

**Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement
Bundesamt für Strassenbau**

**Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie
Office fédéral des routes**

**Dipartimento federale dei trasporti, delle comunicazioni e delle energie
Ufficio federale delle strade**

Statistique sur les caractéristiques des sols suisses

Statistische Behandlung der Kennwerte der Schweizer Böden

**Laboratoire de mécanique des sols de l'Ecole Polytechnique Fédérale
de Lausanne
M. Dysli, J. Rybisar**

**Mandats de recherche 08/82, 18/88 et 16/91 sur proposition de
l'Union des professionnels suisses de la route**

Avril 1992

**Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie
Office fédéral des routes**

Statistique sur les caractéristiques des sols suisses

**Statistische Behandlung der Kennwerte der schweizer
Böden**

M. Dysli, J. Rybisar

**Laboratoire de mécanique des sols de l'Ecole
Polytechnique Fédérale de Lausanne**

**Mandats de recherche 18/88 et 16/91 sur proposition de
l'Union des professionnels suisses de la route**

Mars 1992

TABLE DES MATIERES

Liste des figures.....	iii
Résumé.....	xi
Zusammenfassung.....	xiii
Abstract	xv
1. Mandat et buts.....	1
2. Méthode de la recherche.....	3
2.1 Données de base.....	4
2.2 Données complémentaires	4
2.3 Pondération des données genevoises	6
2.4 Statistiques.....	14
2.5 Corrélations	14
2.6 Correction et extension de l'USCS.....	16
2.7 Classification géologique.....	16
3. Statistiques.....	17
3.1 Granulométries	18
3.2 Autres caractéristiques	30
3.2.1 GW, GP, GM, GC	31
3.2.2 GM-ML, GM-GC, GC-CL, GC-CH.....	36
3.2.3 SW, SP, SM, SC.....	42
3.2.4 SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH.....	48
3.2.5 ML, CL-ML, CL, CH, MH.....	56
3.2.6 OL, OH, Pt.....	65
3.3 Tableaux récapitulatifs	72
4. Résultats des corrélations.....	77
4.1 Introduction	78
4.2 Diagramme de plasticité.....	78
4.3 Résistance.....	80
4.4 Déformation.....	92
4.5 Perméabilité	98
5. Correction et extension de l'USCS	101
5.1 Quelques classifications des sols.....	102
5.2 L'USCS en Suisse	102
5.3 Extension de l'USCS	107

6.	Classification géologique	115
6.1	Raisons.....	116
6.2	Proposition pour une classification géologique standard	116
6.3	Application aux sols suisses	118
6.4	Questionnaire.....	119
6.5	Proposition	122
	Références.....	125
	Symboles et unités.....	127

LISTE DES FIGURES

	page
2. Méthode de la recherche	
2.1 Répartition géographique des échantillons de sol.....	5
2.2 Nombre d'échantillons par classe USCS.....	5
2.3 Répartition des échantillons genevois et suisses classés selon l'USCS	6
2.4 Fuseaux granulométriques de la classe USCS: GC.....	8
2.5 Fuseaux granulométriques de la classe USCS: GM-GC.....	8
2.6 Fuseaux granulométriques de la classe USCS: GC-CL.....	9
2.7 Fuseaux granulométriques de la classe USCS: SM.....	9
2.8 Fuseaux granulométriques de la classe USCS: SM-ML	10
2.9 Fuseaux granulométriques de la classe USCS: SM-SC	10
2.10 Fuseaux granulométriques de la classe USCS: SC-CL	11
2.11 Fuseaux granulométriques de la classe USCS: ML.....	11
2.12 Fuseaux granulométriques de la classe USCS: CL-ML	12
2.13 Fuseaux granulométriques de la classe USCS: CL.....	12
2.14 Pondération des sols suisses et genevois. Diagramme de plasticité.....	13
2.15 Signification du coefficient de dissymétrie β_1	14
3. Statistiques	
3.1 Granulométrie	
3.1 Fuseau granulométrique de la classe USCS: GW	18
3.2 Fuseau granulométrique de la classe USCS: GP.....	18
3.3 Fuseau granulométrique de la classe USCS: GM	19
3.4 Fuseau granulométrique de la classe USCS: GC	19
3.5 Fuseau granulométrique de la classe USCS: GM-ML.....	20
3.6 Fuseau granulométrique de la classe USCS: GM-GC	20
3.7 Fuseau granulométrique de la classe USCS: GC-CL.....	21
3.8 Fuseau granulométrique de la classe USCS: GC-CH	21
3.9 Fuseau granulométrique de la classe USCS: SP	22
3.10 Fuseau granulométrique de la classe USCS: SM.....	22
3.11 Fuseau granulométrique de la classe USCS: SC.....	23
3.12 Fuseau granulométrique de la classe USCS: SM-ML.....	23
3.13 Fuseau granulométrique de la classe USCS: SM-SC.....	24
3.14 Fuseau granulométrique de la classe USCS: SC-CL.....	24
3.15 Fuseau granulométrique de la classe USCS: SC-CH.....	25
3.16 Fuseau granulométrique de la classe USCS: ML.....	25
3.17 Fuseau granulométrique de la classe USCS: CL-ML.....	26
3.18 Fuseau granulométrique de la classe USCS: CL.....	26
3.19 Fuseau granulométrique de la classe USCS: CH	27
3.20 Fuseau granulométrique de la classe USCS: OL.....	27
3.21 Fuseau granulométrique de la classe USCS: OH.....	28
3.22 Fuseau granulométrique de la classe USCS: MH	28
3.23 Fuseau granulométrique de la classe USCS: Pt.	29

