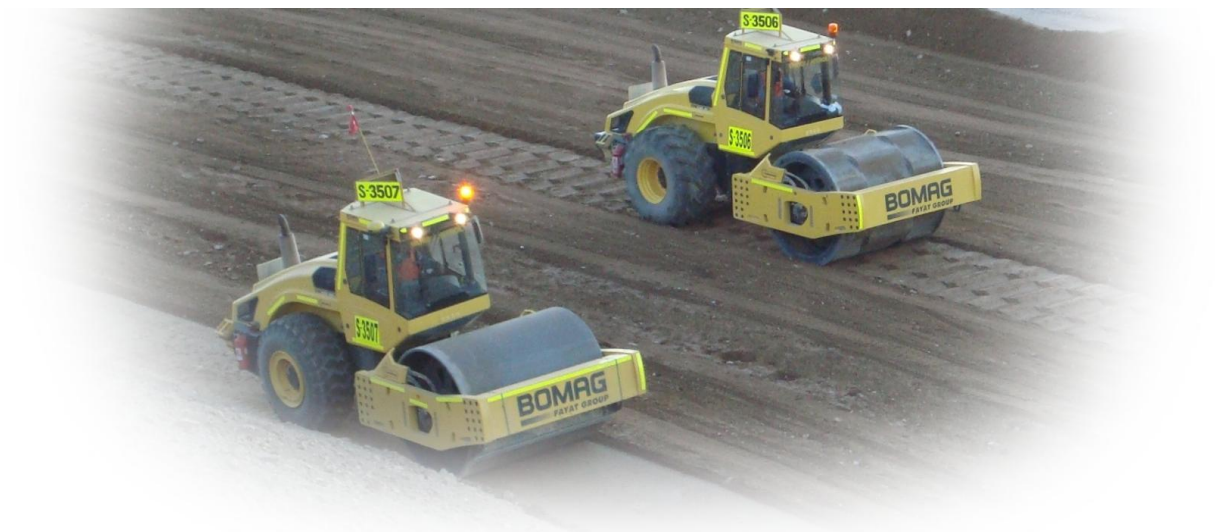


Photo II.2 : L'opération du compactage statique sur un site de construction

2.3 Utilité du compactage :

L'ingénieur routier est intéressé, à plus d'un titre, par les améliorations apportées par le compactage (Cisse, 1982) :

Durant la réalisation des travaux pour assurer une bonne traficabilité des engins de transport et de mise en œuvre. La qualité recherchée réside alors essentiellement dans la résistance à l'orniérage pour chaque couche élémentaire et, à moindre titre dans la recherche d'une faible déformabilité et d'une tenue satisfaisante des talus. Cet intérêt du compactage doit être connu et bien estimé. Il peut, en effet conduire à des économies substantielles.

Durant la phase d'exploitation de la route afin d'assurer une qualité de service satisfaisante sans entretien prohibitif. Les qualités recherchées sont alors multiples et dépendent de la nature de l'ouvrage, des techniques utilisées (choix d'un engin de compactage et son mode d'emploi en face d'un sol à compacter) du trafic et des conditions météorologiques.

Chapitre II :Corrélations pour les sols compactés

L'amélioration des qualités d'un sol a pour objet:

- pour un remblai, d'éviter des tassements et des possibilités de glissement
- pour un noyau de barrage, de réaliser un massif étanche, non fissurant
- pour une couche de fondation de chaussée d'améliorer la force portante et la rigidité
- lors de la réalisation d'une piste ou d'une route en terre d'adapter les qualités du sol en place ou de la couche d'amélioration;
- dans tous les cas, de réduire la perméabilité et la susceptibilité à l'absorption de l'eau.

Le but du compactage est de satisfaire à ces conditions. L'augmentation de compacité de sol va de pair avec une augmentation de l'angle de frottement interne ϕ' et de la cohésion c' et, par conséquent, de la résistance aux contraintes tangentielles τ , ainsi qu'avec une diminution de la compressibilité et de la perméabilité.

2.4 Les facteurs influençant le compactage :

Le compactage des sols consiste en la réduction du volumes des vides remplis d'air et l'augmentation de leurs densité apparente sous une action mécanique (pression , damage, charge vibrante).son efficacité dépend de:

- la nature du sol à compacter.
- la teneur en eau de ce sol,
- le processus adopté pour le compactage.
- la nature d'engin de compactage.
- l'énergie de compactage.

2.4.1 L'influence de la teneur en eau :

Le compactage se fait par arrosage du sol avec de l'eau. La courbe Proctor (**Figure II.1**) montre bien que la masse volumique sèche augmente avec la teneur en eau jusqu'à un point optimal qui s'appelle aussi l'optimum Proctor (défini par une densité sèche maximum $\gamma_{d_{max}}$ et une teneur en eau optimale (ω_{opt})).

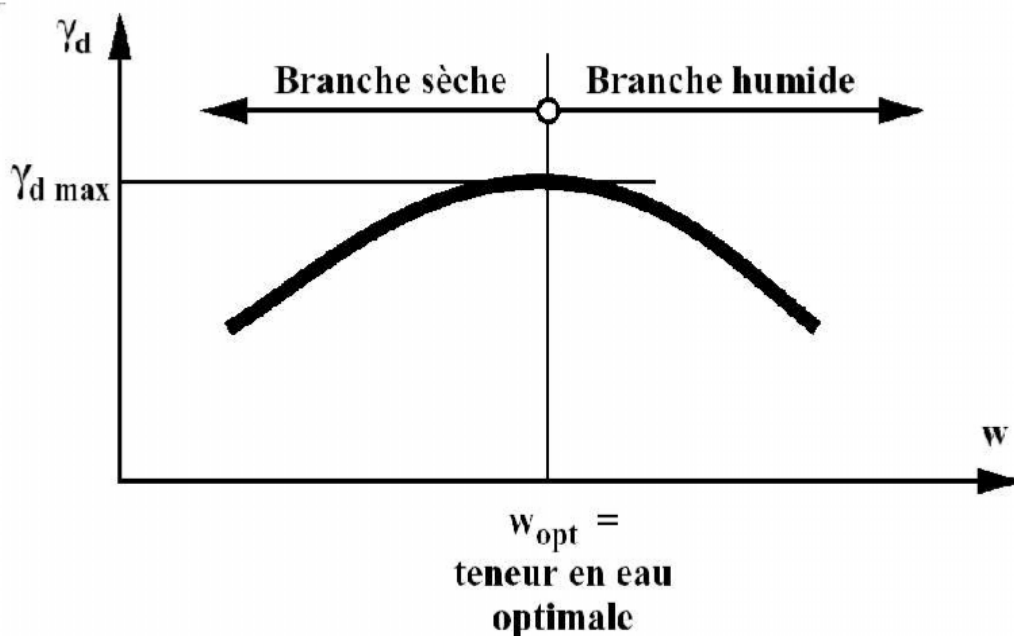


Figure II.1: La courbe Proctor (Kerfouf, 2012)

Les teneurs en eau inférieures à la teneur en eau optimale forment la branche sèche du compactage. Lorsqu'un sol est compacté, on constate que plus on rajoute de l'eau plus le compactage devient facile. L'eau permet de diminuer le frottement qu'oppose le sol au compactage. Au-delà de l'optimum, l'eau est en excès. Elle occupe une grande partie des vides de sol. Lorsqu'on applique une charge de compactage sur le matériau l'eau étant un corps incompressible, elle va reprendre une portion importante de l'énergie de compactage. Cette portion dépend de la quantité d'eau. L'énergie transmise au sol par le compactage, ne se transfère pas aux grains. Dans ces conditions le sol devient petit à petit moins dense dans ces conditions de grandes humidités.

Le tableau suivant donne une comparaison entre le coté sec et le coté humide de la courbe Proctor (d'après **Leonards, 1968 cité par Ialy Radio & Terki Hassaine 1990**) :

Chapitre II :Corrélations pour les sols compactés

Tableau II.1 : Teneur en eau de compactage : comparaison « côté sec »_ « côté humide »
(d'après LEONARDS, 1968)

Propriétés		Comparaison
Structure	Arrangement des particules	Côté sec : -structure plus désordonnée.
	Manque d'eau	Côté sec : - gonflement plus important. -pressions interstitielles plus faibles.
	Stabilité	Côté sec : -structure moins stable.
Perméabilité	Importance	Côté sec : -plus perméable.
	Evolution	Côté sec : -perméabilité décroissante plus vite en cours d'imbibition.
Compressibilité	Importance	Côté humide : -plus compressible aux faibles pressions. Côté sec : -plus compressible aux hautes pressions.
	Vitesse	Côté sec : -consolidation plus rapide
Résistance après saturation	Sans drainage	Côté sec : -un peu plus fort si le gonflement est empêché. Côté humide : -résistance pouvant être plus forte si le gonflement est possible.
	Avec drainage	Côté sec : -résistance légèrement plus élevée.
Pressions interstitielles à la rupture		Côté humide : -plus élevées.
Module de déformation		Côté sec : -bien plus élevé.
Sensibilité		Côté sec : -plus apte à être sensible à des variations de teneur en eau.

2.4.2 L'influence de l'énergie de compactage et de la nature d'engin :

Sur le chantier, l'énergie mécanique peut être transmise au sol de différentes manières. La quantité d'énergie transmise au sol dépend premièrement du type de compacteur utilisé et du nombre de passes du compacteur ; plus le nombre de passes est grand plus l'énergie transmise est importante.

Chapitre II :Corrélations pour les sols compactés

Pour le même sol, si on augmente l'énergie et on conserve la même teneur en eau la densité augmente (**Figure II.2**), l'allure de la courbe de compactage est globalement la même, elle se déplace vers le haut et elle est limitée sur la droite par la courbe de saturation totale ($s_r=100\%$).

L'extrémité droite de la courbe de compactage, c'est à dire l'extrémité du versant sec (ou branche sèche) correspond à l'état de saturation du sol. La courbe est donc limitée à l'abscisse $\omega=\omega_{SAT}$. On conçoit aisément que si l'énergie de compactage augmente, les vides 'secs' (remplis d'air et non d'eau) seront d'avantage réduits. Ceci implique deux choses:

- Le γ_d obtenu par la compaction sera plus élevé. La courbe de compaction se déplacera donc vers le haut.
- La saturation sera atteinte à une teneur en eau moindre : ω_{SAT} diminue. La courbe de compaction se déplacera donc vers la gauche.

Si l'on superpose les graphes de plusieurs essais effectués sur un même sol, avec des énergies de compaction croissante (nombre de coups et/ou hauteur de chute croissante), on obtient une figure similaire à la suivante :

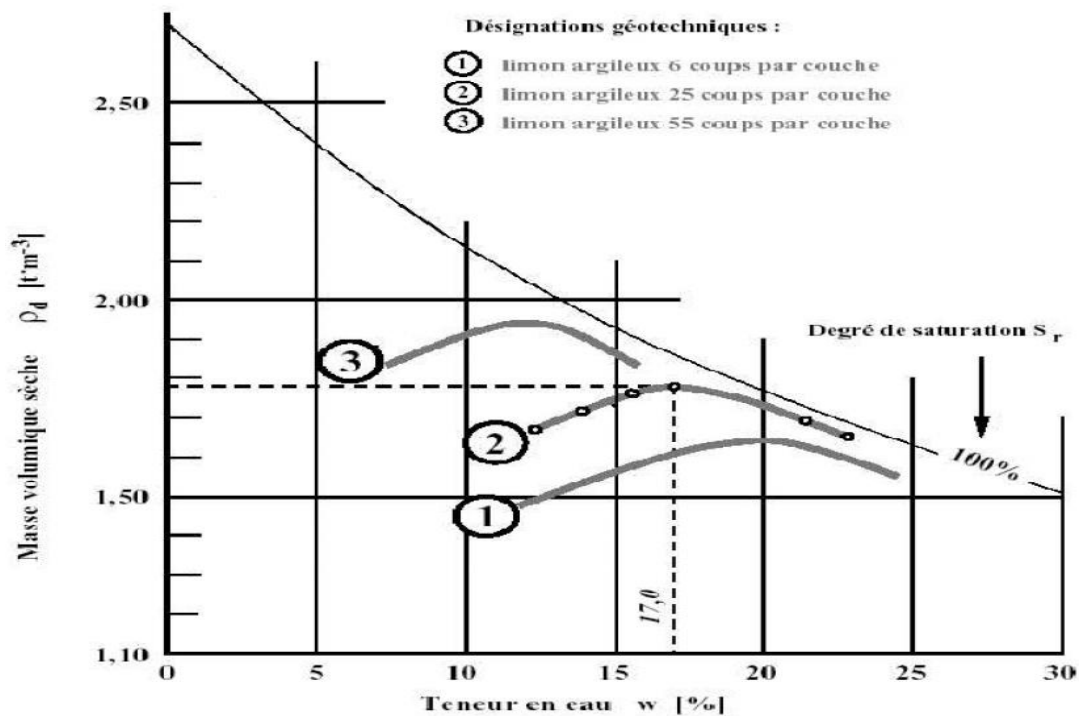


Figure II.3 : l'influence de l'énergie de compactage (Kerfouf, 2012)

2.4.3 L'influence de la nature du sol :

Les sols qui ont une courbe de compactage avec un maximum très marqué, sont très influencés par la teneur en eau. Contrairement, les sols qui ont une courbe plate, sont moins influencés par la variation de la teneur en eau et ils forment des bons matériaux pour remblai (Figure II.3).

Selon cette figure on constate que le compactage des sables est moins influencé par l'eau par contre l'eau influe considérablement sur le compactage des sols argileux.

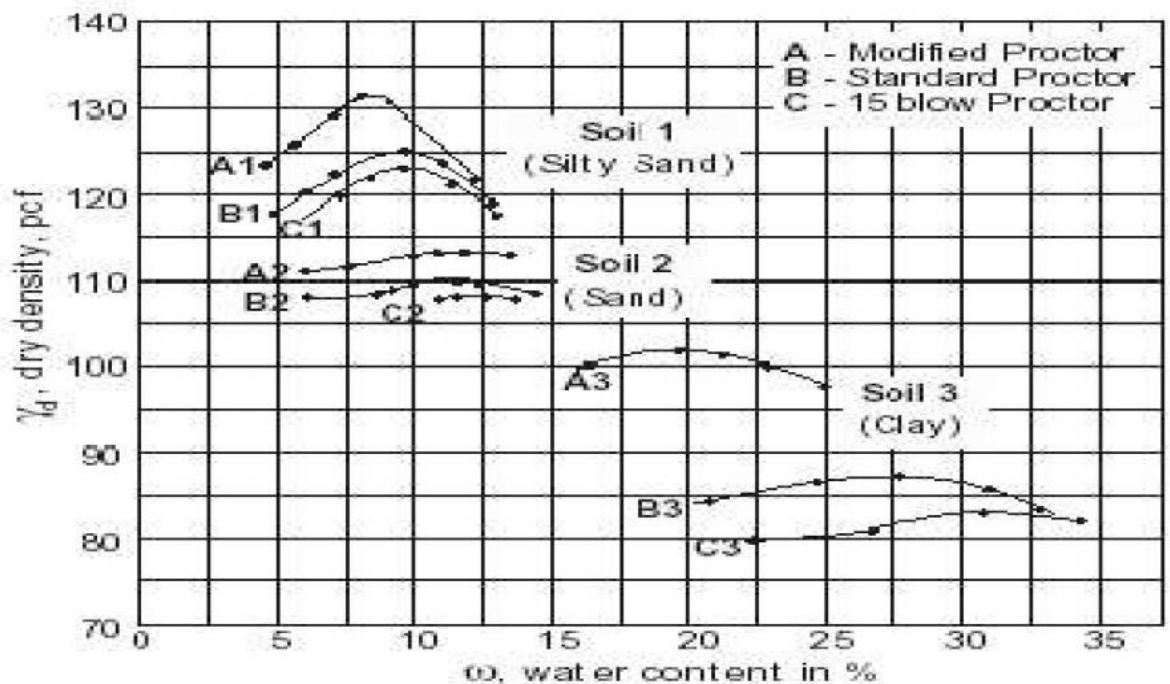


Figure II.4 : l'influence de la nature du sol sur le compactage (Kerfouf, 2012)

2.5 L'essai Proctor :

2.5.1 Introduction :

Les remblais posent à l'ingénieur routier un certain nombre de problèmes, d'où on peut citer :

- La stabilité des talus.
- La résistance des talus à l'érosion.
- Le tassement.
- Le compactage

Chapitre II :Corrélations pour les sols compactés

Le compactage est une réduction pratiquement instantanée du volume du sol du à la réduction des vides d'air. Il ne y'a aucune expulsion d'eau ce qui différencie le compactage de la consolidation. C'est le procédé le plus économique toujours utilisé dans la construction des remblais pour améliorer la densité sèche du sol (γ_d).

L'étude du compactage s'effectue à l'aide d'un damage normalisé connu sous le nom de « l'essai Proctor ».

Les études de laboratoire pratiquées pour la caractérisation des sols compactés utilisés en remblais comportent généralement (**Goual, 2012**) :

- L'essai Proctor,
- L'essai d'indice portant immédiat.

2.5.2 But de l'essai Proctor :

L'essai Proctor à pour but de déterminer, pour un compactage d'intensité donnée, la teneur en eau à laquelle doit être compacté un sol pour obtenir la densité sèche maximum. La teneur en eau ainsi déterminée est appelée « teneur en eau **optimum Proctor** ».

2.5.3 Principe de l'essai Proctor :

L'essai Proctor consiste à compacter dans un moule standard, à l'aide d'une dame standard (**Photo II.3**), et selon un processus bien déterminé, un échantillon du sol à étudier et à déterminer la teneur en eau du sol et sa densité sèche après le compactage.



Photo II.3: le moule Proctor normal et CBR

L'**essai Proctor** est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à des teneurs en eau croissantes (2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12%, 14%, 16%). On détermine ainsi plusieurs points de la courbe représentative des densités sèches en fonction des teneurs en eau. On trace alors la courbe en interpolant entre les points expérimentaux (**Figure II.4**). Elle représente un maximum dont l'abscisse est « la teneur en eau **optimum Proctor** », et l'ordonnée « la densité sèche maximum **Proctor** ».

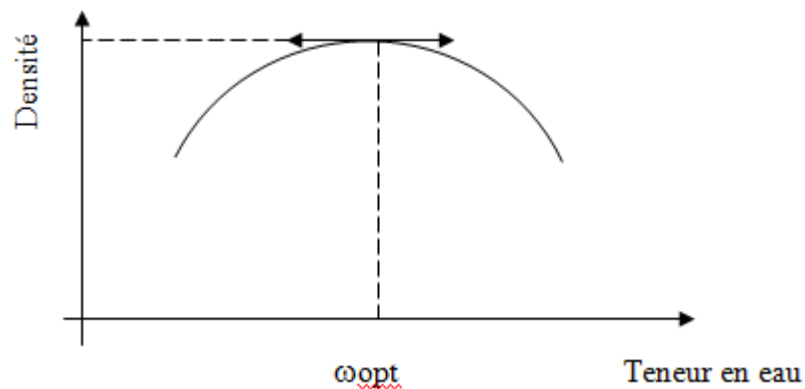


Figure II.4 : Diagramme Proctor simple $\gamma_d=f(\omega)$

Chapitre II :Corrélations pour les sols compactés

On distingue deux courbes Proctor à deux énergies différentes comme l'illustre la **figure II.5** :

La courbe « Proctor Normal » correspondant à l'énergie de 0.6 MN/m^3 selon la norme ASTM D698-91 qui constitue la courbe de référence pour représenter le comportement au compactage des matériaux de remblai ;

La courbe « Proctor Modifié » correspondant à l'énergie de 2.7 MN/m^3 selon la norme ASTM D1557-91. qui constitue la référence pour évaluer le compactage des matériaux des chaussées, pour une même teneur en eau, à une densité plus grande que l'essai Proctor Normal. (Cité par **Benchouk, 2014**).

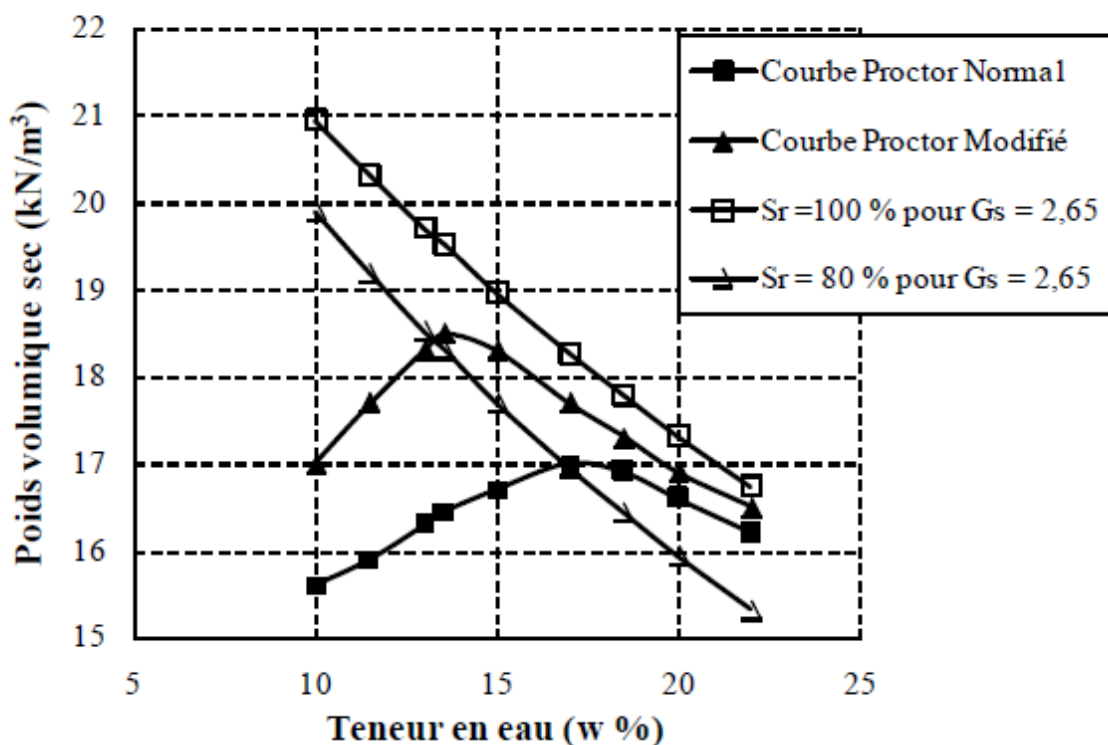


Figure II.6 : Courbes Proctor normal et modifié (Kerfouf, 2012)

L'essai Proctor s'effectue généralement pour deux compactages d'intensités différentes (**Peltier, 1955**) :

✓ **L'essai Proctor normal :**

Le compactage n'est que moyennement poussé. Il est généralement utilisé pour les études de remblais en terre (barrages et digues).

Chapitre II :Corrélations pour les sols compactés

Il s'effectue en trois couches avec « la dame Proctor normal », l'énergie de compactage est de :

- 55 coups de dame par couche dans le moule CBR.
- 25 coups par couche dans le moule Proctor normal.

✓ L'essai Proctor modifié :

Le compactage est beaucoup plus intense ; il correspond en principe au compactage maximum que l'on peut obtenir sur chantier avec les rouleaux à pieds de mouton ou les rouleaux à pneus lourds modernes. C'est ordinairement par l'essai Proctor modifié que l'on détermine les caractéristiques de compactage (teneur en eau optima, densité sèche maxima) des matériaux destinés à constituer la fondation ou le corps de chaussée des routes et des pistes d'aérodromes.

Le compactage dans ce cas la s'effectue en cinq couches successives avec « la dame Proctor modifié » l'énergie de compactage est de :

- 55 coups de dame par couche dans le moule CBR
- 25 coups par couches dans le moule Proctor.

Le tableau suivant donne les caractéristiques de chaque essai :

Tableau II.2 : les caractéristiques des essais de compactage Proctor

Caractéristiques de l'essai	Proctor normal		Proctor modifié	
	Proctor	CBR	Proctor	CBR
Moule				
Masse de la dame (g)	2490	2490	4535	4535
Diamètre du mouton	51	51	51	51
Hauteur de chute (mm)	305	305	457	457
Nombre de couches	3	3	5	5
Nombre de coups/couche	25	56	25	56
Volume éprouvette (cm ³)	933	2758	933	2758

2.5.4 L'indice portant immédiat :

Le principe de l'essai servant à déterminer l'indice portant immédiat IPI consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon pour le faire pénétrer à une vitesse donnée dans une éprouvette de sol étudiée. Cet indice ne constitue pas une caractéristique intrinsèque d'un sol.

En effet, si cette grandeur dépend en partie de la nature du sol. Elle dépend également dans une large mesure de sa teneur en eau, de sa masse volumique sèche, et de son degré de saturation, qui est des caractéristiques d'état fonction de ses caractéristiques de mise en œuvre et d'environnement (**Boutarfa, 2012**)

Sur les chantiers de stabilisation, on exige en général des densités sèches égales à 90% ou 95% de la densité sèche maximum déterminée à l'essai Proctor ; d'où l'importance d'avoir au moment du compactage une teneur en eau très voisine de la teneur en eau optimum.

Cette condition est souvent difficile à remplir, ce qui limite les possibilités de stabilisation des sols : en périodes de pluie, la teneur en eau du sol naturel est généralement supérieure à la teneur optimum, il faut aérer le sol pour le faire sécher ou attendre une période plus sèche. En période sèche les apports d'eau sont importants (la teneur en eau optimum varie entre 6 à 12% selon la nature du sol et l'engin de compactage utilisé).

3. Propriétés des sols compactés :

On distinguera les propriétés immédiates et les propriétés à long terme. Les propriétés immédiates seront celles d'un sol non saturé et les propriétés à long terme seront considérées comme celles d'un sol saturé.

✓ Propriétés mécaniques à court terme (après compactage) :

Après le compactage, si on réalise un essai de poinçonnement CBR (Californian Bearing Ratio) on constate que (**Tisot**) :

- Le module de déformation mesuré sur la première partie de la courbe (assimilable en première approximation à un module d'Young) diminue lorsque la teneur en eau croît.

Chapitre II :Corrélations pour les sols compactés

- La résistance au pic est é peu prés constante du côté sec, puis diminue lorsque l'on s'approche de l'optimum et que l'on le dépasse.

Les valeurs de module de déformation réversible des couches de forme mesurées sur chantier sont des points de référence pour le dimensionnement des chaussées.

✓ Propriétés mécaniques à long terme :

Lorsque l'on se place à long terme, on considèrera que les sols se saturent. Ceci a tendance à gommer partiellement les différences entre le côté sec et le côté humide, cette « homogénéisation » est d'autant plus grande si les sols peuvent gonfler, mais cela n'est évidemment pas recommandé. Si la saturation se fait à volume constant, les différences d'arrangement substituent.

Pour les sols fins, les « tendances » suivantes sont généralement observées :

- Déformabilité moindre du côté sec ;
- Résistance quelque peu supérieure du côté sec ;
- Développement de la pression interstitielle plus grand du côté humide ;
- La compressibilité est plus grande du coté humide dans le domaine des charges assez faibles et le phénomène s'inverse pour les charges plus élevées ; le côté sec montre une pression de consolidation apparente plus élevée ;
- La vitesse de consolidation est plus élevée du côté sec.

3.1 Succion initiale des sols compactés :

(Fleureau et al, 2002) ont étudié la variation de la pression capillaire d'un sol argileux compacté à l'OPN et à l'OPM avec sa limite de liquidité (**Figure II.7**). Pour un même état de consistance (limite de liquidité) les échantillons compactés à l'OPM présentent des valeurs de pression capillaire supérieures que celles compactés à l'OPN.

Pour les sols argileux, la pression capillaire augmente avec la limite de liquidité tandis que, pour les mélanges, le paramètre essentiel est le pourcentage de fins (<80 μm). Dans les argiles, les pressions capillaires à l'OPN ou à l'OPM peuvent atteindre couramment plusieurs

centaines de KPa sont fréquemment observées. Par convention, on considère qu'un séchage à l'étuve correspond à une pression capillaire de 106 KPa.(cité par Goual, 2012).

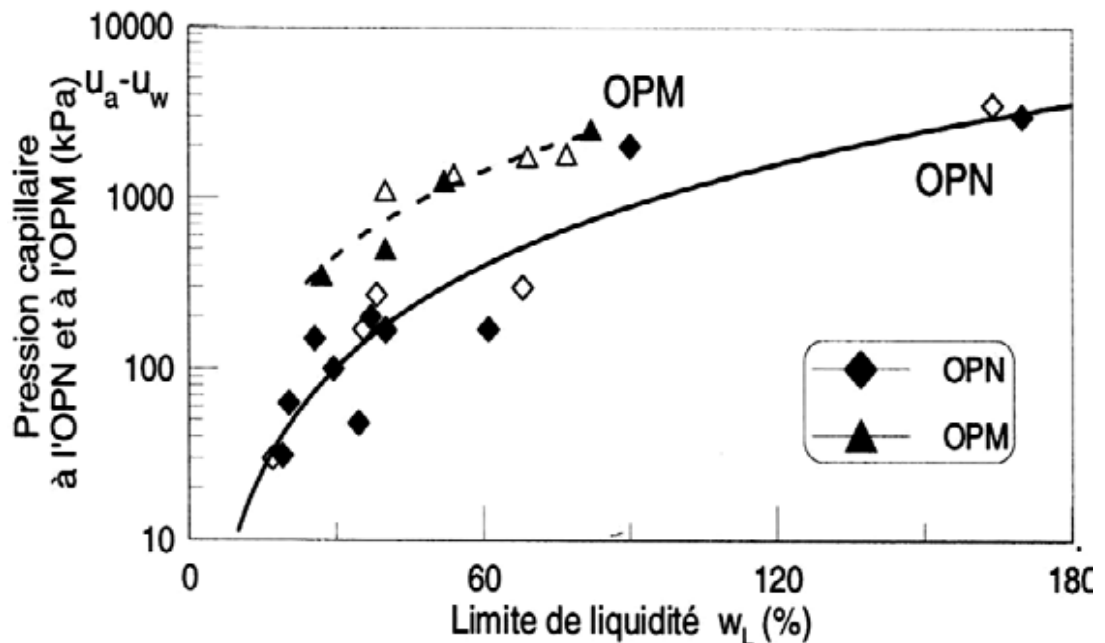


Figure II.6 : variation de la pression capillaire d'un sol argileux compacté à l'OPN et à l'OPM avec sa limite de liquidité (Fleureau et al, 2002)

3.2 La perméabilité des sols compactés :

D'après (Boyton et al, 1985), la perméabilité est plus forte pour les échantillons compactés à des teneurs en eau plus faibles que l'optimum. Typiquement, la perméabilité des échantillons compactés à des teneurs en eau plus faibles que l'optimum peut être 10 à 1000 fois plus forte que ceux compactés à des teneurs en eau plus fortes que l'optimum.

L'ensemble des études effectuées au cours des dernières décades a révèlé que la perméabilité des sols compactés du côté humide par rapport à la teneur en eau notée ω_{opt} , correspondant à la densité sèche maximale, est beaucoup plus faible que celle des sols compactés du côté sec ($\omega < \omega_{opt}$) ; ceci, contrairement à ce que certains auteurs pensaient apparemment auparavant (Caquot et Kérisel, 1996 cité par Gueddouda, 2011).

4. Les corrélations entre les paramètres des sols compactés et les limites d'Atterberg :

4.1 Les limites d'Atterberg :

Les limites d'Atterberg sont des essais qui permettent de définir des indicateurs qualifiant la plasticité d'un sol, et plus précisément de prévoir le comportement des sols pendant les opérations de terrassement, en particulier sous l'action des variations de teneur en eau. Notons que cet essai se fait uniquement sur les éléments fins du sol et il consiste à faire varier la teneur en eau de l'élément en observant sa consistance, ce qui permet de faire une classification du sol.

Suivant la consistance d'un sol remanié, qui est fonction de sa teneur en eau, on distingue 3 états schématisés comme suit :

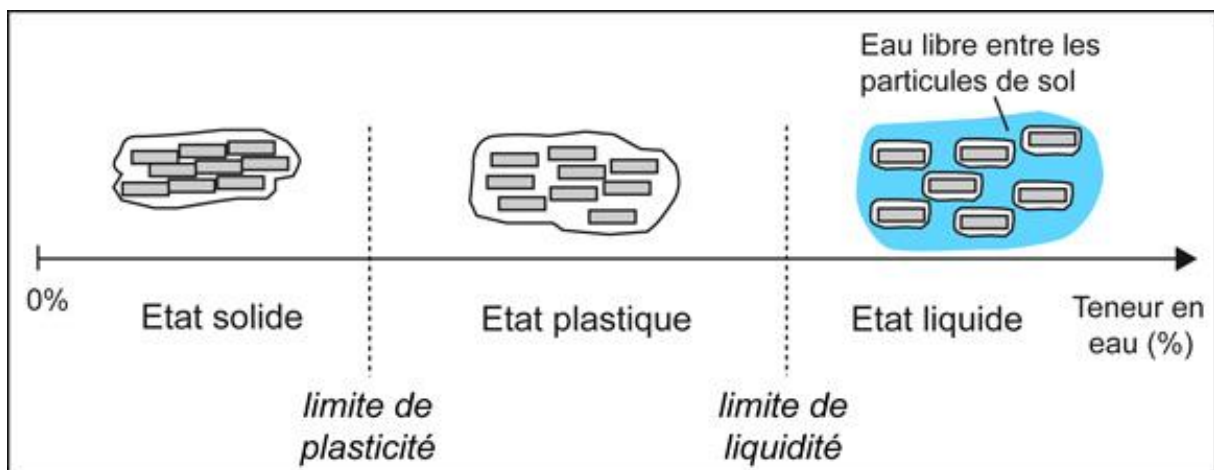


Figure II.7: Les différents états d'un sol

W_R , W_p , W_L sont les limites d'Atterberg déterminées en laboratoire sur la fraction du sol passant au tamis 0.40mm (méthode de la coupelle de Casagrande et du rouleau et appareil de retrait).

A partir de ces limites, on peut déterminer :

- **L'indice de plasticité I_p :**

Chapitre II :Corrélations pour les sols compactés

$$I_p = W_L - W_p$$

- L'indice de consistance I_c :

$$I_c = \frac{W_L - W}{I_p}$$

- L'indice de liquidité :

$$I_L = \frac{W - W_L}{I_p}$$

4.2 Les corrélations entre les paramètres des sols compactés et les limites d'Atterberg :

Le tableau suivant résume les différentes corrélations qui relient entre limites d'Atterberg et les paramètres des sols compactés (**Tableau II.3**) :

Tableau II.3 : les corrélations entre les limites d'Atterberg et les paramètres des sols Compactés (Benchouk, 2015)

L'auteur	ω_L (%)	Corrélations
Popovic (1980) (OPN)	25 à 70	$\rho_{dopt} = \frac{2,7}{1,283 + 0,00818 WL}$ $\omega_{OPT} = 8,14 + 0,257\omega_L$
Blotz (1998) (OPN, OPM)	17 à 170	$\gamma_{dmax} = (2,27 \log \omega_L - 0,94) \cdot \log E - 0,16\omega_L + 17,02$ $\omega_{OPT} = (12,39 - 12,21 \log \omega_L) \cdot \log E + 0,67\omega_L + 9,21$
Fleureau (2002) (OPN)	17 à 170	$\gamma_{dmax} = 21 - 0,113\omega_L + 0,00024(\omega_L)^2$ $\omega_{OPT} = 1,99 + 0,46\omega_L - 0,0012(\omega_L)^2$
Fleureau (2002) (OPM)	17 à 170	$\gamma_{dmax} = 20,56 - 0,086\omega_L + 0,00037(\omega_L)^2$ $\omega_{OPT} = 4,55 + 0,32\omega_L - 0,0013(\omega_L)^2$
Gress (2002) (OPN)	20 à 60	$\rho_{dopt} = 2,09 - 0,00927\omega_L$ $\omega_{OPT} = 7,92 + 0,268\omega_L$
Gugtung (2004) (OPN, OPM)	Sols fins	$\gamma_{dmax} = 22,68 e^{-0,0193 \cdot \omega_L}$ $\omega_{OPT} = [1,95 - 0,38(\log E)] \cdot \omega_p$
Osman (2008) (OPN, OPM)	Sols fins	$\gamma_{dmax} = L - M \cdot \omega_{opt}$ $\omega_{OPT} = [1,99 - 0,165(\ln E)] \cdot I_p$ $L = 14,34 + 1,195 \ln E$ $M = -0,19 + 0,073 \ln E$
Sirvikaya (2008) (OPN)	28 à 74	$\gamma_{dmax} = 0,22(96,32 - \omega_p)$ $\omega_{OPT} = 0,94 \cdot \omega_p$
Nagraraj (2015) (OPN)	$I_p = 12$ à 46	$\gamma_{dmax} = 20,64 - 0,19\omega_p$ $\omega_{OPT} = 0,84\omega_p$
Kumbasar & Togrol (1969)	30 à 100	$\gamma_{dmax} = 2,13 - 0,010\omega_L$ $\omega_{OPT} = 3 + 0,36\omega_L$

5. Les corrélations entre les limites d'Atterberg et la succion :

a. Introduction :

Le sol est un mélange de substances naturelles, comprenant les constituants solides tels que les particules minérales et constituants fluides comme l'air et l'eau. Ces constituants s'interpénètrent et s'influencent réciproquement. Selon la répartition de l'eau ou l'air, le sol peut être soit saturé, soit sec, soit dans un état intermédiaire, qu'on appelle état non saturé. Cet état est caractérisé par la présence d'un potentiel appelé : pression interstitielle négative ou généralement succion. Suivant la taille des constituants solides, le sol peut être classé en trois classes granulométriques, à savoir : les sables, les limons et les argiles (Derfouf, 2014).