	page
3.2 Autres caractéristiques	
3.2.1 GW, GP, GM, GC	
3.24 Histogramme du pourcentage pondéral de l'argile des classes USCS : GW, GP, GM, GC	31
3.25 Histogramme du pourcentage pondéral du limon des classes USCS : GW, GP, GM, GC	31
3.26 Histogramme du pourcentage pondéral du sable des classes USCS : GW, GP, GM, GC	32
3.27 Histogramme du pourcentage pondéral du gravier des classes USCS : GW, GP, GM, GC	32
3.28 Histogramme de la limite de liquidité w_L des classes USCS : GM, GC.....	33
3.29 Histogramme de l'indice de plasticité I_p des classes USCS : GM, GC	33
3.30 Histogramme de la masse volumique du sol ρ des classes USCS : GP, GM, GC.....	34
3.31 Histogramme de la teneur en eau w des classes USCS : GW, GP, GM, GC	34
3.32 Histogramme de l'indice de vide initial e_0 des classes USCS : GP, GM, GC.....	35
3.33 Histogramme de toutes les cohésions apparentes c_{up} , c_{us} et c_u des classes USCS : GM, GC.....	35
3.2.2 GM-ML, GM-GC, GC-CL, GC-CH	
3.34 Histogramme du pourcentage pondéral de l'argile des classes USCS : GM-ML, GM-GC, GC-CL, GC-CH.....	36
3.35 Histogramme du pourcentage pondéral du limon des classes USCS : GM-ML, GM-GC, GC-CL, GC-CH.....	36
3.36 Histogramme du pourcentage pondéral du sable des classes USCS : GM-ML, GM-GC, GC-CL, GC-CH.....	37
3.37 Histogramme du pourcentage pondéral du gravier des classes USCS : GM-ML, GM-GC, GC-CL, GC-CH.....	37
3.38 Histogramme de la limite de liquidité w_L des classes USCS : GM-ML, GM-GC, GC-CL.....	38
3.39 Histogramme de l'indice de plasticité I_p des classes USCS : GM-ML, GM-GC, GC-CL	38
3.40 Histogramme de la masse volumique du sol ρ des classes USCS : GM-ML, GM-GC, GC-CL	39
3.41 Histogramme de la teneur en eau w des classes USCS : GM-ML, GM-GC, GC-CL, GC-CH.....	39
3.42 Histogramme de l'indice de vide initial e_0 des classes USCS : GM-ML, GM-GC, GC-CL.....	40
3.43 Histogramme de la cohésion apparente c_{up} (pénétromètre de poche) des classes USCS : GM-ML, GM-GC, GC-CL.....	40
3.44 Histogramme de toutes les cohésions apparentes c_{up} , c_{us} et c_u des classes USCS : GM-ML, GM-GC, GC-CL.....	41
3.45 Histogramme du coefficient de perméabilité de Darcy k_D de la classe USCS : GC-CL.....	41

page

3.2.3 SW, SP, SM, SC

3.46	Histogramme du pourcentage pondéral de l'argile des classes USCS : SP, SM, SC.....	42
3.47	Histogramme du pourcentage pondéral du limon des classes USCS : SP, SM, SC.....	42
3.48	Histogramme du pourcentage pondéral du sable des classes USCS : SP, SM, SC.....	43
3.49	Histogramme du pourcentage pondéral du gravier des classes USCS : SP, SM, SC.....	43
3.50	Histogramme de la limite de liquidité w_L des classes USCS : SM, SC	44
3.51	Histogramme de l'indice de plasticité I_p des classes USCS : SM, SC	44
3.52	Histogramme de la masse volumique du sol ρ des classes USCS : SP, SM, SC.....	45
3.53	Histogramme de la teneur en eau w des classes USCS : SP, SM, SC.....	45
3.54	Histogramme de l'indice de vide initial e_0 des classes USCS : SP, SM, SC.....	46
3.55	Histogramme de toutes les cohésions apparentes c_{up} , c_{us} et c_u des classes USCS : SM, SC	46
3.56	Histogramme de l'indice de compression C_c des classes USCS : SP, SM.....	47

3.2.4 SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH

3.57	Histogramme du pourcentage pondéral de l'argile des classes USCS : SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH.....	48
3.58	Histogramme du pourcentage pondéral du limon des classes USCS : SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH.....	48
3.59	Histogramme du pourcentage pondéral du sable des classes USCS : SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH.....	49
3.60	Histogramme du pourcentage pondéral du gravier des classes USCS : SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH.....	49
3.61	Histogramme de la limite de liquidité w_L des classes USCS : SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH.....	50
3.62	Histogramme de l'indice de plasticité I_p des classes USCS : SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH.....	50
3.63	Histogramme de la masse volumique du sol ρ des classes USCS : SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH.....	51
3.64	Histogramme de la teneur en eau w des classes USCS : SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH.....	51
3.65	Histogramme de l'indice de vide initial e_0 des classes USCS : SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH.....	52
3.66	Histogramme de la cohésion apparente c_u (compression simple) des classes USCS : SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH.....	52
3.67	Histogramme de la cohésion apparente c_{up} (pénétromètre de poche) des classes USCS : SM-ML, SM-SC, SC-CL.....	53