5.2 Définition de la succion :

La pression interstitielle négative, encore appelée succion dans un sens plus large, présente la mesure de l'intensité de l'attraction exercée par le sol sur l'eau interstitielle. Elle peut être définie comme la dépression qu'il faut dans un système isotherme, appliqué à l'eau libre pour amener son potentiel à la même valeur que celui de l'eau contenue dans un échantillon de sol libérée de toutes contraintes extérieures (Leclercq et Verbrugge, 1985).

5.3 Les corrélations entre la succion et les limites d'Atterberg à l'optimum Proctor:

Tableau II.4 : corrélations entre les limites d'Atterberg et la succion

Auteurs	W_L	La formule
Fleureau et al (2002)	17 à 170	$U_{wopt} = -0,118(W_L)^{1,98}$ (OPN)
		$U_{wopt} = -1,72(W_L)^{1,64}$ (OPM)
Acar et Nyeretre	-	$U_{wopt} = -69,7(I_p)^{0,58}$

6. Conclusion :

Les sols compactés sont de nature très complexes. On a touché dans ce chapitre, plusieurs aspects touchant les sols compactés : mode de compactage, énergie, difficultés et en dernier lieu les corrélations se rapportant aux sols compactés

Dans le prochain chapitre on va faire une analyse pour les différents matériaux pour vérifier les corrélations citées dans ce chapitre.

Chapitre 3 :

APPLICATION ET ANALYSE CRITIQUE DES CORRELATIONS POUR LES SOLS COMPACTES

1. Introduction :

Les corrélations relatives aux sols compactés sont d'une grande importance dans le métier de l'ingénieur : Estimations dans un avant-projet, contrôle des résultats de mesure, orientation des interprétations des mesures, etc.

Dans ce chapitre on va faire une analyse sur divers types de sols de la wilaya de TLEMCEM, en utilisant les différentes corrélations relatives aux sols compactés (γ_d , ω_{OPT}) qui sont déjà cités dans le chapitre précédent et qu'on rappellera ici rapidement.

2. Optimum Proctor et limites d'Atterberg :

Plusieurs chercheurs ont travaillé pour mettre en évidence des relations entre les paramètres de l'optimum Proctor (γ_d , ω_{OPT}), et les limites d'Atterberg (limite de liquidité ω_L , limite de plasticité ω_P).

Ces relations peuvent faciliter l'estimation des paramètres dans les avant-projets ainsi que pour compléter une information manquante du compactage. Aussi elles pourront faciliter la détermination expérimentale de l'optimum en donnant la quantité d'eau à utiliser pour le premier point (γ_d , ω) de l'essai de compactage.

Il était très difficile d'obtenir une relation simple entre le poids volumique (γ_d) ou la teneur en eau optimale (ω_{OPT}) et une seule limite : liquidité ou plasticité. Et la plupart des auteurs ont étudié une corrélation en fonction des 2 limites (ω_L ou ω_P) qui symbolisent, il est vrai, deux états différents du matériau, mais il y a aussi ceux qui ont trouvé des relations en fonction d'une seule limite.

Néanmoins, nous pouvons retenir les corrélations proposées par quelques auteurs donnant les caractéristiques à l'optimum, et que l'on va utiliser pour notre étude statistique.

Le tableau III.1 présente les corrélations donnant les caractéristiques à l'optimum Proctor normal, et le tableau III.2 présente les corrélations donnant les caractéristiques à l'optimum Proctor modifié :

Tableau III.1 : Les corrélations donnant les caractéristiques à l'optimum Proctor normal (Benchouk, 2015)

L'auteur	ω_L (%)	Corrélations
Popovic (1980)	25à70	$\rho_{dopt} = \frac{2,7}{1,283+0,00818 WL}$ $\omega_{OPT} = 8,14+0,257\omega_L$
Blotz (1998)	17à170	$\gamma_{dmax} = (2,27 \log \omega_L - 0,94) \cdot \log E - 0,16\omega_L + 17,02$ $\omega_{OPT} = (12,39 - 12,21 \log \omega_L) \cdot \log E + 0,67\omega_L + 9,21$
Fleureau (2002)	17à170	$\gamma_{dmax} = 21 - 0,113\omega_L + 0,00024(\omega_L)^2$ $\omega_{OPT} = 1,99 + 0,46\omega_L - 0,0012(\omega_L)^2$
Gress (2002)	20à60	$\rho_{dopt} = 2,09 - 0,00927\omega_L$ $\omega_{OPT} = 7,92 + 0,268\omega_L$
Gugtung (2004)	Sols fins	$\gamma_{dmax} = 22,68 e^{-0,0193 \cdot \omega_L}$ $\omega_{OPT} = [1,95 - 0,38(\log E)] \cdot \omega_p$
Osman (2008)	Sols fins	$\gamma_{dmax} = L - M \cdot \omega_{opt}$ $\omega_{OPT} = [1,99 - 0,165(\ln E)] \cdot I_p$ $L = 14,34 + 1,195 \ln E$ $M = -0,19 + 0,073 \ln E$
Sirvikaya (2008)	28à74	$\gamma_{dmax} = 0,22(96,32 - \omega_p)$ $\omega_{OPT} = 0,94 \cdot \omega_p$
Nagraraj (2015)	$I_p = 12$ à46	$\gamma_{dmax} = 20,64 - 0,19\omega_p$ $\omega_{OPT} = 0,84\omega_p$
Kumbasar&Togrol(1969)	30 à 100	$\gamma_{dmax} = 2,13 - 0,010\omega_L$ $\omega_{OPT} = 3 + 0,36\omega_L$

Tableau III.2 : les corrélations donnant les caractéristiques à l'optimum Proctor modifié (Benchouk, 2015)

L'auteur	ω_L (%)	Corrélations
Blotz (1998)	17à170	$\gamma_{dmax} = (2,27 \log \omega_L - 0,94) \cdot \log E - 0,16\omega_L + 17,02$ $\omega_{OPT} = (12,39 - 12,21 \log \omega_L) \cdot \log E + 0,67\omega_L + 9,21$
Fleureau (2002)	17à170	$\gamma_{dmax} = 20,56 - 0,086\omega_L + 0,00037(\omega_L)^2$ $\omega_{OPT} = 4,55 + 0,32\omega_L - 0,0013(\omega_L)^2$
Gugtung (2004)	Sols fins	$\gamma_{dmax} = 22,68 e^{-0,0193 \cdot \omega_L}$ $\omega_{OPT} = [1,95 - 0,38(\log E)] \cdot \omega_p$
Osman (2008)	Sols fins	$\gamma_{dmax} = L - M \cdot \omega_{opt}$ $\omega_{OPT} = [1,99 - 0,165(\ln E)] \cdot I_p$ $L = 14,34 + 1,195 \ln E$ $M = -0,19 + 0,073 \ln E$

3. Description des caractéristiques des sols utilisés dans l'étude :

La wilaya de TLEMCEN est située au nord-ouest de l'ALGERIE, à 520 Km à l'ouest d'Alger, à 140 Km au sud-ouest d'Oran.

Chapitre III : Application et analyse critique des corrélations pour les sols compactés

Cette étude porte sur plusieurs sites de la wilaya de TLEMCEM. L'ensemble des sites sont reportés sur la carte géographique de la wilaya de Tlemcen (**figure III.1**).

Sur le plan géologique, les sols traités dans cette étude sont surtout constitués :

- d'Argile de moyenne à très grande plasticité surtout à l'ouest de la wilaya comme la ville de Maghnia.
- Des marnes
- Des tufs
- Des déblais

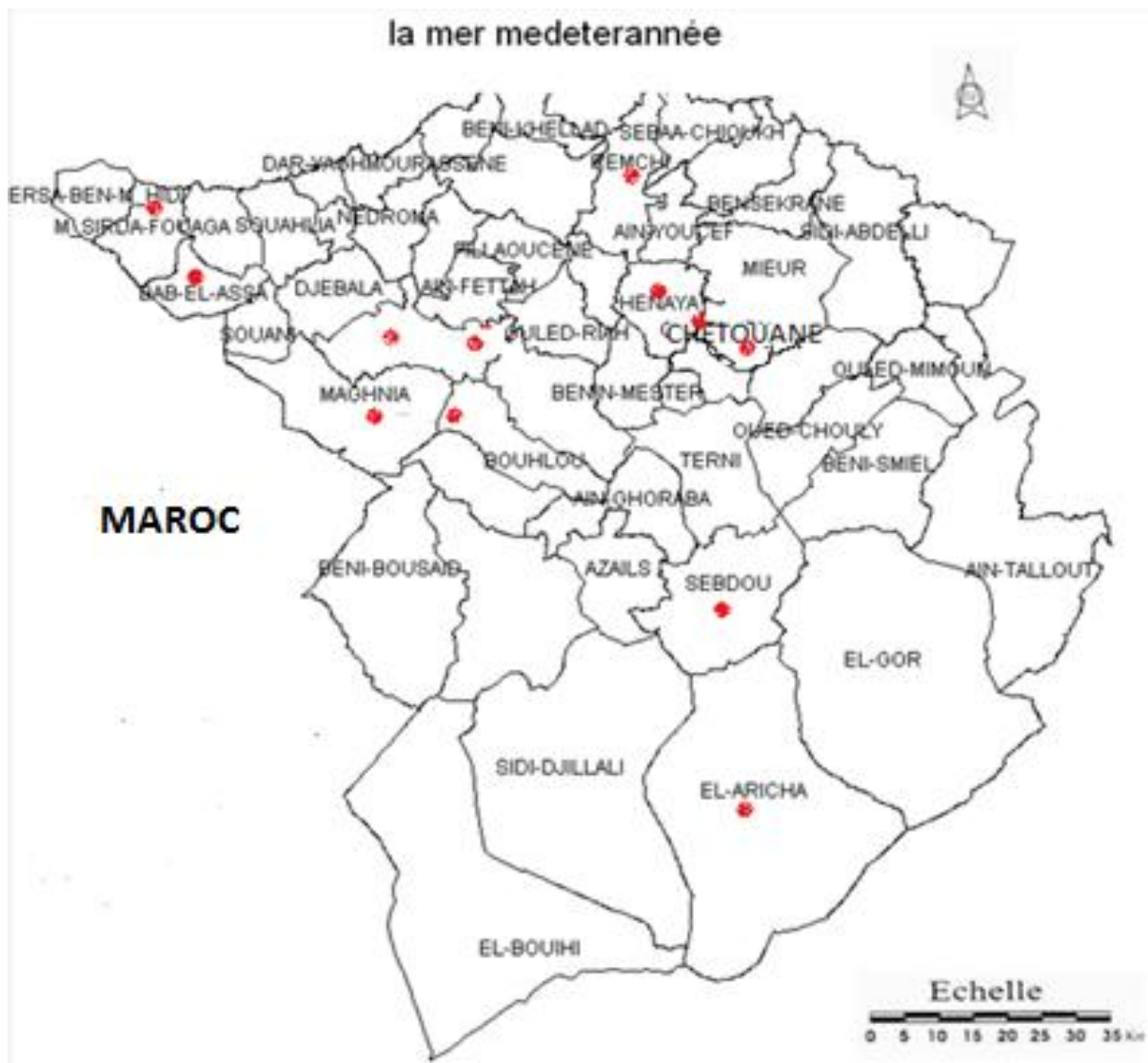


Figure III.1 : Localisation des différents sites traités sur la wilaya de TLEMCEM

On a récolté 73 résultats d'essai Proctor (normal et modifié), ces données sont obtenues à partir de rapports géotechniques issus de différentes sources : laboratoires (LTPO, ...); entreprises (STARR, DENNOUNI,..) et bureaux d'études. Ainsi des résultats des projets de fin d'études (ingénieur, magister, master et thèses de doctorat), qui ont été traitées plus 122 valeurs de la succion des sols compactés.

L'application de corrélations sur les différentes données récoltées a nécessité l'utilisation des paramètres suivants :

- ✓ La limite de liquidité (w_L)
- ✓ La limite de plasticité (w_p)
- ✓ L'indice de plasticité (I_p)
- ✓ La teneur en eau optimale
- ✓ Le poids volumique sec maximum.

En tout dans cette étude, on a manipulé 1898 valeurs.

4. Résultats de l'application des relations de corrélations :

On applique les différentes corrélations citées par divers auteurs sur les essais de cette étude on aura les résultats suivants :

4.1 Estimation des paramètres de l'optimum Proctor normal (OPN) :

Pour l'essai Proctor normal : on a cité 24 études faites sur quelques sites de la wilaya TLEMEN par un essai Proctor normal (OPN), le **Tableau III.3** montre les résultats expérimentaux ainsi que les résultats des paramètres des sols compactés par les corrélations liées à l'essai Proctor normal.

Ces résultats nous ont permis de tracer les graphes suivants pour déduire la meilleure corrélation :

4.1.1 La corrélation de POPOVIC (1980) :

- **La teneur en eau :**

$$\omega_{OPT} = 8,14 + 0,257\omega_L \quad ; \omega_L = 25 \text{ à } 70$$

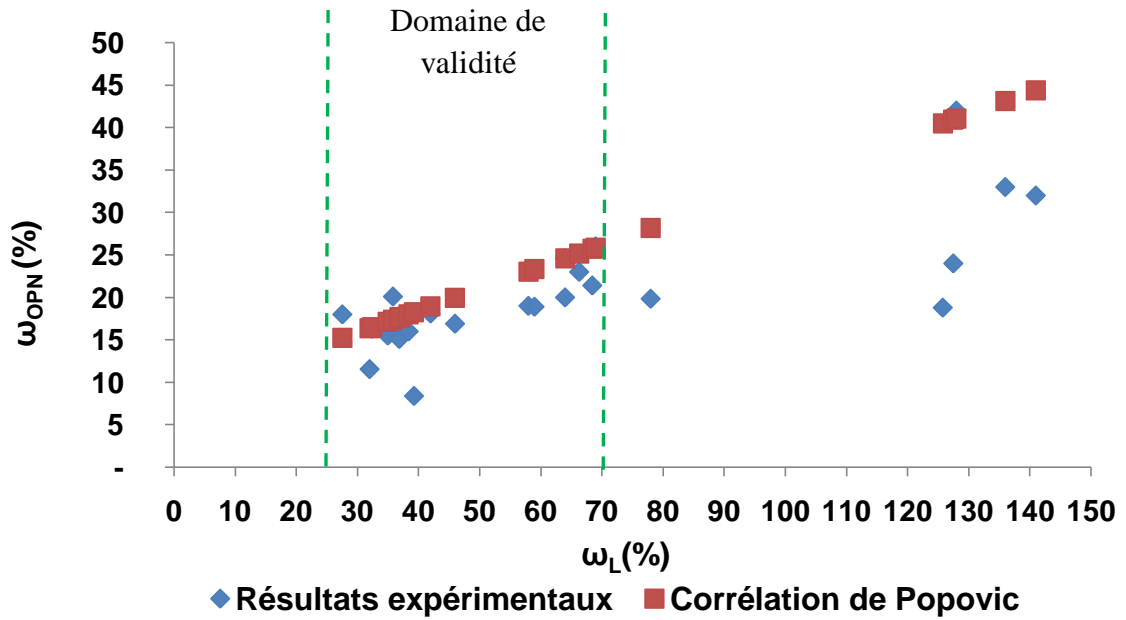


Figure III.2 : Comparaison entre les teneurs en eau optimales mesurées et estimées par la corrélation de POPOVIC (1980)

- **Le poids volumique sec :**

$$\rho_{dopt} = \frac{2,7}{1,283 + 0,00818WL} \quad ; \quad \omega_L = 25 \text{ à } 70$$

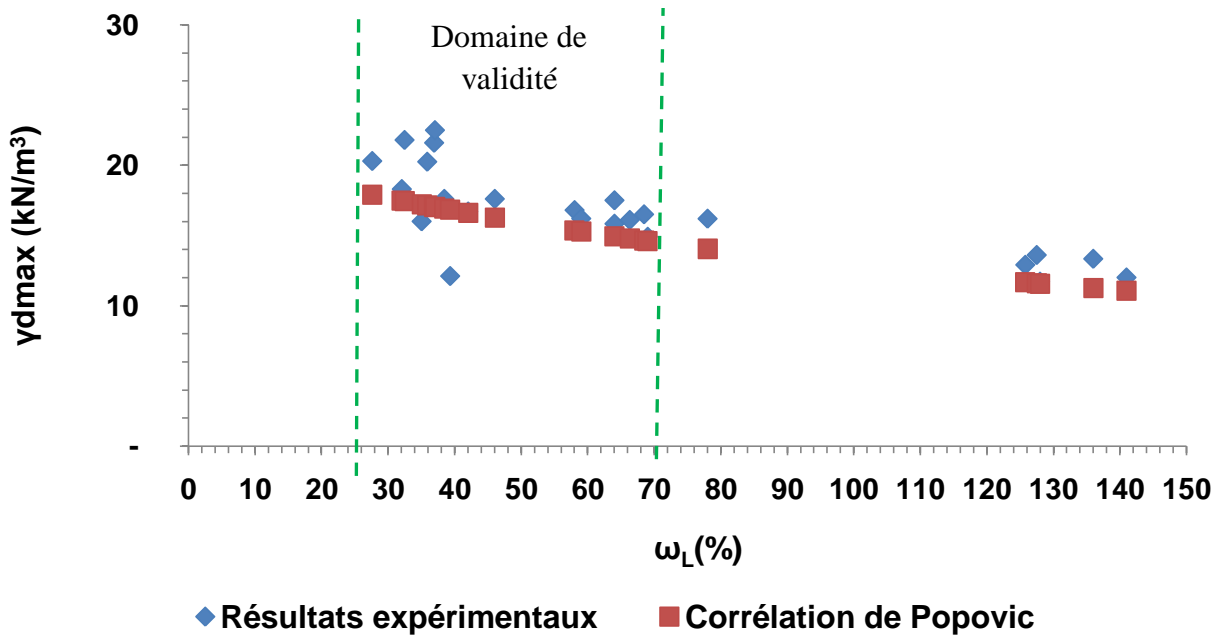


Figure III.3 : Comparaison entre les densités sèches maximales mesurées et estimées par la corrélation de POPOVIC (1980)

On remarque que la corrélation est valable pour nos échantillons sur son domaine de validité, quand on commence à dépasser $\omega_L=70\%$ on remarque qu'il y a une dispersion entre les résultats expérimentaux et les résultats calculés par la corrélation de POPOVIC, cette différence est plus visible pour la teneur en eau à l'optimum que pour le paramètre poids volumique sec.