	page
3.68 Histogramme de toutes les cohésions apparentes c_{up} , c_{us} et c_u des classes USCS : SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH.....	53
3.69 Histogramme de l'indice de compression C_c des classes USCS : SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH.....	54
3.70 Histogramme de l'indice de gonflement C_s des classes USCS : SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH.....	54
3.71 Histogramme du coefficient de perméabilité de Darcy k_D de la classe USCS : SM-ML, SM-SC, SC-CL	55
 3.2.5 ML, CL-ML, CL, CH, MH	
3.72 Histogramme du pourcentage pondéral de l'argile des classes USCS : ML, CL-ML, CL, CH, MH.....	56
3.73 Histogramme du pourcentage pondéral du limon des classes USCS : ML, CL-ML, CL, CH, MH.....	56
3.74 Histogramme du pourcentage pondéral du sable des classes USCS : ML, CL-ML, CL, CH, MH.....	57
3.75 Histogramme du pourcentage pondéral du gravier des classes USCS : ML, CL-ML, CL, CH, MH.....	57
3.76 Histogramme de la limite de liquidité w_L des classes USCS : ML, CL-ML, CL, CH, MH.....	58
3.77 Histogramme de l'indice de plasticité I_p des classes USCS : ML, CL-ML, CL, CH, MH.....	58
3.78 Histogramme de la masse volumique du sol ρ des classes USCS : ML, CL-ML, CL, CH, MH.....	59
3.79 Histogramme de la teneur en eau w des classes USCS : ML, CL-ML, CL, CH, MH.....	59
3.80 Histogramme de l'indice de vide initial e_0 des classes USCS : ML, CL-ML, CL, CH, MH.....	60
3.81 Histogramme de l'angle de frottement interne effectif Φ' des classes USCS : ML, CL-ML, CL, CH, MH.....	60
3.82 Histogramme de la cohésion effective c' des classes USCS : ML, CL-ML, CL, CH, MH.....	61
3.83 Histogramme de la cohésion apparente c_{us} (scissomètre) des classes USCS : ML, CL-ML, CL, CH, MH.....	61
3.84 Histogramme de la cohésion apparente c_u (compression simple) des classes USCS : ML, CL-ML, CL, CH, MH.....	62
3.85 Histogramme de la cohésion apparente c_{up} (pénétromètre de poche) des classes USCS : ML, CL-ML, CL, CH, MH.....	62
3.86 Histogramme de toutes les cohésions apparentes c_{up} , c_{us} et c_u des classes USCS : ML, CL-ML, CL, CH, MH.....	63
3.87 Histogramme de l'indice de compression C_c des classes USCS : ML, CL-ML, CL, CH, MH.....	63
3.88 Histogramme de l'indice de gonflement C_s des classes USCS : ML, CL-ML, CL, CH, MH.....	64
3.89 Histogramme du coefficient de perméabilité de Darcy k_D de la classe USCS : ML, CL-ML, CL, CH, MH	64

	page
4.7	Corrélation entre la cohésion apparente obtenue au pénétromètre de poche c_{up} et l'indice de consistance I_C85
4.8	Corrélation entre la cohésion apparente obtenue par compression simple c_u et l'indice de consistance I_C86
4.9	Corrélation entre la cohésion apparente obtenue au pénétromètre de poche c_{up} et la contrainte effective verticale initiale σ_{v0}'87
4.10	Corrélation entre la cohésion apparente obtenue au scissomètre c_{us} et la contrainte effective verticale initiale σ_{v0}'88
4.11	Corrélation entre la cohésion apparente obtenue par compression simple c_u et la contrainte effective verticale initiale σ_{v0}'89
4.12	Corrélation entre la cohésion apparente obtenue par compression simple c_u et celle obtenue au pénétromètre de poche c_{up}90
4.13	Corrélation entre la cohésion apparente obtenue par compression simple c_u et celle obtenue au scissomètre c_{us}91
4.4	Déformation
4.14	Corrélation entre l'indice de compression C_c et la limite de liquidité w_L93
4.15	Corrélation entre l'indice de gonflement C_s et la limite de liquidité w_L94
4.16	Corrélation entre $(1+e_0)/C_c$ et la masse volumique sèche ρ_d95
4.17	Corrélation entre $(1+e_0)/C_s$ et la masse volumique sèche ρ_d96
4.18	Corrélation entre l'indice de gonflement C_s et l'indice de compression C_c97
4.5	Perméabilité
4.19	Corrélation entre le coefficient de perméabilité k_D et le diamètre à 10 % des grains d_{10}99
5.	Correction et extension de l'USCS
5.2	L'USCS en Suisse
5.1	Gravier : comparaison entre l'USCS suisse et celui défini par la norme ASTM D 2487.....103
5.2	Sable : comparaison entre l'USCS suisse et celui défini par la norme ASTM D 2487.....104
5.3	Sols fins : comparaison entre l'USCS suisse et celui défini par la norme ASTM D 2487.....105
5.4	Sols fins : diagramme de plasticité de la norme ASTM D 2487.....105
5.5	Sols fins : diagramme de plasticité de la norme SN 670'008.....106
5.6	Correspondance approximative entre les classes de l'USCS suisse et celles de l'USCS selon ASTM D 2487107
5.3	Extension de l'USCS
5.7	Proposition de classification des graviers.....108
5.8	Proposition de classification des sables108
5.9	Proposition de classification des sols fins : schéma.....109
5.10	Proposition de classification des sols fins : diagramme de plasticité.....109
5.11	Tableau des moyennes et de leur variabilité - Division en deux des sols fins à basse limite de liquidité.....110
5.12	Description fine des graviers.....112
5.13	Description fine des sables112
5.14	Description fine des sols fins inorganiques113
5.15	Description fine des sols fins organiques114

	page
3.2.6 OL, OH, Pt	
3.90 Histogramme du pourcentage pondéral de l'argile des classes USCS : OL, OH, Pt.....	65
3.91 Histogramme du pourcentage pondéral du limon des classes USCS : OL, OH, Pt.....	65
3.92 Histogramme du pourcentage pondéral du sable des classes USCS : OL, OH, Pt.....	66
3.93 Histogramme du pourcentage pondéral du gravier des classes USCS : OL, OH, Pt.....	66
3.94 Histogramme de la limite de liquidité w_L des classes USCS : OL, OH, Pt.....	67
3.95 Histogramme de l'indice de plasticité I_p des classes USCS : OL, OH, Pt.....	67
3.96 Histogramme de la masse volumique du sol ρ des classes USCS : OL, OH, Pt.....	68
3.97 Histogramme de la teneur en eau w des classes USCS : OL, OH, Pt.....	68
3.98 Histogramme de l'indice de vide initial e_0 des classes USCS : OL, OH, Pt.....	69
3.99 Histogramme de toutes les cohésions apparentes c_{up} , c_{us} et c_u des classes USCS : OL, OH.....	69
3.100 Histogramme de l'indice de compression C_c des classes USCS : OL, OH, Pt.....	70
3.101 Histogramme de l'indice de gonflement C_s des classes USCS : OH, Pt.....	70
3.102 Histogramme du coefficient de perméabilité de Darcy k_D de la classe USCS : OL, OH, Pt.....	71
3.3 Tableaux récapitulatifs	
3.103 Tableau récapitulatif des moyennes et de leur variabilité, groupe des graviers.....	73
3.104 Tableau récapitulatif des moyennes et de leur variabilité, groupe des sables.....	74
3.105 Tableau récapitulatif des moyennes et de leur variabilité, groupe des sols fins.....	75
4. Corrélations	
4.2 Diagramme de plasticité	
4.1 Diagramme de plasticité pour les classes USCS : CL, CH, ML et MH.....	79
4.2 Diagramme de plasticité pour les classes USCS : CL-ML, OL et OH.....	79
4.3 Résistance	
4.3 Corrélation entre l'angle de frottement effectif Φ' et l'indice de plasticité I_p	81
4.4 Corrélation entre l'angle de frottement effectif Φ' et le pourcentage des grains < 0.002 mm (argile)	82
4.5 Corrélation entre la cohésion apparente obtenue au pénétromètre de poche c_{up} et l'indice de liquidité I_L	83
4.6 Corrélation entre la cohésion apparente obtenue par compression simple c_u et l'indice de liquidité I_L	84