4.1.2 La corrélation de BLOTZ(1998) :

- **La teneur en eau :**

$$\omega_{OPT}=(12,39-12,21\log \omega_L).\log E+0,67\omega_L+9,21 \quad ; \quad \omega_L = 17\text{à}170$$

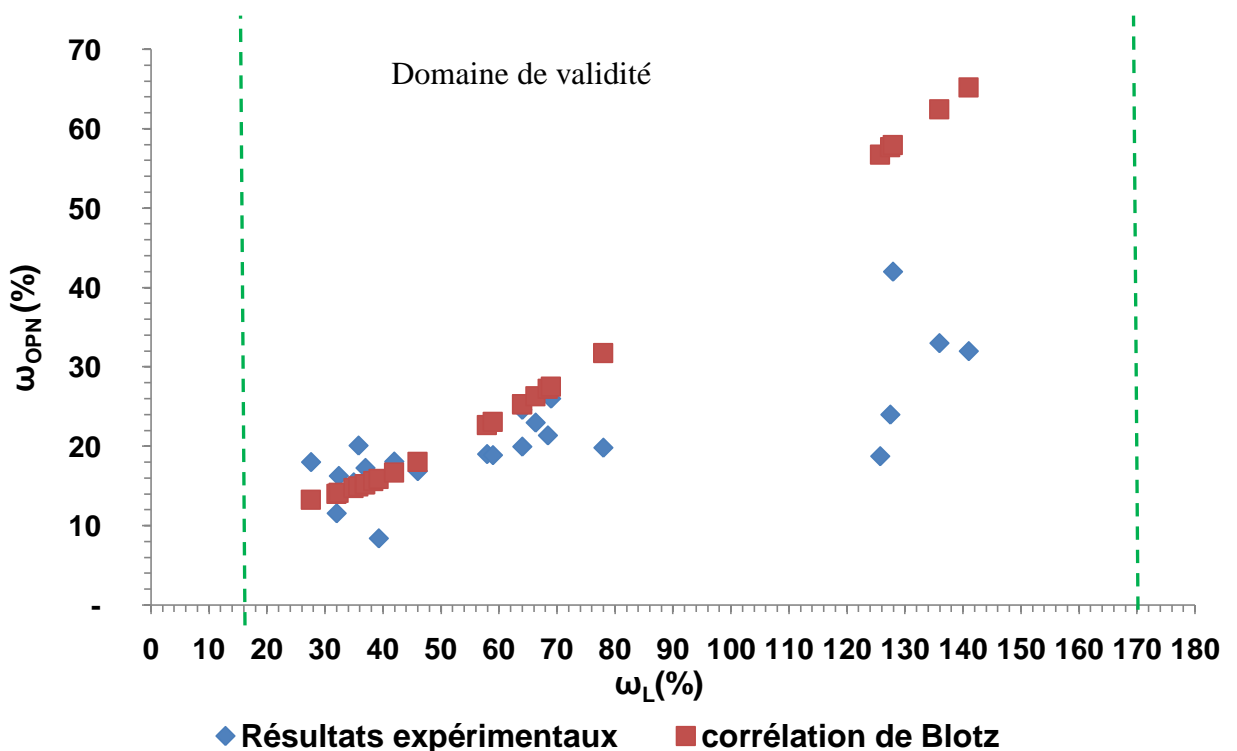


Figure III.4 : Comparaison entre les teneurs en eau optimales mesurées et estimées par la corrélation de BLOTZ (1998)

- **Le poids volumique sec :**

$$\gamma_{dmax} = (2,27 \log \omega_L - 0,94) \cdot \log E - 0,16 \omega_L + 17,02 \quad ; \quad \omega_L = 17 \text{ à } 170$$

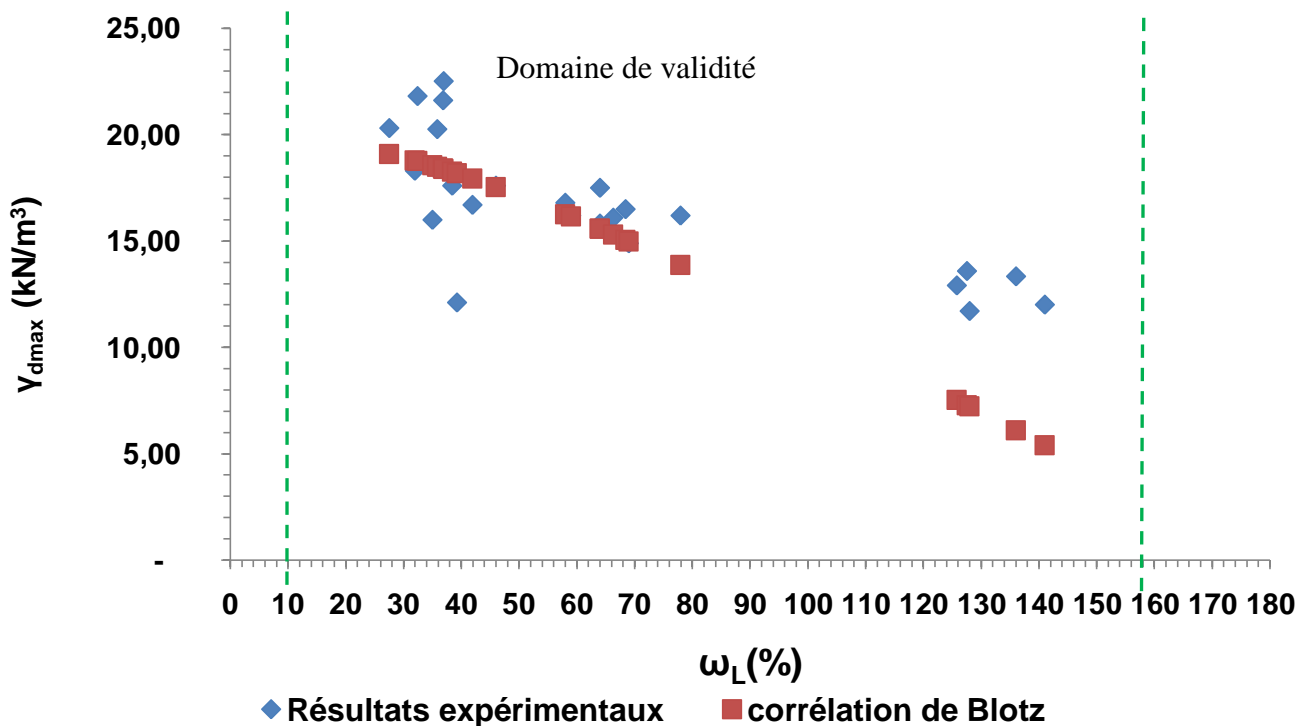


Figure III.5 : Comparaison entre les densités sèches maximales mesurées et estimées par la corrélation de BLOTZ (1998)

Le domaine de validité de cette corrélation est de 17% à 170%. On constate que cette relation reproduit assez bien les données expérimentales pour les sols ayant une limite de liquidité variant de 17 à 74 %.

4.1.3 La corrélation de FLEUREAU (2002):

- **La teneur en eau :**

$$\omega_{OPN} = 1,99 + 0,46 \omega_L - 0,0012 (\omega_L)^2 \quad ; \quad 17 < \omega_L < 170$$

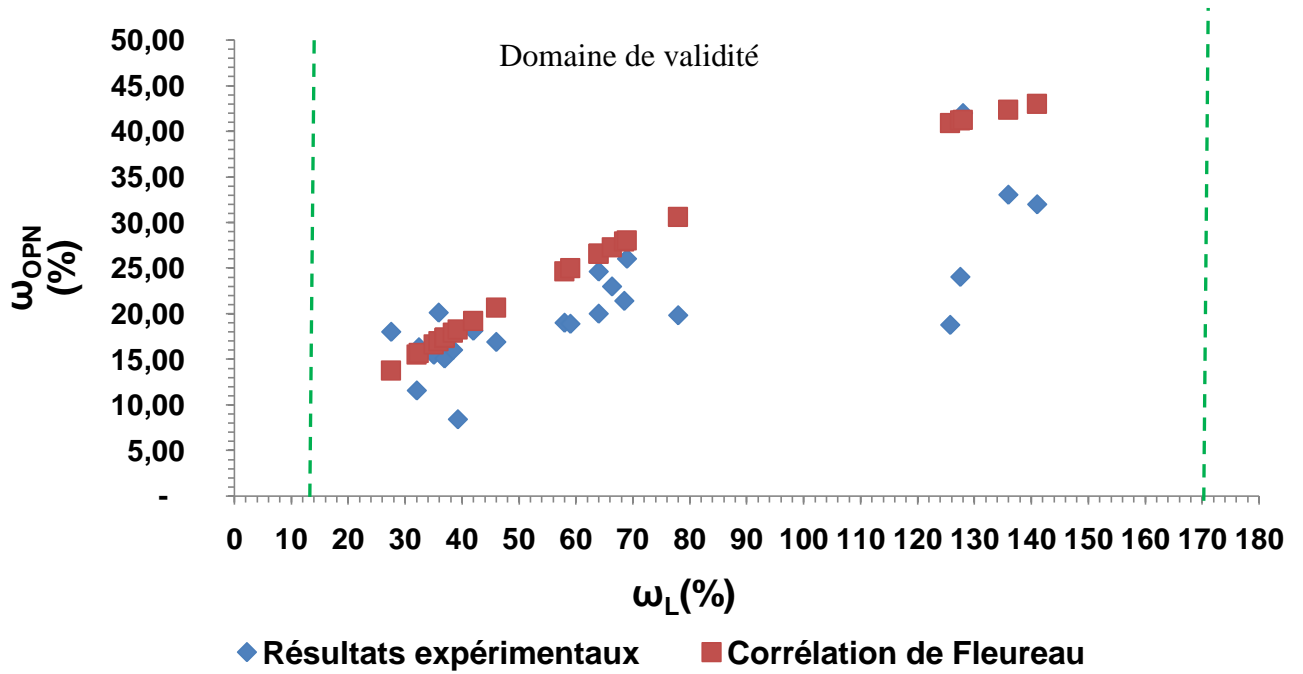


Figure III.6 : Comparaison entre les teneurs en eau optimales mesurées et estimées par la corrélation de FLEUREAU (2002)

- **Le poids volumique sec :**

$$\gamma_{dmax} = 21 - 0,113\omega_L + 0,00024(\omega_L)^2 \quad ; \quad 17 < \omega_L < 170$$

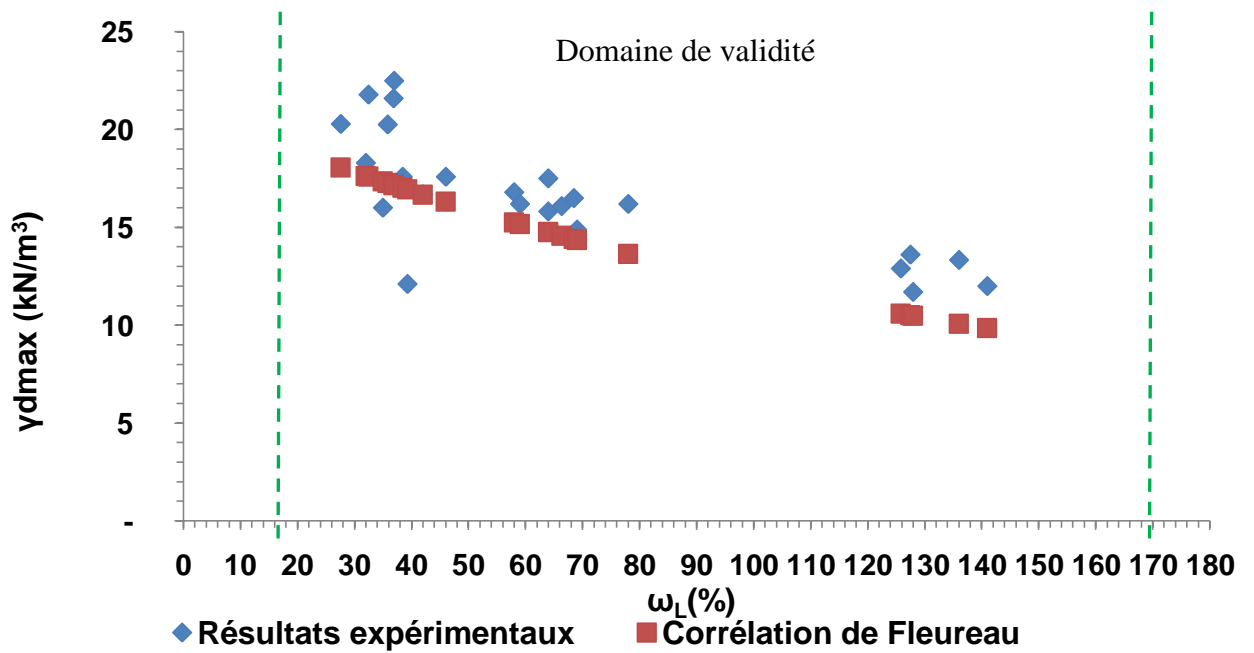


Figure III.7 : Comparaison entre les densités sèches maximales mesurées et estimées par la corrélation de FLEUREAU (2002)

Le domaine de validité de cette corrélation est de ω_L de 17% à 170%, mais dans notre cas elle est valable que pour une limite de liquidité ω_L de 32% à 74% pour la teneur en eau et la densité sèche.

4.1.4 La corrélation de GRESS (2002) :

- **La teneur en eau :**

$$W_{OPN}=7,92+0,268\omega_L \quad ; \quad 20 < \omega_L < 60$$

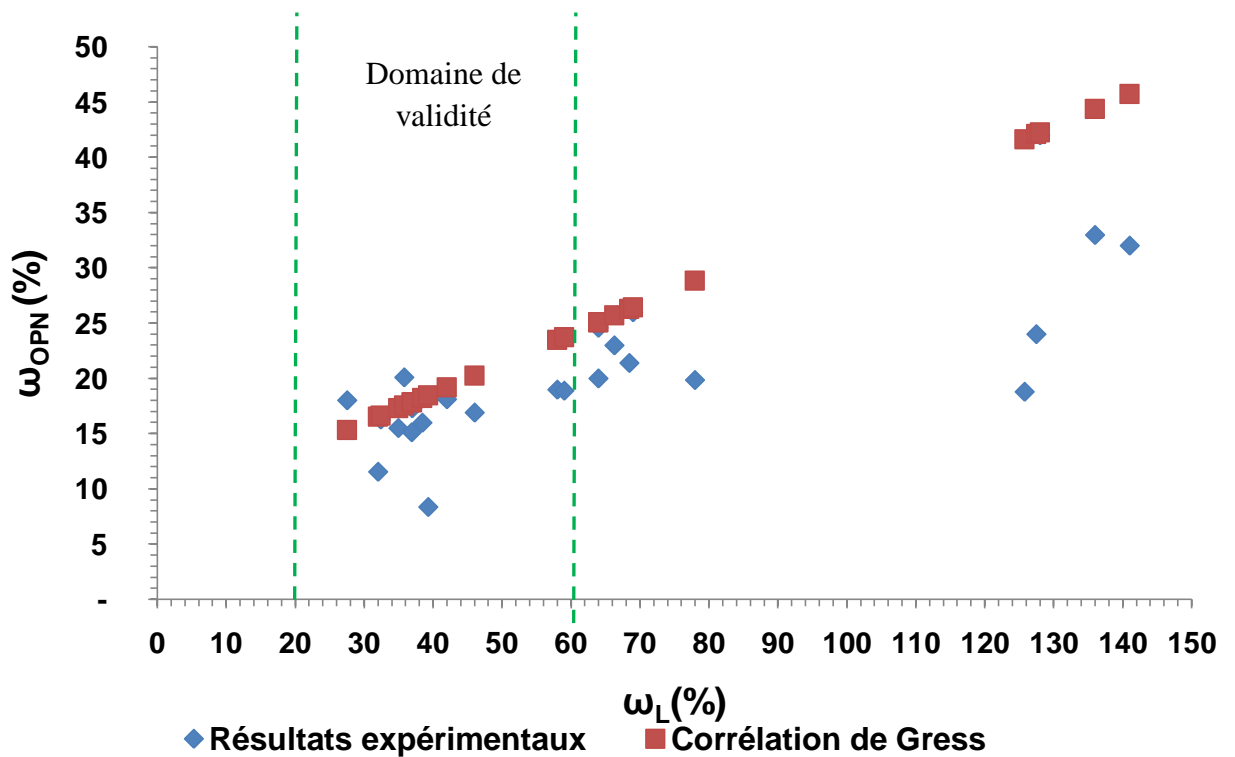


Figure III.8 : Comparaison entre les teneurs en eau optimales mesurées et estimées par la corrélation de GRESS (2002)

- **Le poids volumique sec :**

$$\gamma_{dopt} = (2,09 - 0,00927 \omega_L) \times 10 ; \quad 20 < \omega_L < 60$$

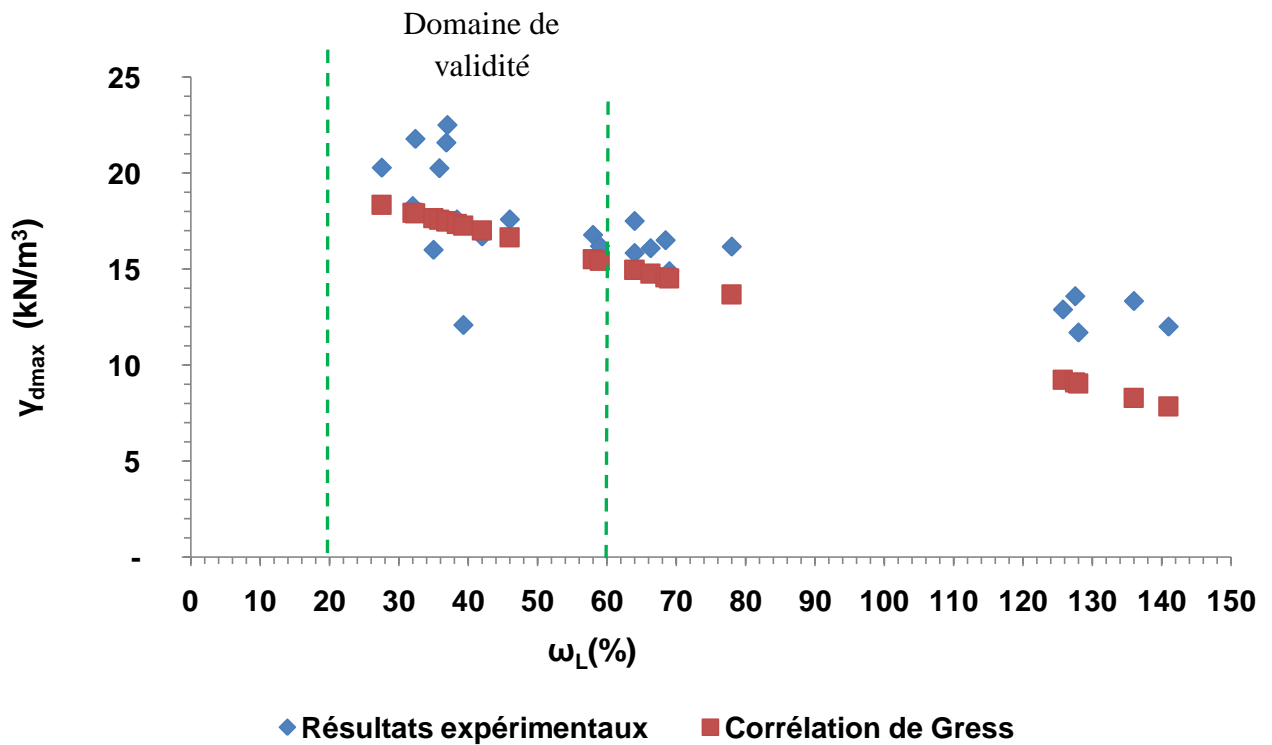


Figure III.9 : Comparaison entre les densités sèches maximales mesurées et estimées par la corrélation de GRESS(2002)

Le domaine de validité de la corrélation de GRESS est de limite de liquidité entre 20% et 60%, mais dans notre cas elle est valable jusqu'à 74%.