page

6. Classification géologique

6.1	Classification géologique genevoise.....	117
6.2	Première proposition pour une classification géologique standard.....	118
6.3	Répartition des échantillons "suisse romands" selon la première proposition de classification géologique des sols du quaternaire	119
6.4	Analyse des réponses au questionnaire.....	120
6.5	Classification utilisée par le bureau Colombi, Schmutz et Dorthe (CSD).....	122
6.6	Deuxième proposition pour une classification géologique standard.....	123

RESUME

En vue de la révision de la norme SN 670010 : coefficients caractéristiques des sols, qui date de mars 1966, la Commission 272 de l'Union des professionnels suisses de la route (VSS) : infrastructure et couches de fondation, a souhaité revoir et compléter la statistique à la base du tableau des caractéristiques moyennes de cette norme.

Cette nouvelle analyse statistique devait notamment :

- définir les caractéristiques par des moyennes et des écarts types (le tableau de la norme actuelle donne plutôt des exemples);
- mieux définir les caractéristiques moyennes des sols fins à basse limite de liquidité, entre autre en divisant en sous-classes les classes USCS ML, CL et OL et en introduisant la notion de degré de surconsolidation;
- tenter d'introduire en Suisse une classification géologique standard.

Dans ce but une banque de données a été créée et les caractéristiques géotechniques de quelque 6000 échantillons y ont été introduites. Parmi ces derniers, environ 4000 proviennent de la région genevoise, 500 du reste de la Suisse romande et environ 1500 de la Suisse allemande et italienne. L'effet de l'importance des échantillons de la région genevoise par rapport à ceux du reste de la Suisse a tout d'abord été étudié. Cette étude a montré qu'une pondération des échantillons genevois n'était pas nécessaire; cela s'explique notamment par la même origine géologique des sols de cette région que celle de presque tous les sols du reste de la Suisse.

Comme plus de vingt caractéristiques géotechniques étaient liées à chaque échantillon, c'est donc sur un ensemble de quelque 150'000 caractéristiques que l'analyse statistique a été effectuée.

La première étape de l'**analyse statistique**, qui fait l'objet du chapitre 3, a consisté en l'établissement, pour chaque classe USCS et pour l'ensemble des échantillons de toute la Suisse :

- des fuseaux granulométriques avec écart type et calcul des pourcentages d'argile, de limon, de sable et de gravier;
- des histogrammes des principales caractéristiques des sols avec moyenne, écart type et coefficient de dissymétrie;
- de tableaux des caractéristiques moyennes et de leur variabilité.

Les résultats de ces analyses statistiques sont consignés dans plus de 100 figures et tableaux.

De nombreuses **corrélations** entre les caractéristiques des sols les plus importantes pour l'ingénieur ont été ensuite réalisées et font l'objet du chapitre 4. Elles proviennent de résultats d'essais effectués sur un très grand nombre d'échantillons par différents laboratoires avec des procédures d'essai pas connues en détail et probablement un peu différentes d'un laboratoire à l'autre. Elles n'ont donc pas la précision de corrélations établies sur un nombre restreint de résultats d'essais effectués avec des procédures très précises. Leur intérêt vient surtout du nombre exceptionnel de valeurs qu'elles englobent. Elles sont les suivantes :

- diagramme de plasticité,
- angle de frottement effectif en fonction de l'indice de plasticité,
- angle de frottement effectif en fonction du pourcentage d'argile,
- cohésion apparente obtenue par le pénétromètre de poche en fonction de l'indice de liquidité,
- cohésion apparente obtenue par un essai de compression simple en fonction de l'indice de liquidité,

- cohésion apparente obtenue par le pénétromètre de poche en fonction de l'indice de consistance,
- cohésion apparente obtenue par un essai de compression simple en fonction de l'indice de consistance,
- cohésion apparente obtenue par le pénétromètre de poche en fonction de la contrainte verticale initiale en place,
- cohésion apparente obtenue par un scissomètre en fonction de la contrainte verticale initiale en place,
- cohésion apparente obtenue par un essai de compression simple en fonction de la contrainte verticale initiale en place,
- cohésion apparente obtenue par un essai de compression simple en fonction de celle obtenue par le pénétromètre de poche,
- cohésion apparente obtenue par un essai de compression simple en fonction de celle obtenue par le scissomètre,
- indice de compression en fonction de la limite de liquidité,
- indice de gonflement en fonction de la limite de liquidité,
- $(1+e_0)/C_c$ en fonction de la masse volumique sèche,
- $(1+e_0)/C_s$ en fonction de la masse volumique sèche,
- indice de compression en fonction de l'indice de gonflement,
- perméabilité en fonction du diamètre à 10% des grains.

Ce rapport traite ensuite (chapitre 5) des problèmes posés par la **classification géotechnique (USCS)** utilisée en Suisse, soit :

- des différences existant entre l'USCS défini par la norme suisse SN 670'008 et celui défini par la norme ASTM D 2487;
- et du beaucoup trop important volume de sols classés sous les symboles ML, CL et OL (surtout CL) dans les régions ayant subi les grandes glaciations.

Pour tenter de résoudre ce dernier problème, le rapport propose une subdivision de ces classes en fonction de la limite de liquidité; en outre, il suggère de compléter la désignation des sols, sur le principe de l'USCS, en introduisant la notion de degré de surconsolidation.

Enfin, le rapport discute de la **classification géologique** standard déjà proposée en Suisse, dans le cadre de ce mandat de recherche, par deux articles parus dans la revue "Route et Trafic" et du résultat de l'enquête auprès des bureaux de géotechnique suisses qui a suivi leur parution. C'est une classification génétique car c'est surtout le mode de formation des sols qui intéresse l'ingénieur civil; il donne en effet des indications d'une grande importance sur la compacité des sols et, en particulier, sur leur degré de surconsolidation.

Par rapport à la première proposition, cette classification a été complétée et probablement améliorée.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen der Revision der Norm SN 670 010 (Bodenkennziffern, März 1966) stellte sich die Kommission 272 der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS) : Unterbau- und Fundationsschichten die Aufgabe, die statistischen Grundlagen der Bodenkennziffern dieser Norm zu überarbeiten und zu vervollständigen.

Ziele dieser neuen statistischen Auswertung waren hauptsächlich:

- die Kennziffern durch Mittelwerte und Standardabweichungen zu definieren (die Tabelle der heutigen Norm gibt eher Beispiele)
- die Mittelwerte der Kennziffern feinkörniger Böden mit niedriger Fließgrenze besser zu definieren, unter anderem durch Unterteilung der USCS-Klassen : ML, CL und OL in Unterklassen und durch die Einführung des Überkonsolidationsgrades.
- der Versuch, eine geologische Standardklassifizierung in der Schweiz einzuführen.

Zu diesem Zweck wurde eine Datenbank aufgebaut, und die geotechnischen Kennwerte von ca. 6'000 Bodenproben wurden eingegeben. 4'000 dieser Proben stammen aus der Region Genf, 500 aus anderen Gebieten der Romandie und ungefähr 1'500 aus der deutschen und italienischen Schweiz.

Zunächst wurde der Einfluss des grossen Anteils Proben aus der Region Genf an der Gesamtheit der Proben untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass eine Gewichtung der Genfer Proben nicht notwendig war. Dies lässt sich hauptsächlich durch die Tatsache erklären, dass die Böden dieser Region und fast alle Böden der übrigen Schweiz den gleichen geologischen Ursprung haben.

Im Mittel wurden jeder Probe mehr als zwanzig geotechnische Kennziffern zugeordnet, so dass für die statistische Auswertung etwa 150'000 Kennziffern zur Verfügung standen.

Der erste Teil der **statistischen Analyse**, der in Kapitel 3 beschrieben ist, umfasst für jede USCS-Klasse und für alle aus der ganzen Schweiz stammenden Proben :

- Kornverteilungskurven mit Standardabweichung und Berechnung der prozentualen Anteile an Ton, Silt, Sand und Kies
- Histogramme der wichtigsten Bodenkenziffern mit Mittelwert, Standardabweichung und Schiefe.
- Tabellen der mittleren Kennziffern und ihrer Streuung.

Die Ergebnisse dieser statistischen Untersuchungen sind in mehr als 100 Abbildungen und Tabellen dargestellt.

Zahlreiche **Korrelationen** zwischen den für den Ingenieur wichtigsten Bodenkenziffern wurden abgeleitet; sie sind Gegenstand des Kapitels 4. Sie basieren auf Ergebnissen von Versuchen an einer grossen Anzahl Proben. Diese wurden in verschiedenen Laboratorien unter Anwendung leicht unterschiedlicher, im Detail nicht bekannter Verfahren durchgeführt. Die so berechneten Korrelationen sind nicht so genau, wie diejenigen, welche auf Resultaten aus einer beschränkten Anzahl Proben bei klar definiertem Versuchsablauf gewonnen wurden; ihre Bedeutung liegt vielmehr in der Vielzahl der Einflussgrössen, welche sie abdecken.

Diese sind im einzelnen :

- Plastizitäts-Diagramm
- effektiver Reibungswinkel in Abhängigkeit von der Plastizitätszahl
- effektiver Reibungswinkel in Abhängigkeit des prozentualen Anteils an Ton
- undrainierte Kohäsion, bestimmt mit dem Taschenpenetrometer in Abhängigkeit von der Fließzahl

- undrainierte Kohäsion bestimmt aus dem einfachen Druckversuch in Abhängigkeit von der Fliesszahl
- undrainierte Kohäsion, bestimmt mit dem Taschenpenetrometer in Abhängigkeit von der Konsistenzzahl
- undrainierte Kohäsion, bestimmt mit dem einfachen Druckversuch in Abhängigkeit von der Konsistenzzahl
- undrainierte Kohäsion, bestimmt mit dem Taschenpenetrometer in Abhängigkeit vom anfänglichen Überlagerungsdruck
- undrainierte Kohäsion, bestimmt mit der Flügelsonde in Abhängigkeit vom anfänglichen Überlagerungsdruck
- undrainierte Kohäsion, aus dem einfachen Druckversuch, in Abhängigkeit vom anfänglichen Überlagerungsdruck
- undrainierte Kohäsion, aus dem einfachen Druckversuch, im Vergleich zu derjenigen aus einer Messung mit dem Taschenpenetrometer
- undrainierte Kohäsion, aus dem einfachen Druckversuch, im Vergleich zu derjenigen aus einer Messung mit der Flügelsonde
- Kompressionsbeiwert in Abhängigkeit von der Fliessgrenze
- Schwellbeiwert in Abhängigkeit von der Fliessgrenze
- $(1+e_0)/C_c$ in Abhängigkeit von der Trockendichte
- $(1+e_0)/C_s$ in Abhängigkeit von der Trockendichte
- Kompressionsbeiwert in Abhängigkeit des Schwellbeiwertes
- Durchlässigkeit in Abhängigkeit des Durchmessers bei 10% Kornanteil.