4.1.5 La corrélation de GURTUNG (2004) :

Le domaine de validité= Sols fins

- **La teneur en eau :**

$$W_{OPN} = [1,95 - 0,38(\log E)] \cdot \omega_P$$

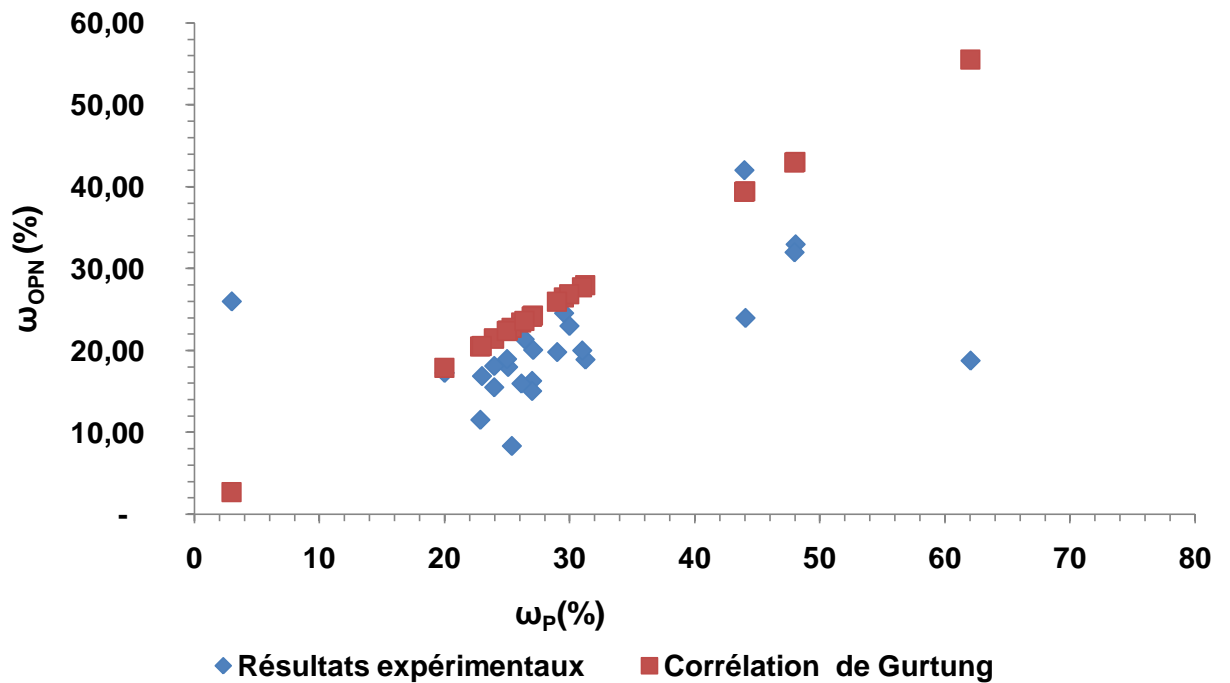


Figure III.10 : Comparaison entre les teneurs en eau optimales mesurées et estimées par la corrélation de GURTUNG (2004)

- **Le poids volumique sec :**

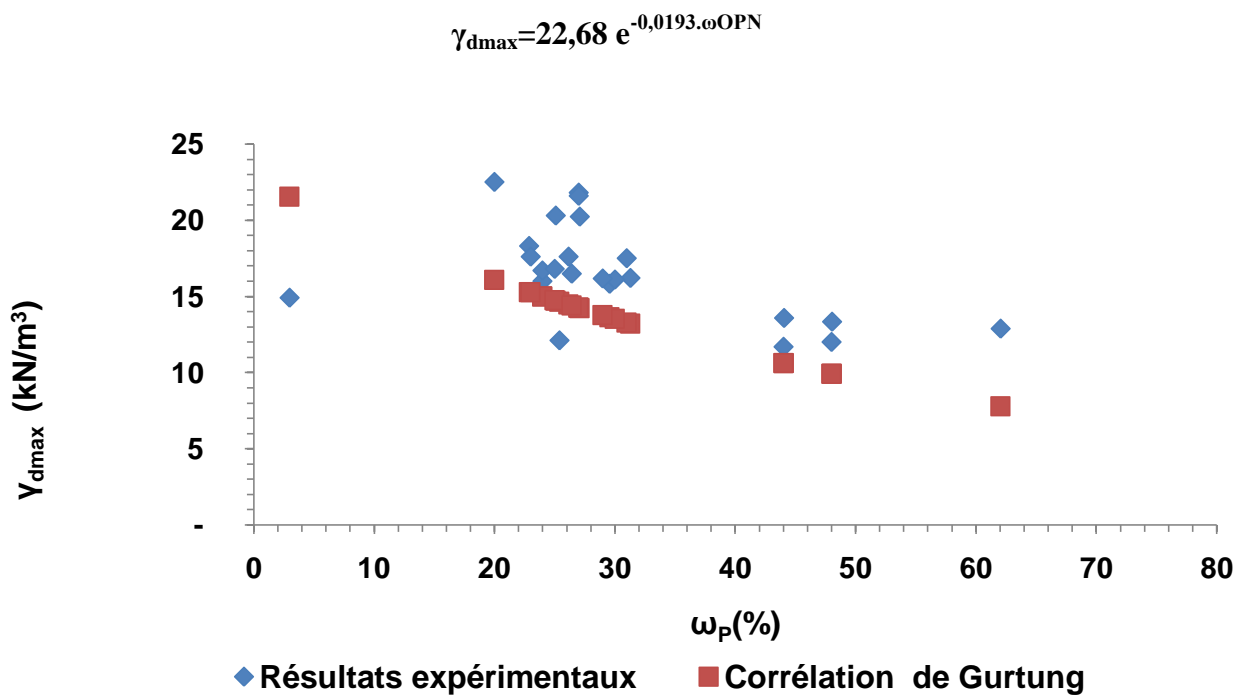


Figure III.11 : Comparaison entre les densités sèches maximales mesurées et estimées par la corrélation de GURTUNG (2004)

La corrélation de GURTUNG est en fonction de la limite de plasticité, elle est applicable pour tous les sols fins mais pour notre étude elle donne des estimations proches de résultat de l'essai que pour les sols ayant une limite de plasticité entre 20% et 46% pour la teneur en eau, et entre 22% et 46% pour la densité sèche.

4.1.6 La corrélation d'OSMAN (2004) :

Le domaine de validité= Sols fins

- **La teneur en eau :**

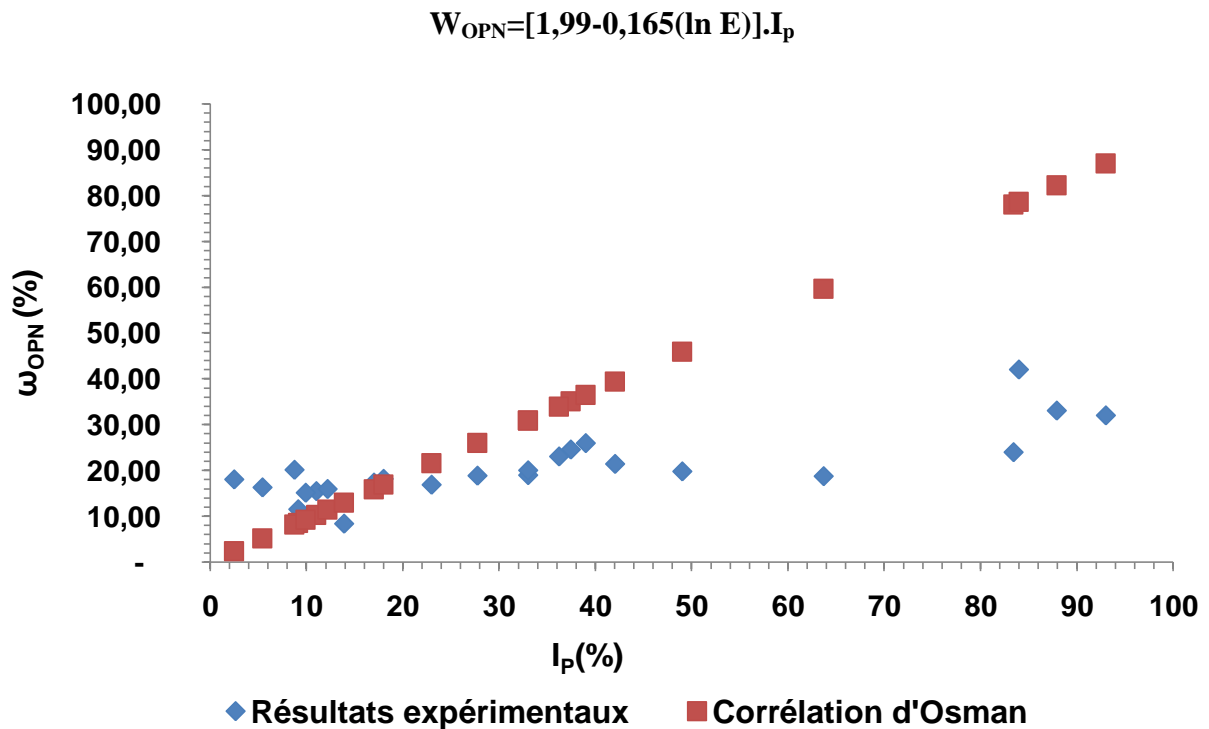


Figure III.12 : Comparaison entre les teneurs en eau optimales mesurées et estimées par la corrélation d'OSMAN (2004)

- **Le poids volumique sec :**

$$\gamma_{dmax}=L-M.\omega_{OPN}$$

Avec : $L=14,34+1,195.\ln E$

$M=-0,19+0,073.\ln E$

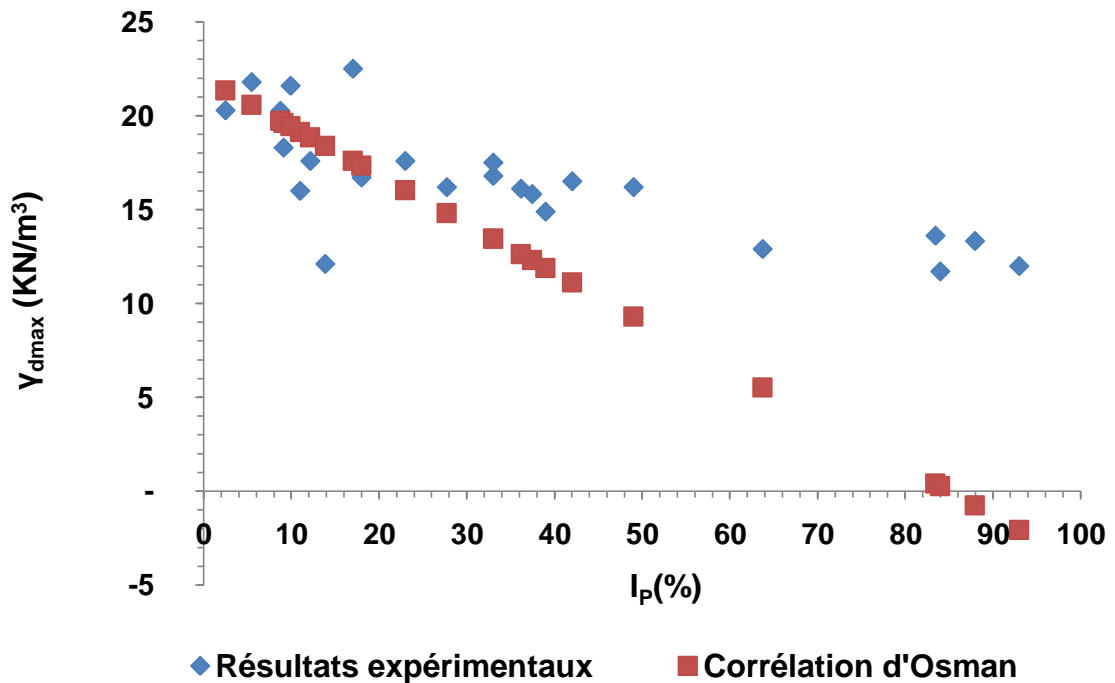


Figure III.13 : Comparaison entre les densités sèches maximales optimales mesurées et estimées par la corrélation d'OSMAN (2004)

Cette corrélation est valable pour les sols fins, elle est en fonction de l'indice de plasticité, mais dans notre étude elle est valable que sur un intervalle d'indice de plasticité de 8% à 20% pour la teneur en eau et la densité sèche.

4.1.7 La corrélation de SIVRIKAYA (2008):

- **La teneur en eau :**

$$\omega_{OPN} = 0,94 \cdot \omega_p \quad ; \quad 28 < \omega_L < 74$$

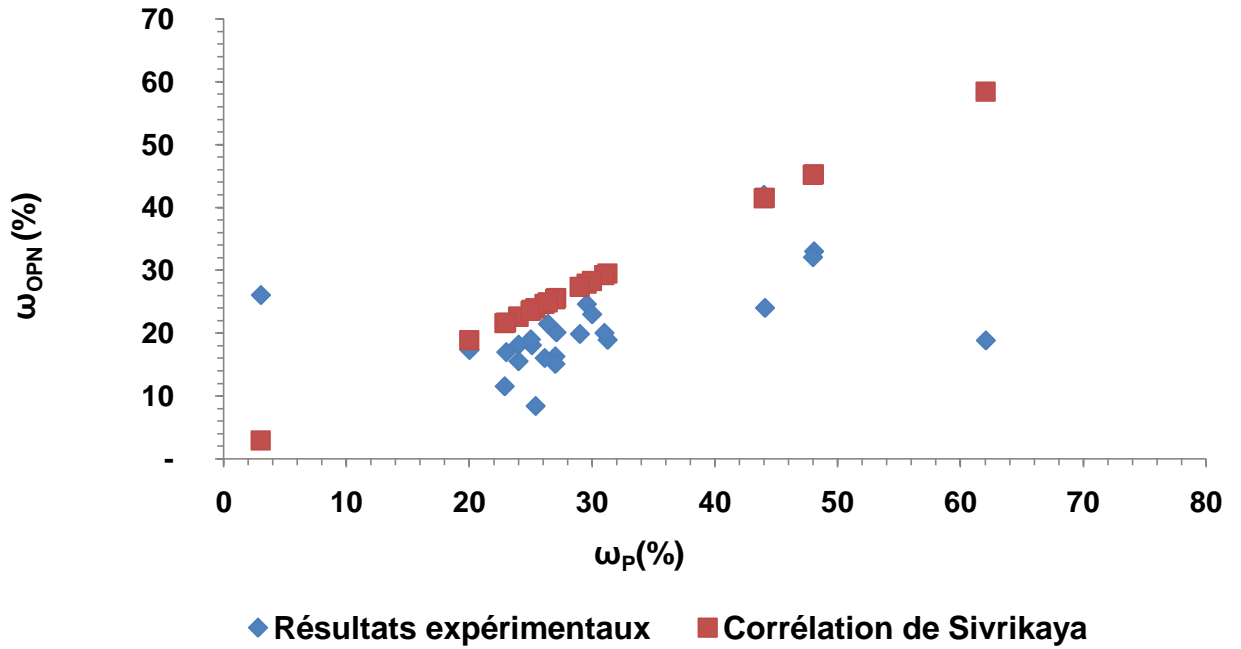


Figure III.14 : Comparaison entre les teneurs en eau optimales mesurées et estimées par la corrélation de SIVRIKAYA (2008)

• **Le poids volumique sec :**

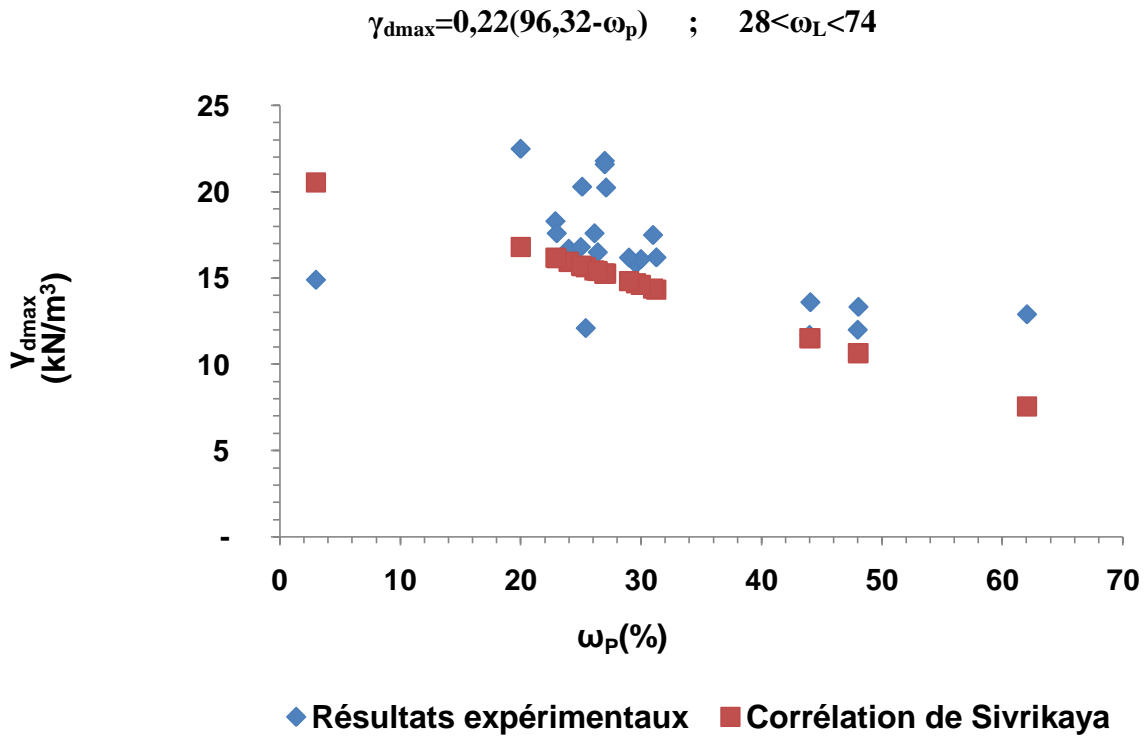


Figure III.15 : Comparaison entre les densités sèches maximales mesurées et estimées par la corrélation de SIVRIKAYA (2008)

Cette corrélation est valide sur un domaine de limite liquidité entre 28% et 74%, elle est en fonction de la limite de plasticité, mais dans notre étude elle est valable que sur un intervalle de ω_p de 20% à 34% pour la teneur en eau, et un intervalle de ω_p de 22% à 34% pour la densité sèche.