Der Bericht befasst sich sodann im Kapitel 5 mit den Problemen, welche sich aus der in der Schweiz gebräuchlichen **geotechnischen Klassifizierung** (USCS) ergeben; nämlich :

- den bestehenden Unterschieden zwischen der USCS, welche durch die Norm SN 670 008 definiert ist, und der Norm ASTM D 2487
- den anteilmässig wesentlich bedeutenderen Böden unter der Bezeichnung ML, CL und OL (insbesondere CL) in Gebieten, welche bei der Vergletscherung grossen Eislasten ausgesetzt waren.

Mit dem Ziel, das letztgenannte Problem zu lösen, wird in dem Bericht eine weitere Unterteilung dieser Klassen in Abhängigkeit von der Fliessgrenze vorgeschlagen. Des weiteren wird zur Vervollständigung der Bezeichnung von Böden gemäss den Regeln des USCS der Überkonsolidationsgrad eingeführt.

Abschliessend werden die Möglichkeiten einer **geologischen Standardklassifizierung**, wie sie bereits im Rahmen eines Forschungsprojektes vorgeschlagen wurde, anhand zweier in der Fachzeitschrift "Strasse und Verkehr" erschienener Artikel und einer Umfrage unter den geotechnischen Ingenieurbüros der Schweiz diskutiert. Dabei handelt es sich um eine genetische Klassifizierung, da den Bauingenieur in erster Linie die Art der Entstehung der Böden interessiert. Diese gibt wesentliche Aufschlüsse über die Lagerung der Böden und insbesondere über deren Überkonsolidationsgrad.

Gegenüber dem ersten Vorschlag wurde diese Klassifizierung verbessert und vervollständigt.

ABSTRACT

In view of the revision of the Standard SN 670010 : characteristic coefficients of soils, dated March 1966), the Committee 272 of the Swiss society of road professionals (VSS) : Sub-base and natural ground, has decided to review and complete the statistics upon which the table of average characteristics of this standard is based.

The new analysis has the following aims:

- to define the characteristics by average values and standard deviations (the table of the current standard gives only examples),
- to define more accurately the average characteristics of fine-grained soils with low liquid limits by dividing the USCS classes ML, CL and OL into subclasses and by including the notion of overconsolidation,
- to attempt to introduce a standard geological classification system in Switzerland.

With these aims in mind, a database has been created with the geotechnical characteristics from approximately 6000 samples. Among these samples, approximately 4000 came from the Geneva region, 500 from the rest of the French-speaking parts Switzerland and approximately 1500 from the German and Italian-speaking regions. The effect of the large number of samples from the Geneva region with respect to the rest of Switzerland was studied in the early stages of the project. This study showed that a ponderation of the Geneva samples was not necessary, due to the fact that the soils of this region have the same geological origins as those of almost all of the soils from the rest of Switzerland.

As more than twenty geotechnical characteristics are associated with each sample, the statistical study was carried out on a database of more than 150'000 characteristics.

The first phase of the **statistical analysis**, which is the subject of Chapter 3, consisted of the establishment of the following documents for each USCS class, as well as for the totality of all the samples:

- grain size distribution envelopes with standard deviation and percentages of clay, silt, sand and gravel,
- bar charts of the principal soil characteristics with average, standard deviation and coefficient of skewness,
- tables of average characteristics and their variabilities.

The results of these statistical analyses are presented in over 100 figures and tables.

Numerous **correlations** among those soil characteristics which are most important for the engineer were obtained and are presented in Chapter 4. These correlations result from test results of a large number of samples from different laboratories, whose test procedures are not known in detail and probably vary slightly from one laboratory to another. Thus, these relations do not have the precision that would be obtained from a smaller number of tests carried out with identical procedures. The merit of such correlations lies in the exceptionally large number of quantities that were considered. These correlations are the following :

- plasticity diagram,
- effective internal friction angle as a function of the plastic limit,
- effective internal friction angle as a function of the percentage of clay particles,
- undrained cohesion obtained by pocket penetrometer as a function of the liquid limit,
- undrained cohesion obtained by unconfined compression as a function of the liquid limit,
- undrained cohesion obtained by pocket penetrometer as a function of the consistency index,
- undrained cohesion obtained by unconfined compression as a function of the consistency index,

- undrained cohesion obtained by pocket penetrometer as a function of the effective overburden pressure,
- undrained cohesion obtained by scissometer as a function of the effective overburden pressure,
- undrained cohesion obtained by unconfined compression as a function of the effective overburden pressure,
- undrained cohesion obtained by unconfined compression as a function of that obtained by pocket penetrometer,
- undrained cohesion obtained by unconfined compression as a function of that obtained by scissometer,
- compression index as a function of the liquid limit,
- swelling index as a function of the liquid limit,
- $(1+e_0)/C_c$ as a function of the density of dry soil,
- $(1+e_0)/C_s$ as a function of the density of dry soil,
- compression index as a function of the swelling index,
- permeability as a function of the diameter of 10% of the particles.

This report also addresses the problems posed by a the **geotechnical classification** (USCS) used in Switzerland (Chapter 5); that is to say:

- the differences which exist between the USCS defined by the Swiss Standard SN 670'008 and that defined by the Standard ASTM D 2487,
- the excessive number of soils classed under the symbols ML, CL and OL (especially CL) in regions which experienced large glaciations.

In an attempt to resolve this last problem, the report proposes a subdivision of these classes as a function of the liquid limit. In addition, the suggestion is made to complete the soil designation, along the lines of the USCS, by introducing the notion of degree of overconsolidation.

Finally, the report discusses the **standard geological classification** already proposed in Switzerland, included in the scope of this research grants, in two articles which appeared in the journal "Route and Traffic" and the results of a survey of Swiss geotechnical companies which read these articles. The classification is a genetic one, as the manner in which soils were formed is of primary interest to the civil engineer. Certain important indications concerning soil compacity and, in particular, their degree of overconsolidation are given.

This classification has been completed and most probably improved with respect to the first proposal.

1. Mandat et buts

En vue de la révision de la norme SN 670010 : coefficients caractéristiques des sols, qui date de mars 1966, la Commission 272 de la VSS : infrastructure et couches de fondation, a souhaité revoir et compléter la statistique à la base du tableau des caractéristiques moyennes de cette norme.

Cette nouvelle analyse statistique devait notamment :

- définir les caractéristiques par des moyennes et des écarts types (le tableau de la norme actuelle donne plutôt des exemples), ce qui permettrait notamment de donner, pour les sols fins, des résistances moyennes au cisaillement plus proche de la réalité;
- mieux définir les caractéristiques moyennes des sols fins à basse limite de liquidité, entre autres en divisant en sous-classes les classes USCS ML, CL et OL et en introduisant la notion de degré de surconsolidation;
- tenter d'introduire en Suisse une classification géologique standard.

Un premier mandat de recherche (8/82) a été confié en 1982 au bureau "Géotechnique appliquée P. & C. Dériaz & Cie SA" à Genève qui possédait déjà une base de données comprenant les caractéristiques de plusieurs milliers d'échantillons de sols genevois. Avec l'aide du Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL (LMS) qui a fourni, sans frais, un gestionnaire de base de données et le support informatique, le mandataire a exploité dans le sens du mandat, la plus grande partie des échantillons genevois et des échantillons tirés des archives du LMS provenant du plateau vaudois, du Jura, de la plaine du Rhône et des Préalpes vaudoises et fribourgeoises. Les caractéristiques d'environ 5000 échantillons ont été introduites dans la base de données du LMS ce qui a permis d'établir déjà diverses statistiques et corrélations. Il a en outre proposé une classification géologique pouvant être avantageusement associée à la classification USCS.

Ce mandataire a présenté plusieurs rapports intermédiaires qui ont permis à la commission VSS 272 de suivre et d'orienter ce mandat de recherche. Le taux d'occupation du mandataire ne lui a pas permis de poursuivre ce mandat dans un délai raisonnable. Il a ainsi rédigé un dernier rapport intermédiaire daté du 9 juin 1988 et a souhaité voir le LMS reprendre ce mandat jusqu'à sa conclusion.

La commission VSS 272 et la Commission de recherche en matière de routes du Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie ont accepté cette proposition et le LMS a pu poursuivre alors ces travaux statistiques au moyen des crédits de recherche 18/88 d'un montant de Fr. 60'000.- et 16/91 d'un montant de Fr. 80'000.-.

Cette deuxième phase de la recherche réalisée par le LMS devait :

- Etendre à l'ensemble de la Suisse le travail statistique réalisé sur la Suisse romande. Il s'agissait notamment de collationner les caractéristiques d'environ 2000 échantillons supplémentaires au "Tiefbauamt" de Berne, à l'"Institut für Grundbau und Bodenmechanik" de l'ETHZ et au Département des travaux publics du canton du Tessin à Bellinzone.
- Exploiter statistiquement l'ensemble des caractéristiques de tous les échantillons suisses (environ 6000).
- Proposer de nouvelles valeurs moyennes et variabilités pour les diverses classes de l'USCS en étendant les classes des sols fins.
- Tester la classification géologique proposée sur l'ensemble des sols suisses.

2. Méthode de la recherche

2.1 Données de base

Le nombre d'informations qui font objet de ce travail est estimé à plus de 150 000. Elles ne peuvent être traitées qu'avec l'aide d'une base de donnée appropriée et de son gestionnaire. Pour cette étude, c'est la base de données BACAGE (BANque des CARactéristiques GEO-techniques) développée par le Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL (LMS) qui a été utilisée. Son programme de gestion permet notamment, d'une part d'introduire les informations dans la base et d'autre part de les extraire en appliquant divers critères de recherche.

L'introduction des données dans la base se fait de deux façons:

- par un dialogue interactif : à l'aide du clavier on introduit une caractéristique de sol après l'autre,
- par la lecture directe d'un support magnétique sur lequel les informations sur les échantillons ont été préalablement enregistrées.

Le contenu de la base de données que possédait le premier mandataire de ce travail de recherche : le bureau "Géotechnique appliquée P.& C. Dériaz & Cie SA" à Genève, a pu être ainsi transmis directement dans la base de données BACAGE et exploité avec les échantillons tirés des archives du LMS; ces derniers, provenant essentiellement des cantons romands autres que Genève, ont été introduits dans la base BACAGE par dialogue interactif.

Toutes ces informations stockées dans BACAGE ont permis d'établir diverses statistiques et corrélations valables pour la Suisse romande.

2.2 Données complémentaires

Les caractéristiques des sols recueillies avant le début du mandat confié au LMS ne provenaient que de la Suisse romande. Il fallait donc les compléter par celles provenant de la Suisse allemande et du Tessin. La mandat du LMS a ainsi débuté par un très gros travail de compilation auprès de quelques institutions possédant, en bibliothèque, de nombreuses études géotechniques provenant de l'ensemble de la Suisse non romande. Les institutions visitées et le nombre d'échantillons introduits dans BACAGE furent les suivants :

• Autobahnamt des Kantons Bern	626 échantillons
• Strade nazionali Belinzona	73 échantillons
• Institut für Grundbau und Bodenmechanik ETH	687 échantillons
Total	1386 échantillons

Cette compilation fut difficile et longue car la forme et la présentation des résultats des essais géotechniques diffèrent fortement d'un rapport à l'autre. Par exemple de nombreux rapports suisses allemands ne donnent que la courbe œdométrique sans aucune valeur correspondante; il a donc fallu mesurer sur le graphique et calculer tous les paramètres qui devaient être introduits dans BACAGE, notamment σ_{v0}' , C_c et C_s . Quelque trois quarts d'heure furent ainsi nécessaires à l'introduction en banque de données des caractéristiques géotechniques de chacun de ces échantillons.

Ce constat est à l'origine du projet d'une norme sur la présentation des paramètres géotechniques qui est en cours de rédaction au sein de la sous-commission VSS 272.11 : essais et classification des sols.