4.1.8 La corrélation de NAGRARAJ (2015):

- **La teneur en eau :**

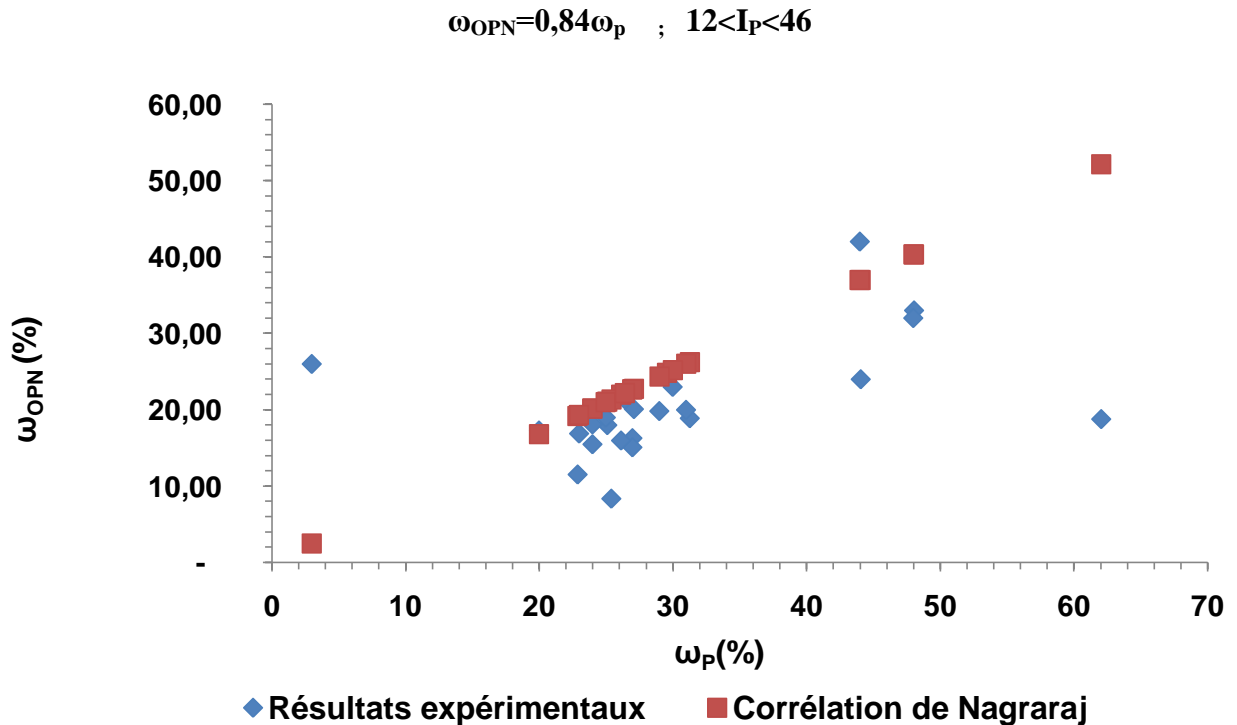


Figure III.16 : Comparaison entre les teneurs en eau optimales mesurées et estimées par la corrélation de NAGRARAJ (2015)

- **Le poids volumique sec :**

$$\gamma_{dmax}=20,64-0,19\omega_p \quad ; \quad 12 < I_p < 46$$

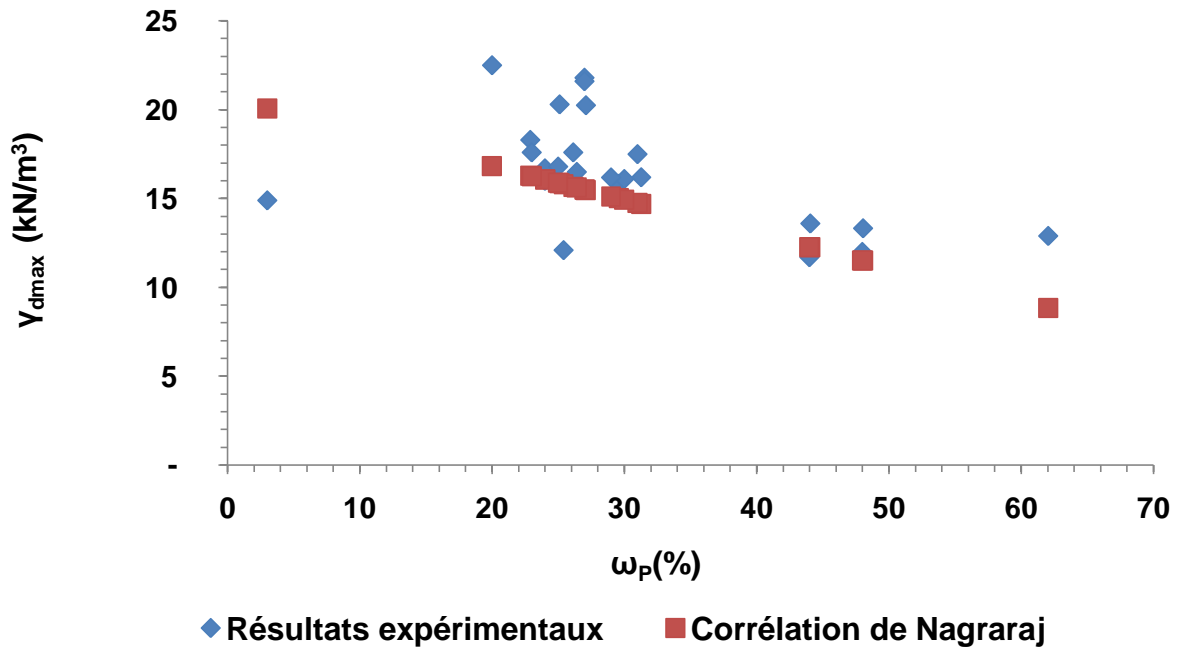


Figure III.17 : Comparaison entre les densités sèches maximales mesurées et estimées par la corrélation de NAGRARAJ (2015)

Le domaine de validité de la corrélation de NAGRARAJ est entre un indice de plasticité de 12% à 46%, elle est en fonction de la limite de plasticité, elle est valable dans notre étude sur un intervalle de 22% à 34% de ω_p pour la teneur en eau et la densité sèche.

4.1.9 La corrélation de KUMBASAR et TOGROL (1969) :

- **La teneur en eau :**

$$\omega_{OPN} = 3 + 0,36\omega_L \quad ; \quad 30 < \omega_L < 100$$

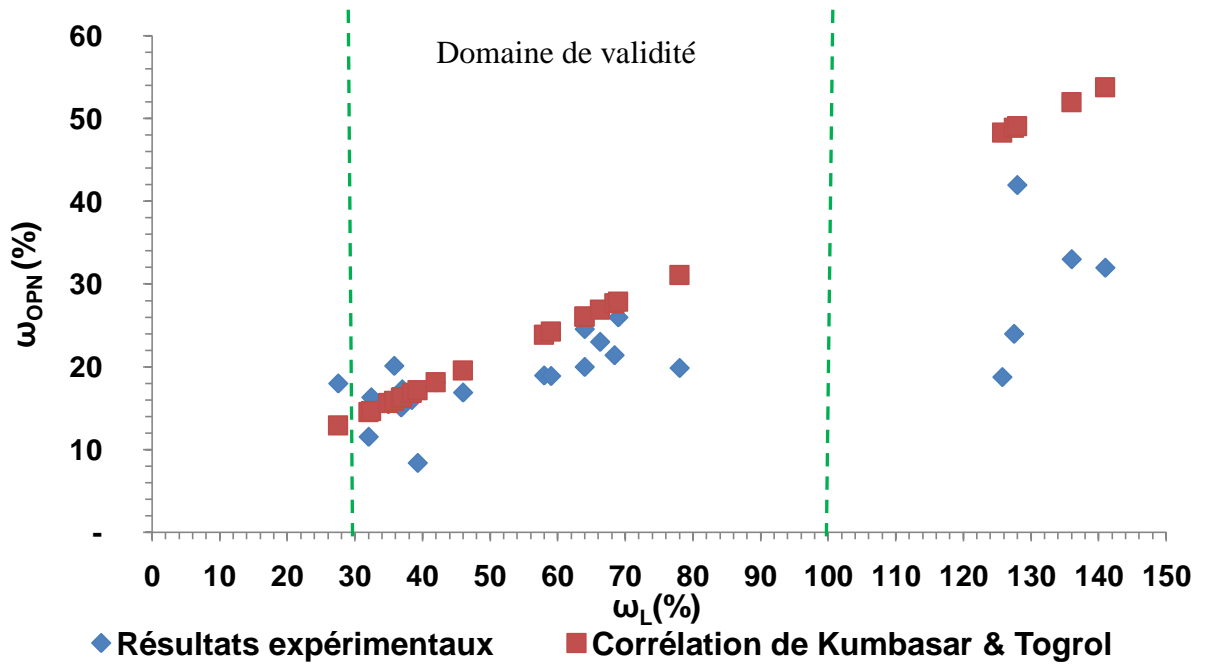


Figure III.18 : Comparaison entre les teneurs en eau optimales mesurées et estimées par la corrélation de KUMBASAR & TORGOL (1969)

- **Le poids volumique sec :**

$$\gamma_{dmax} = 2,13 - 0,010\omega_L \quad ; \quad 30 < \omega_L < 100$$

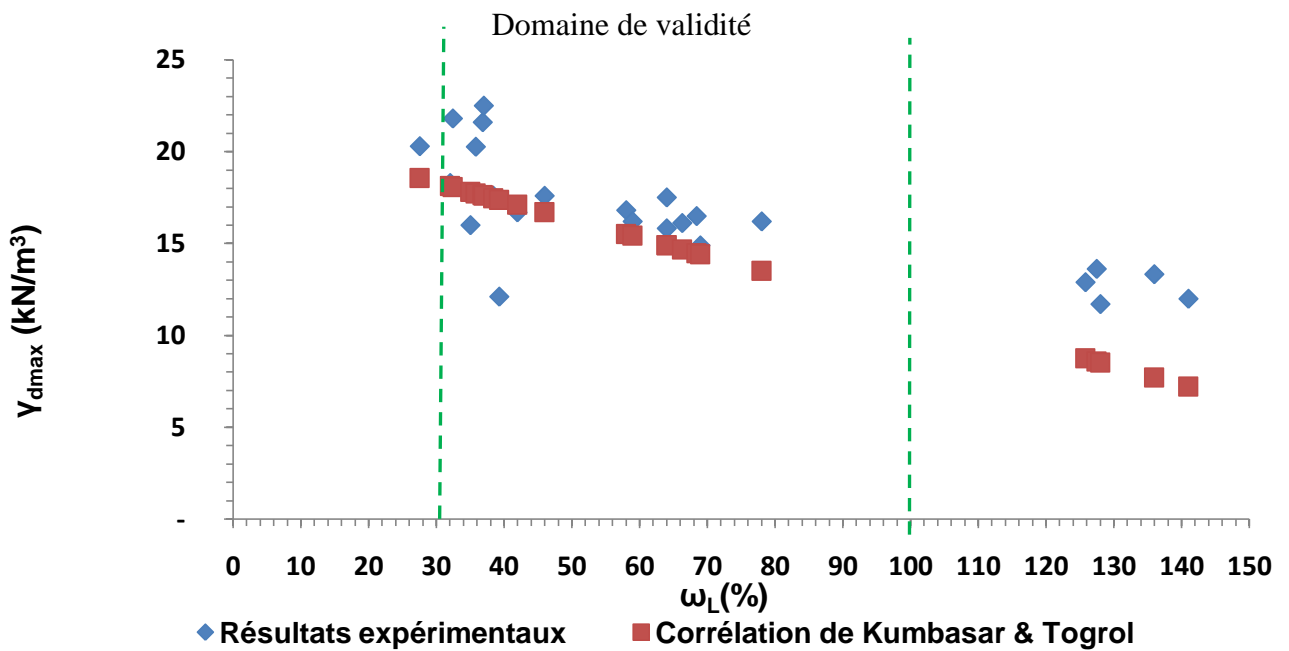


Figure III.19 : Comparaison entre les densités sèche maximales mesurées et estimées par la corrélation de KUMBASAR & TORGOL (1969)

La corrélation de KUMBASAR & TORGOL est valable dans notre étude sur un intervalle de 30% à 74% pour la teneur en eau et la densité sèche.

4.2 Estimations des paramètres de l'optimum Proctor modifié :

Pour l'essai Proctor modifié : on a cité 49 études faites sur quelques sites de la wilaya de TLEMCEM par un essai Proctor modifié (OPM), le **Tableau III.4** montre les résultats expérimentaux ainsi les résultats des paramètres des sols compactés par les corrélations liées à l'essai Proctor modifié.

L'application des corrélations à l'OPM nous donne les résultats suivants :

4.2.1 La corrélation de BLOTZ (1998) :

- **La teneur en eau :**

$$\omega_{OPN} = (12,39 - 12,21 \log \omega_L) \cdot \log E + 0,67 \omega_L + 9,21 \quad ; \quad 17 < \omega_L < 170$$

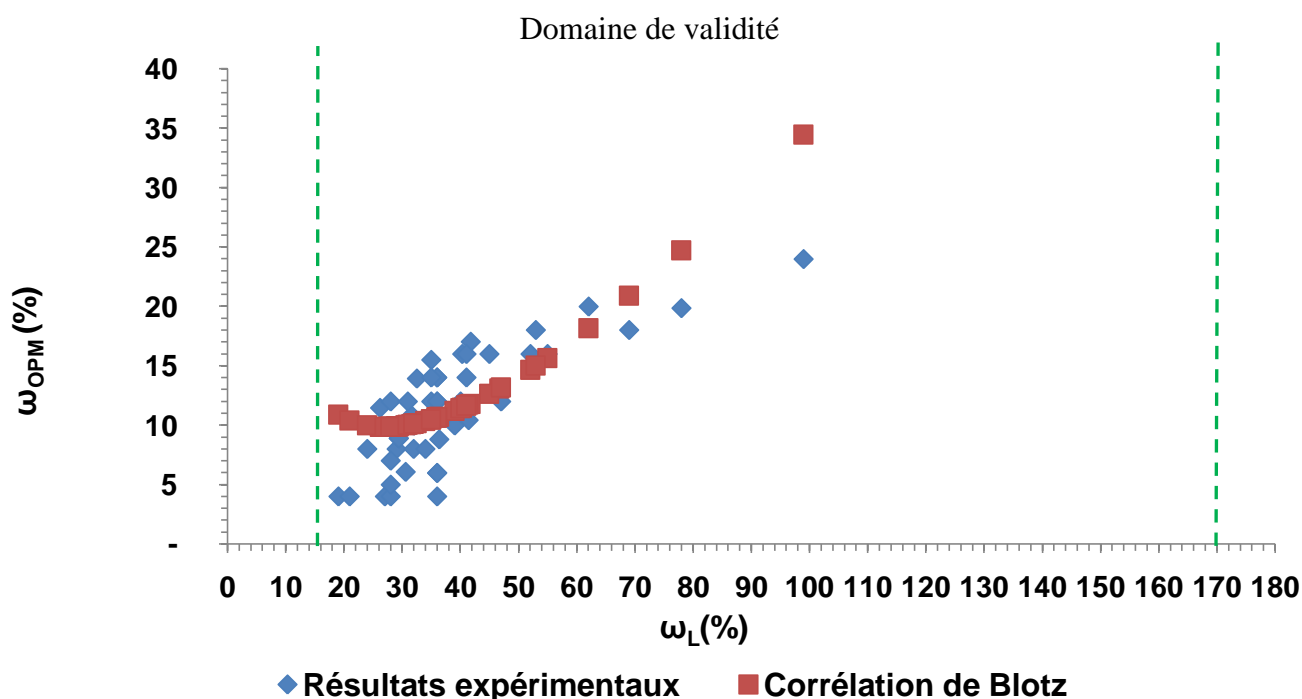


Figure III.20 : Comparaison entre les teneurs en eau optimales mesurées et estimées par la corrélation de BLOTZ

- **Le poids volumique sec :**

$$\gamma_{dmax} = (2,27 \log \omega_L - 0,94) \cdot \log E - 0,16 \omega_L + 17,02 \quad ; \quad 17 < \omega_L < 170$$

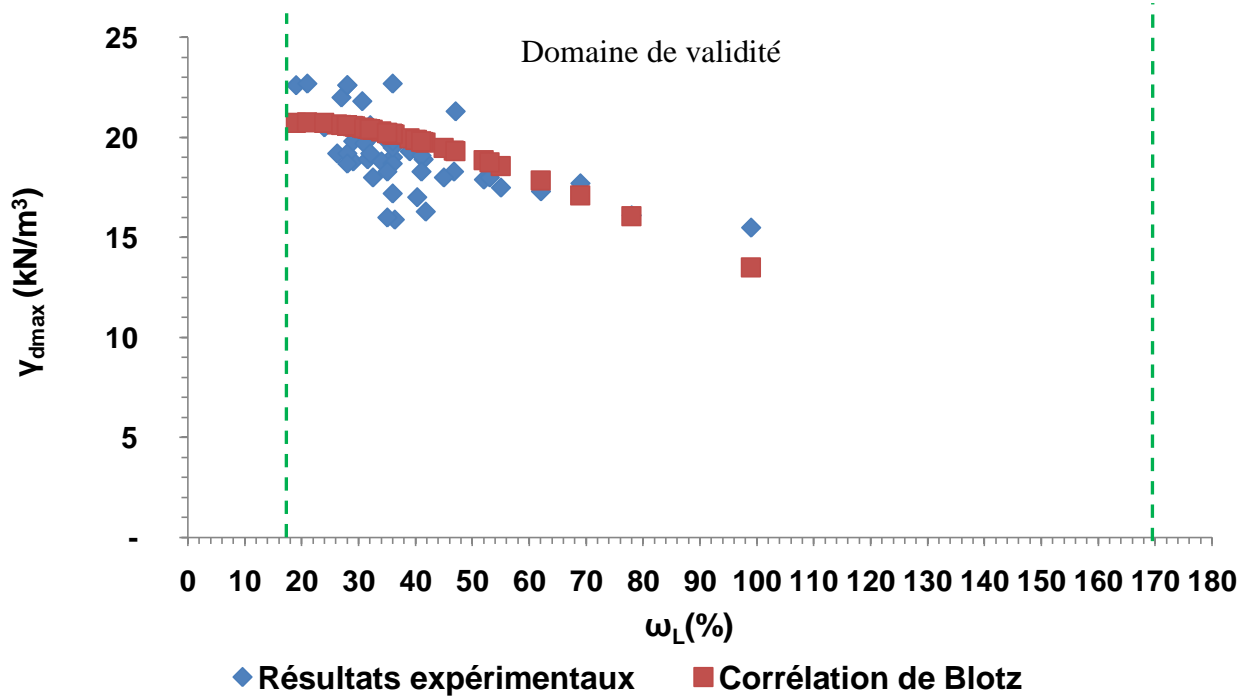


Figure III.21 : Comparaison entre les densités sèches maximales mesurées et estimées par la corrélation de BLOTZ (1998)

A l'optimum Proctor modifié, le domaine de validité pour notre étude est entre une limite de liquidité de 24% à 66% pour la teneur en eau et la densité sèche.

4.2.2 La corrélation de FLEUREAU (2002) :

- **La teneur en eau :**

$$\omega_{OPN} = 4,55 + 0,32 \omega_L - 0,0013 (\omega_L)^2 \quad ; \quad 17 < \omega_L < 170$$

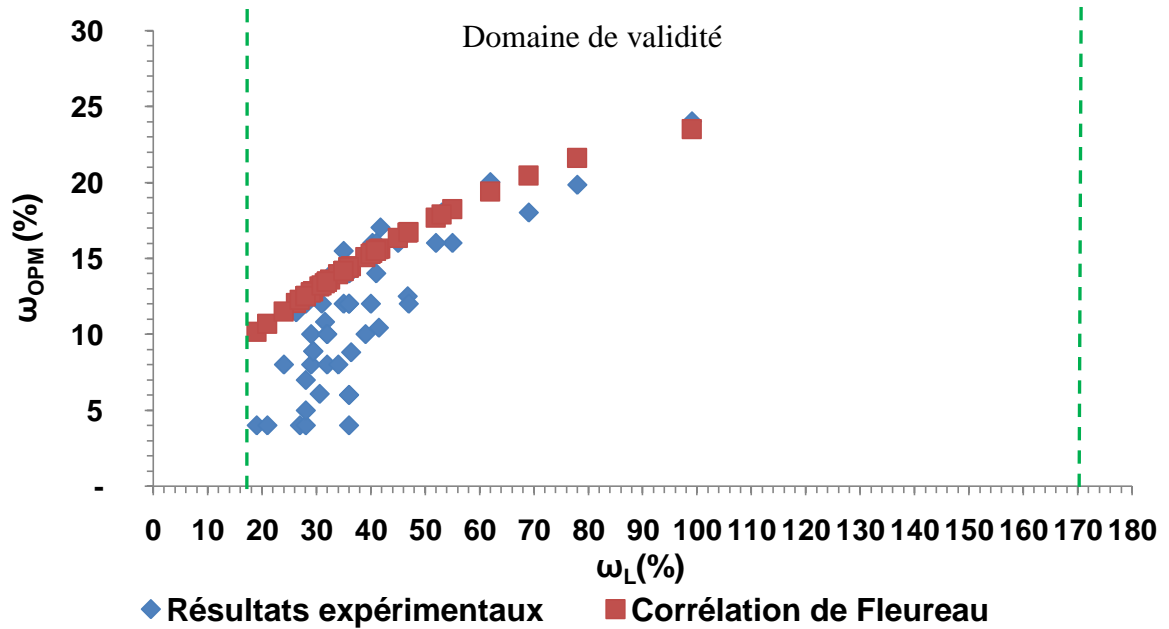


Figure III.22 : Comparaison entre les teneurs en eau optimales mesurées et estimées par la corrélation de FLEUREAU (2002)

• **Le poids volumique sec :**

$$\gamma_{dmax} = 20,56 - 0,086\omega_L + 0,00037(\omega_L)^2 \quad ; \quad 17 < \omega_L < 170$$

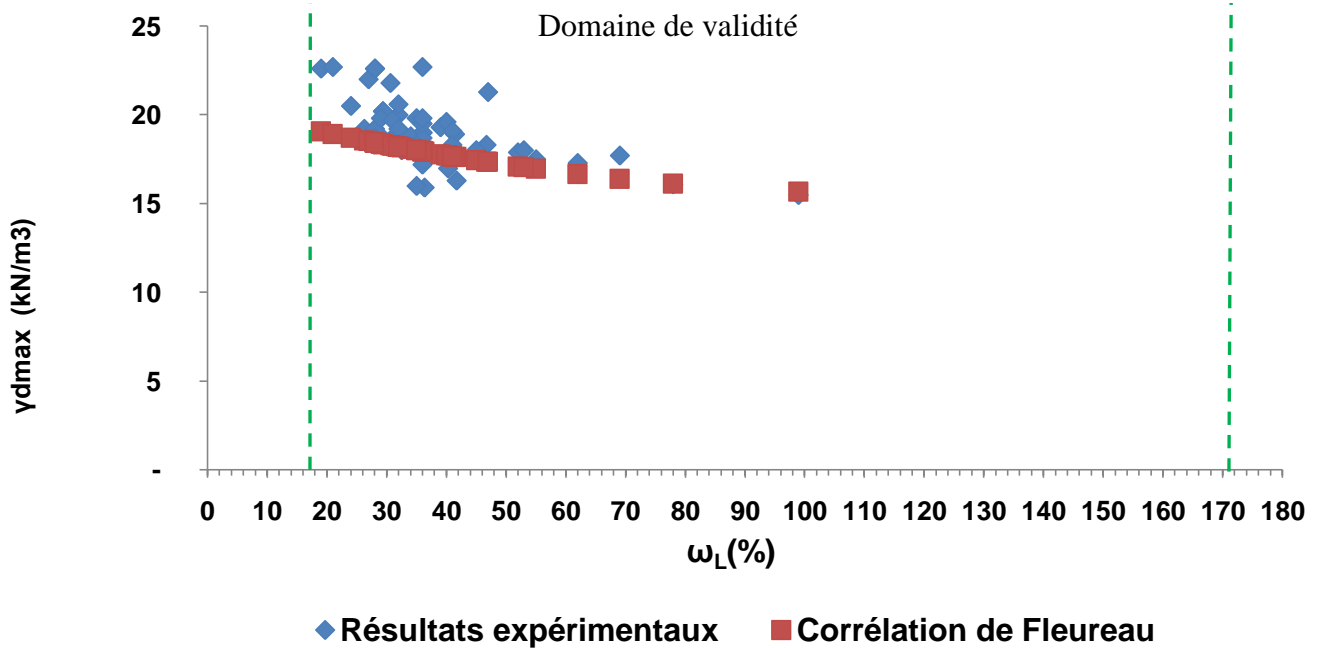


Figure III.23 : Comparaison entre les densités sèches maximales mesurées et estimées par la corrélation de FLEUREAU (2002)

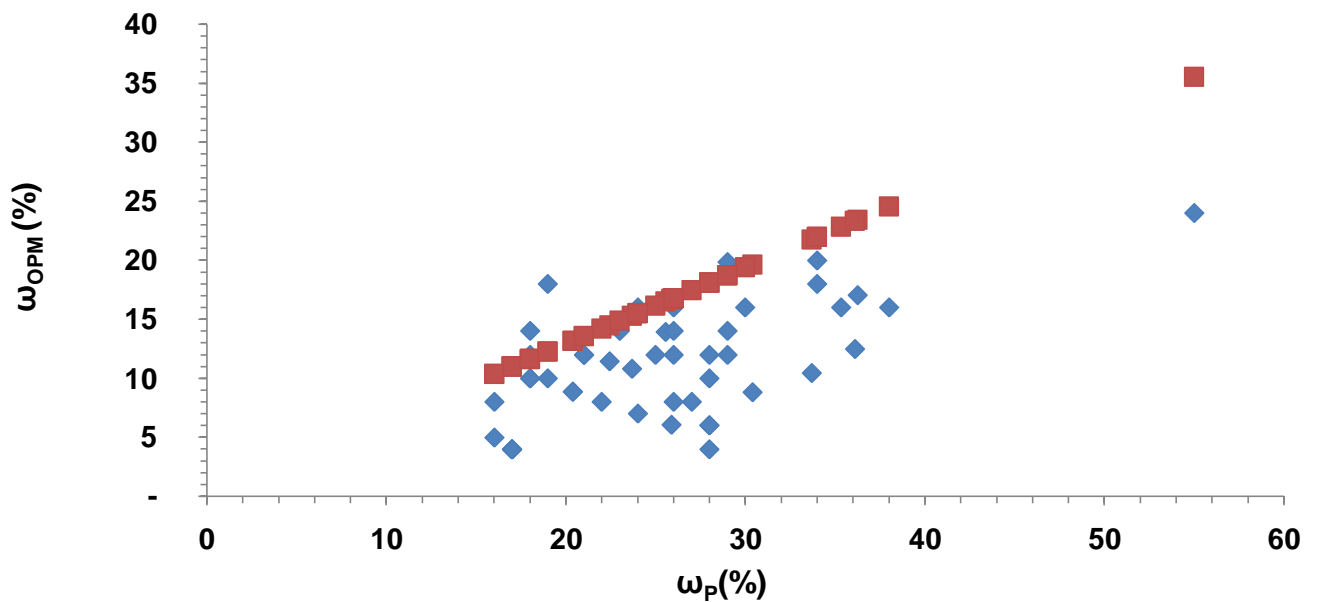
Pour notre étude on remarque que la corrélation de FLEUREAU est valable sur un domaine de 22% à 64% pour la teneur en eau, et de 22% à 72% pour la densité sèche.

4.2.3 La corrélation de GURTUNG (2004) :

- **La teneur en eau :**

$$\omega_{OPN} = [1,95 - 0,38(\log E)] \cdot \omega_P$$

Domaine de validité= les sols fins



◆ Résultats expérimentaux ■ Corrélation de Gurtung

Figure III.24 : Comparaison entre les teneurs en eau optimales mesurées et estimées par la corrélation de GURTUNG (2004)

- **Le poids volumique sec :**

$$\gamma_{dmax} = 22,68 e^{-0,0193 \cdot \omega_{OPN}}$$

Domaine de validité= les sols fins

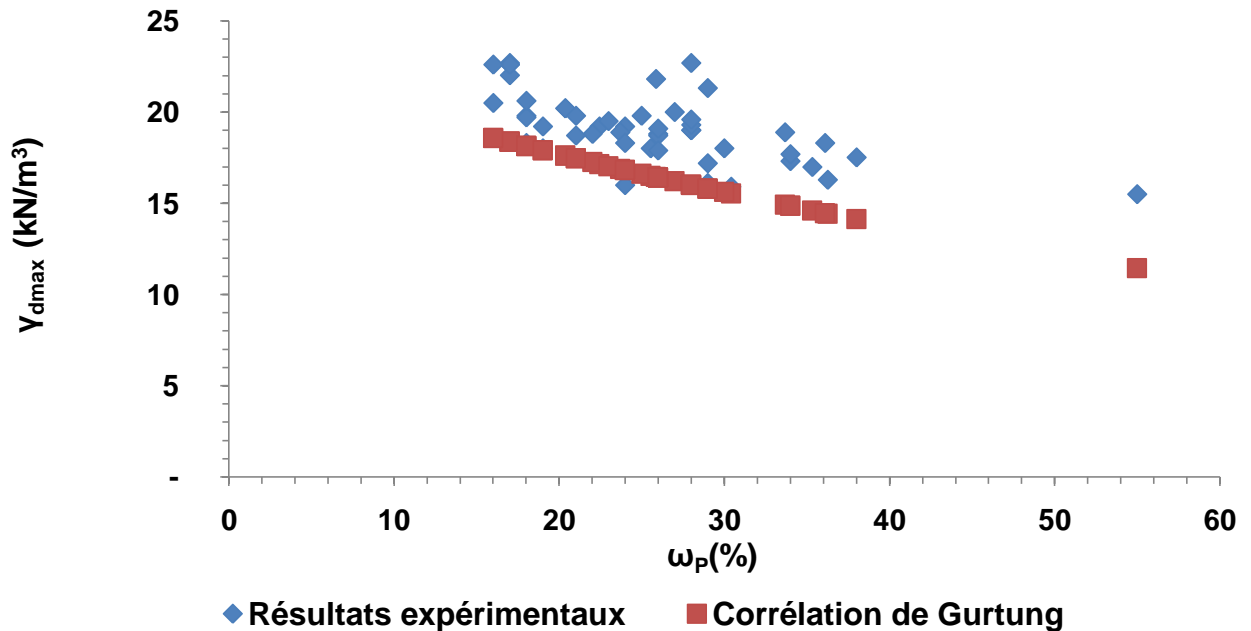


Figure III.25 : Comparaison entre les densités sèches maximales mesurées et estimées par la corrélation de GURTUNG (2004)

La corrélation de GURTUNG est valable pour les sols fins, mais pour notre étude elle est valable pour une limite de plasticité entre 16% et 34% pour la teneur en eau , et entre 14% et 40% pour la densité sèche.

4.2.4 La corrélation d'OSMAN (2008) :

- **La teneur en eau :**

$$\omega_{OPN} = [1,99 - 0,165(\ln E)] \cdot I_p$$

Domaine de validité = les sols fins

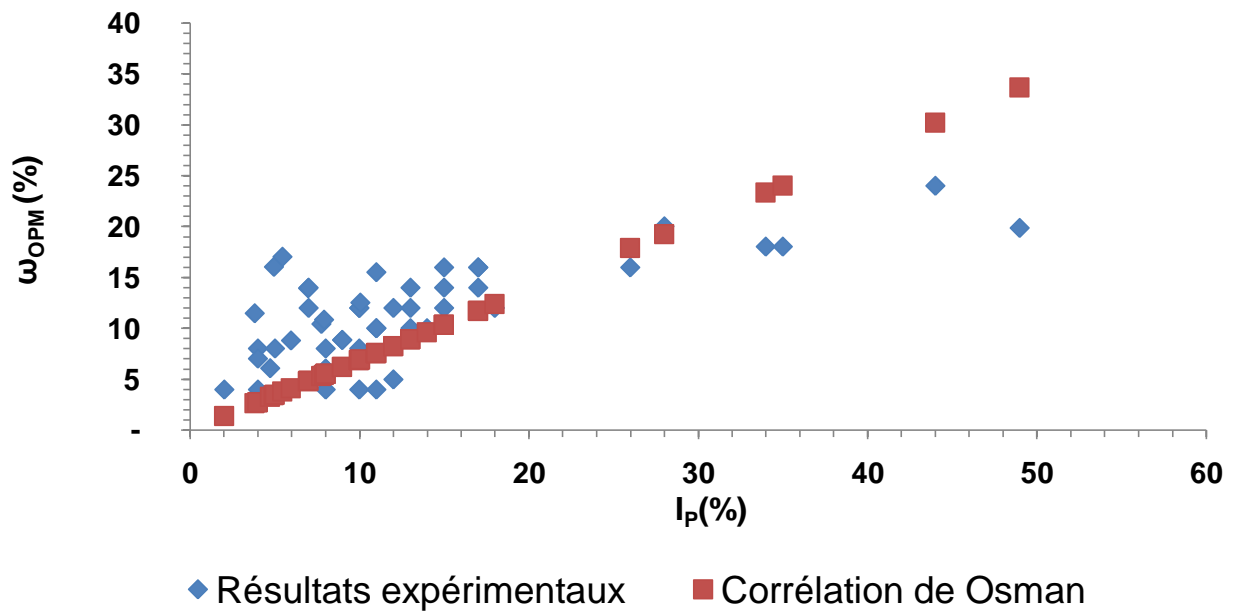


Figure III.26 : Comparaison entre les teneurs en eau optimales mesurées et estimées par la corrélation d’OSMAN (2008)

• **Le poids volumique sec :**

$$\gamma_{dmax} = L - M \cdot \omega_{opt}$$

Avec : $L = 14,34 + 1,195 \ln E$

$M = -0,19 + 0,073 \ln E$

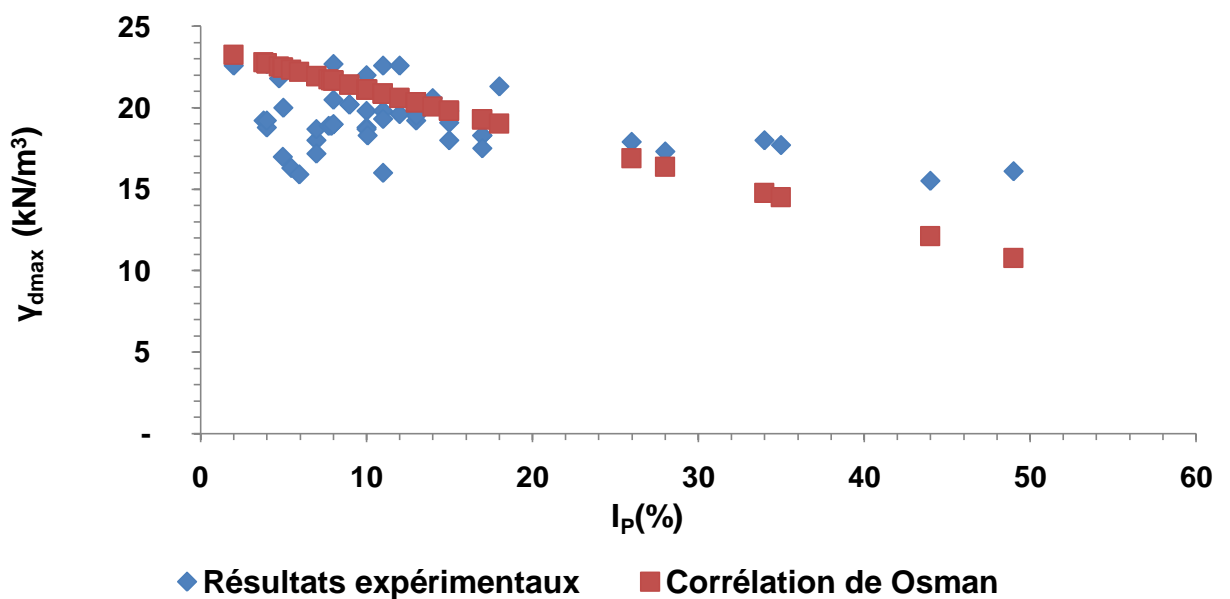


Figure III.26 : Comparaison entre les densités sèches maximales mesurées et estimées par la corrélation d’OSMAN (2008)

La corrélation d'OSMAN est valable dans notre cas sur un domaine de validité entre 2% à 30% pour la teneur en eau et la densité sèche.

5. Choix de la corrélation la plus représentative des sols compactés étudiés :

5.1 le coefficient de NASH-Sutcliffe (1969) :

Il existe diverses méthodes qui ont pour objet de trouver les paramètres de fonction non linéaire qui donnent la meilleure adéquation entre valeurs calculées et observées, adéquation chiffrée par le calcul d'un critère. La méthode employée dans notre étude est celle proposé par NASH (1969) qui est le plus communément employé :

$$R=1-\frac{\sum_{i=0}^n(\text{Valobs} - \text{Valth})^2}{\sum_{i=0}^n(\text{Valobs} - \overline{\text{Valobs}})^2}$$

Où : Val obs : la valeur observé (valeur expérimentale).

Val th : la valeur théorique (la valeur calculée par la corrélation).

$\overline{\text{Valobs}}$: moyenne des valeurs observés de l'échantillon.

Si $R < 0$: le modèle est mauvais.

Si $R > 0$ et $R \approx 1$: le modèle est bon.

5.2 Calcul de coefficient de NASH à l'OPN :

En utilisant le coefficient de NASH sur les corrélations de l'optimum Proctor normal on résume les résultats trouvés en négligeant le domaine de validité dans le **tableau III.1**, et les résultats trouvés en utilisant uniquement le domaine de validité dans le **tableau III.2**:

Tableau III.3 : les résultats de coefficient de NASH en négligeant le domaine de validité

	POPOVIC	BLOTZ	FLEUREAU	GRESS	GURTUNG	OSMAN	SIVRIKAYA	NAGRARAJ
$R(\omega_{OPN})$	-0,12	-3,37	-0,23	-0,28	-1,67	-10,55	-2,22	-1,33
$R(\gamma_{dmax})$	0,36	-0,27	0,26	0,08	-0,82	-3,42	-0,27	-0,27

Tableau III .4: les valeurs de NASH en utilisant uniquement le domaine de validité

	POPOVIC	BLOTZ	FLEUREAU	GRESS	GURTUNG	OSMAN	SIVRIKAYA	NAGRARAJ
$R(\omega_{OPN})$	0,48	-3,37	-0,23	0,44	-1,67	-10,55	-2,62	-2,32
$R(\gamma_{dmax})$	0,14	-0,27	0,26	0,27	-0,82	-3,42	-0,66	-0,49

5.3 Calcul de coefficient de NASH à l'OPM :

Le **tableau III.3** présente les valeurs de coefficient de NASH pour les échantillons compactés à l'optimum Proctor modifié :

Tableau III.5 : la valeur de coefficient de NASH à l'OPM

	BLOTZ	FLEUREAU	GURTUNG	OSMAN
$R(\omega_{OPN})$	0,40	0,12	-0,99	-0,35
$R(\gamma_{dmax})$	0,15	-0,14	-1,60	-1,25

Tableau III.3 : la valeur de coefficient de NASH à l'OPM

5.4 Interprétation des résultats :

A l'OPN, en négligeant le domaine de validité on remarque que :

- Pour la teneur en eau toutes les corrélations présentent un mauvais modèle mais en comparant entre ces corrélations on trouve que celle de POPOVIC est la plus convenable.
- Pour la densité sèche la corrélation de POPOVIC présente un bon modèle.

A l'OPN, en utilisant le domaine de validité on remarque que :

- Pour la teneur en eau la corrélation de POPOVIC donne un coefficient de NASH supérieur à 0, elle présente le meilleur modèle
- Pour la densité sèche, il y a quatre corrélation qui donnent des coefficients de NASH supérieur à 0, sont POPOCIV, FLEUREAU, GRESS et KUMBASAR & TORGOL, mais la meilleur adéquation est présentée par celle de GRESS.

A l'OPM, on remarque que :

- Pour la teneur en eau, on aura deux corrélations qui présentent un bon modèle : BLOTZ et FLEUREAU, la meilleur est celle de BLOTZ.
- Pour la densité sèche la meilleur et la seule corrélation qui donne une bonne adéquation entre les résultats expérimentales et théoriques est celle de BLOTZ.

6. Proposition d'une corrélation fonction de la limite de liquidité du matériau :

6.1 La corrélation à l'OPN :

- **La teneur en eau :**

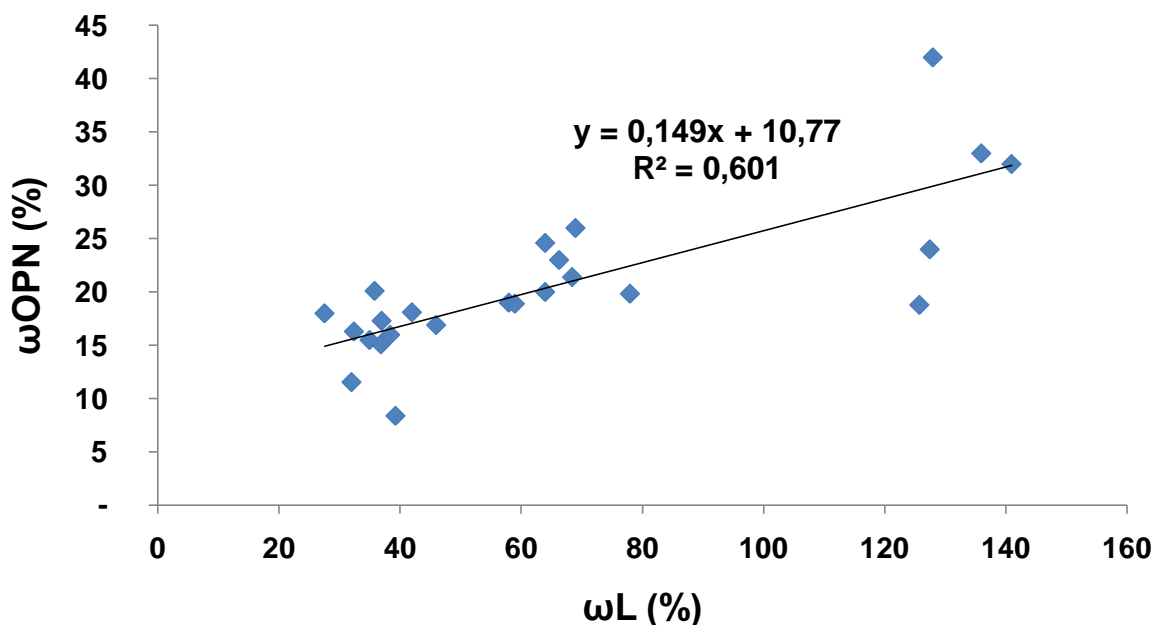
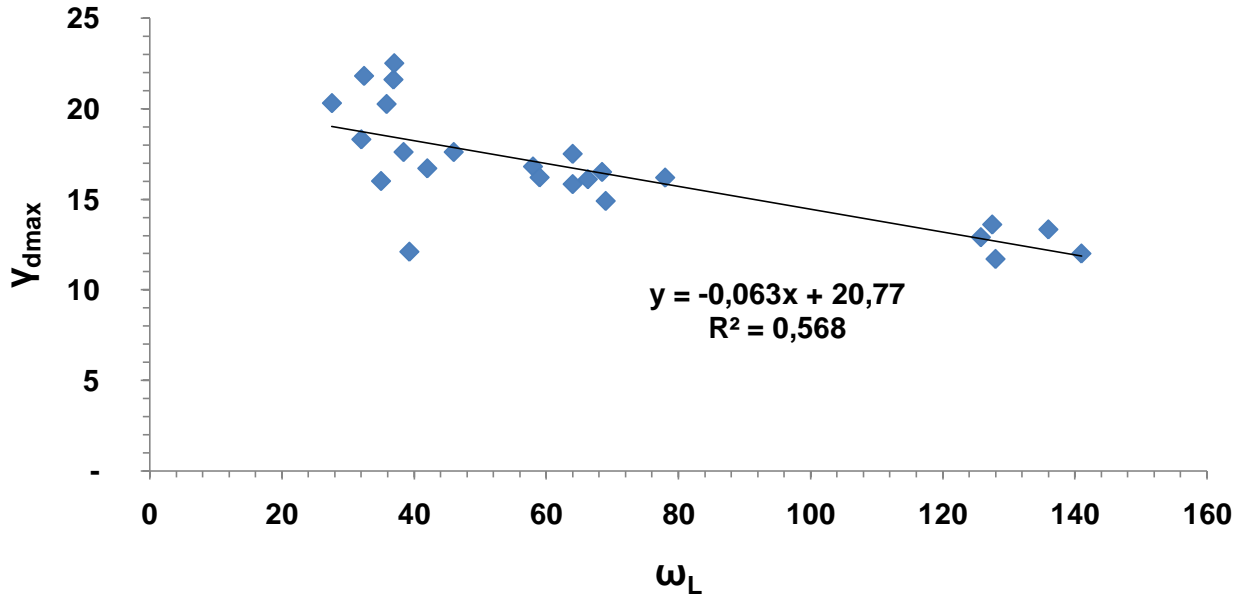


Figure III.28 : La corrélation de la teneur en eau à l'OPN de la wilaya de TLEMCEM

On aura :

$$\omega_{OPN} = 0,149\omega_L + 10,77$$

- **Le poids volumique sec :**

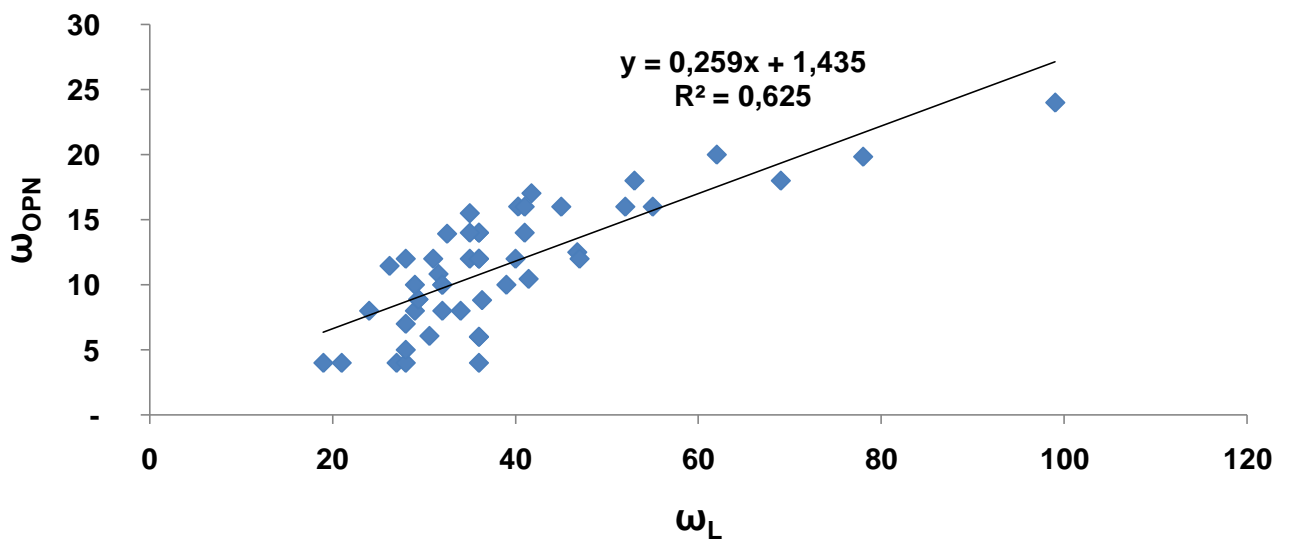


On aura

$$\gamma_{dmax} = -0,063\omega_L + 20,77$$

6.2 La corrélation à l'OPM :

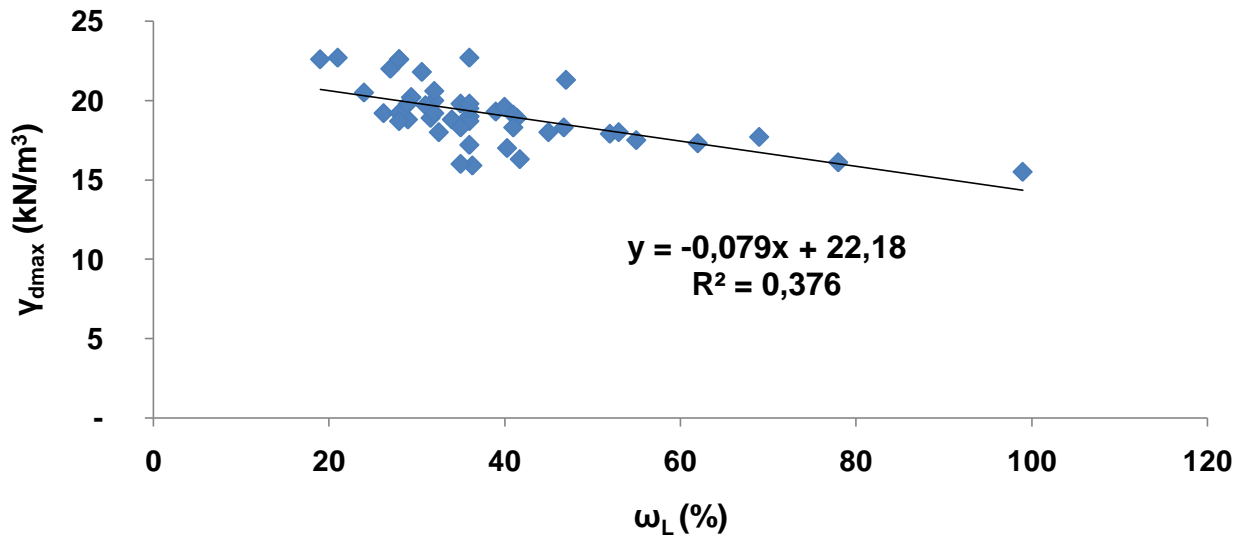
- **La teneur en eau :**



On aura :

$$\omega_{OPN} = 0,259 + 1,435$$

- **Le poids volumique sec :**



On aura la corrélation suivante :

$$\gamma_{dmax} = -0,079 + 22,18$$

Le tableau suivant regroupe les résultats de corrélations trouvées pour notre étude expérimentale à l'OPN et l'OPM

Tableau III.6 : les corrélations de l'étude expérimentale

L'essai Proctor	Les corrélations
Optimum Proctor Normal	$\omega_{OPN} = 0,149\omega_L + 10,77$ $\gamma_{dmax} = -0,063\omega_L + 20,77$
Optimum Proctor Modifié	$\omega_{OPN} = 0,259 + 1,435$ $\gamma_{dmax} = -0,079 + 22,18$

6.3 Calcul du coefficient de NASH des corrélations proposées :

Le tableau suivant présente le coefficient de NASH des corrélations proposées à l'OPN et à l'OPM :

Tableau III.7: le coefficient de NASH des corrélations proposées

		Coefficient de NASH
OPN	ω_{OPN} (%)	0,96
	γ_{dmax} (kN/m ³)	0,99
OPM	ω_{OPN} (%)	0,95
	γ_{dmax} (kN/m ³)	0,65

7. Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de tester toutes les corrélations citées dans la bibliographie pour différents types de sol de la wilaya de TLEMCEM et voir quelle est la corrélation qui marche avec ces sites ensuite les comparer avec la corrélation que l'on a cherchée à partir de nos résultats.

CONCLUSION GENERALE

L'utilisation des corrélations peut contribuer efficacement au travail de synthèse du géotechnicien, ces formulations simplifiées pourraient donc permettre d'obtenir une estimation rapide des caractéristiques intrinsèques des sols au stade des études d'avant projet, orienter les interprétations des résultats de mesure, contrôler les rapports géotechniques, etc.

Nous avons essayé à travers une synthèse bibliographique de présenter différents types de corrélations de la littérature, permettant à l'ingénieur de connaître plus rapidement les propriétés mécaniques qu'il est en droit d'attendre de tel matériau à partir de mesures et de contrôles simples et rapides, et en particulier pour les sols compactés.

Des corrélations de la littérature ont été appliquées sur différents sites sur la wilaya de TLEMCEM, les corrélations de POPOVIC permettent de prédire avec une bonne approximation les paramètres de compactage à l'OPN, et celle de BLOTZ à l'OPM.

L'élaboration de ce travail m'a permis, d'une part, d'approfondir les connaissances et le savoir faire acquis durant les années de ma formation en génie civil, et d'autre part, de préparer mon intégration à la vie professionnelle et de me situer sur le domaine de la recherche.

Bibliographie

- Abdeldjalil, Z.** (2009). Etude du transfert hydrique dans les sols non saturés: échange sol-atmosphère.
- Abdelkarim, K. Z.** (s.d.). Etude de la stabilité des rives de la piste de l'aérodrome MESSALI EL HADJ-ZENATA-TLEMCCEN.
- Assia Benchouk, F.-E. M.-E.** (2015). Characterization of macro and microstructural behaviour of a compacted clay to the optimum Proctor. *International Journal of Applied Engineering Research* , 10, 37973-37980.
- Assia, B.** (2014). Comportement hydro-mécanique des sols fins compactés au voisinage de la saturation.
- BENAISSA.A.** *Eléments de mécanique des sols*. Alger, Constantine: Office des publications universitaires.
- Boucif), E. H.** (2015). Contribution à l'étude mécanique et hydraulique des tunnels de configuration tridimensionnelle .
- Cherifa, A.** (2014). Les corrélations en mécanique des sols:application aux sols compactés.
- COSTET Jean, S. G.** (1975). *Cours pratique de mécanique des sols :plasticité et calcul des tassements* (éd. 2e édition). Dunod.
- Costet, J., & Sanglerat, G.** (1977). *Cours pratique de mécanique des sols, plasticité et calcul des tassements* (éd. 2e édition). France: Dunod.
- DYSLI Michel, S. W.** (2011). *Corrélations en mécanique des sols*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.
- H.B. Nagaraj, B. R.** (2014). Correlation of compaction characteristics of natural soils with modified plastic limit. *Transportation Geotechnics* .
- Hamid, K.** (2012). Compactage à sec: analyse de la technique.
- IALY RADIO Donat, T. H.** (1990). CONTRIBUTION A L'ETUDE DU COMPACTAGE AU LABORATOIRE:Recherche de corrélations pour une éventuelle application aux cas pathologiques.
- Idriss, G.** (2012). *Comportement mécanique et hydrique d'un mélange de tuf et de sable calcaire de la région de Laghouat:Application en construction routière*. Université Abou-Bekr Belkaid Tlemcen.
- Jay AMERATUNGA, N. S.** *Correlations of soil and rock properties in geotechnical engineering*. Developments in Geotechnical Engineering.
- Jean-Marie Fleureau, J.-C. V.-S. (s.d.)**. Aspects of the behaviour of compacted clayey soils on drying and wetting paths.

Lisa R. Blotz, I. C. (s.d.). ESTIMATING OPTIMUM WATER CONTENT AND MAXIMUM DRY UNIT WEIGHT FOR COMPACTED CLAYS.

Luc, B. (2007). Comportement hydromécanique des sols fins proches de la saturation cas des ouvrages en terre: coefficient B, déformations instantanées et différées, retrait/gonflement.

MAGNAN, J.-P. (s.d.). Corrélations entre les propriétés des sols .

MECHERNENE Madjid, B. R. (2015). L'effet du compactage sur les caractéristiques de perméabilité et de résistance d'un sol fin.

PELTIER.R. (1955). *Manuel du laboratoire routier* (Vol. II). Paris: Dunod.

Rokia, B. (2006). Erosion regressive interne des sols fins.

S. Leroueil, D. H. (2013). Compacted soils: From physics to hydraulic and mechanical behaviour.

Tisot, J. P. (s.d.). Propriétés mécaniques et physiques des sols. Nancy, France: école nationale supérieure de géologie de Nancy (ENSG).

Zeyneb, B. (2014). Etude expérimentale de la dispersion des argiles.

Zeyneb, B. (2014). Stabilisation des sols gonflants.

ANNEXES