Après l'introduction de ces 1386 échantillons supplémentaires dans BACAGE, le nombre total d'échantillons de sol traités dans le cadre de ce mandat est de 6175. Leur répartition géographique fait l'objet de la figure 2.1 et celle par classe USCS (selon SN 670'008) celui de la figure 2.2.

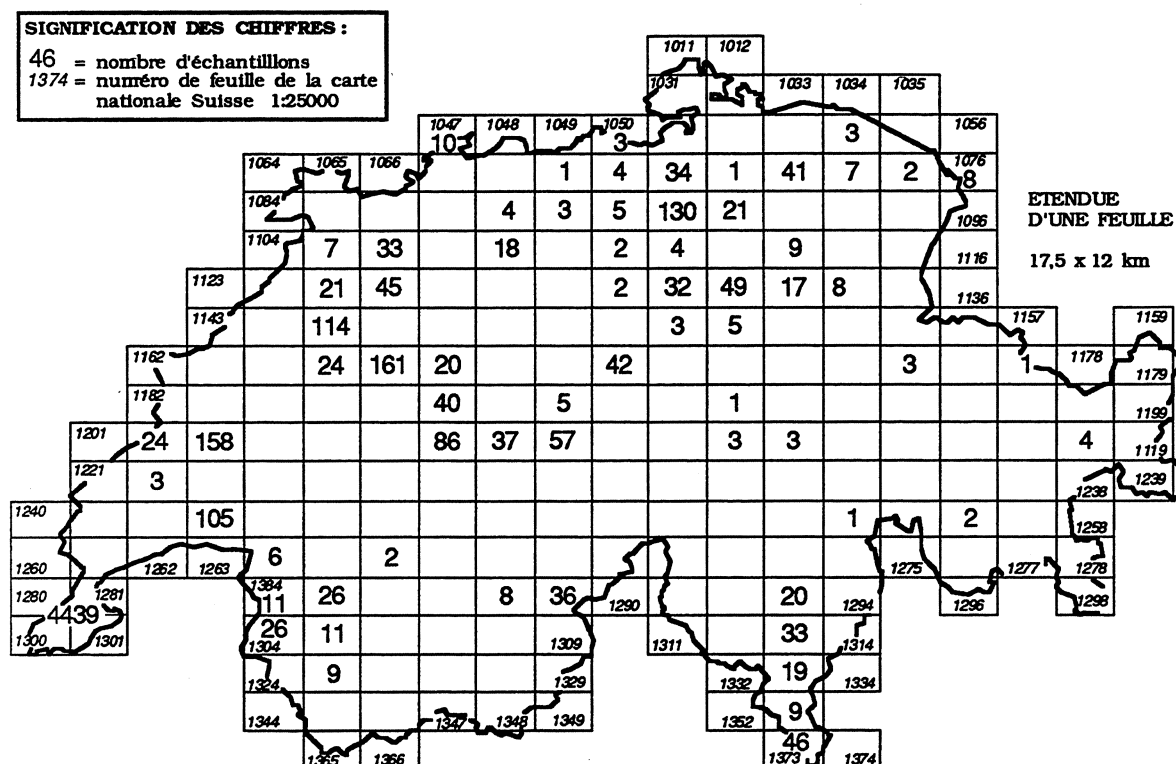


Fig 2.1 Répartition géographique des échantillons de sol

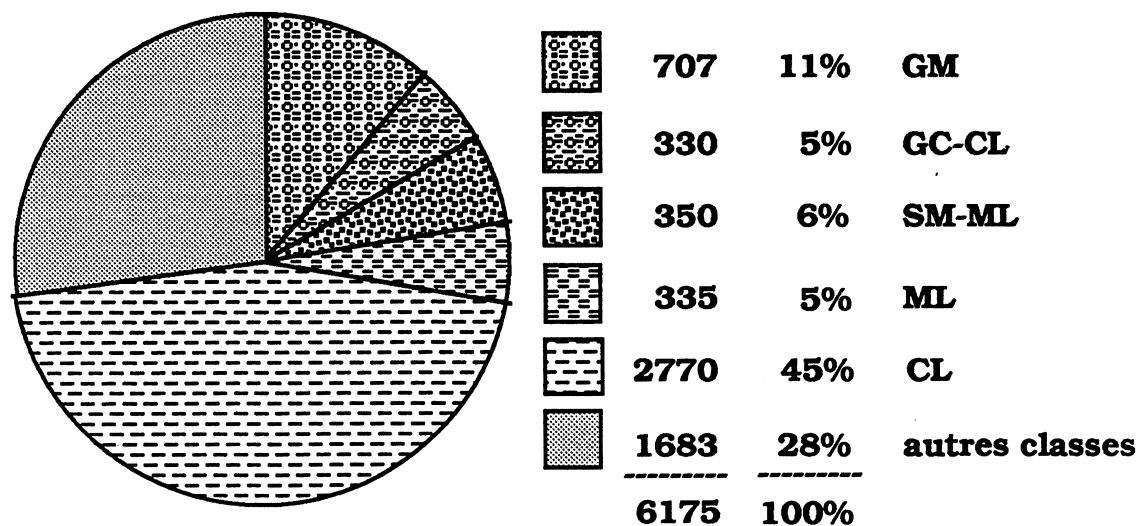


Fig 2.2 Nombre d'échantillons par classe USCS

2.3 Pondération des données genevoises

Bien que les échantillons stockés dans la banque viennent de toute la Suisse, leur nombre en fonction de leur origine géographique est largement disproportionné. Ainsi et par exemple près des 2/3 de tous les échantillons sont d'origine genevoise (Fig. 2.1). A première vue, une pondération des échantillons genevois est nécessaire.

Pour contrôler l'opportunité d'une telle pondération nous avons comparé les courbes granulométriques et les limites de consistance de presque toutes les classes USCS des trois groupes d'échantillons :

- la Suisse entière (CH),
- la région genevoise (GE),
- et le Suisse sans Genève (CH-GE).

La répartition des échantillons de ces trois groupes en fonction de l'USCS (toujours selon SN 670'008 qui diffère un peu de l'USCS selon ASTM, voir chapitre 5) fait l'objet de la figure 2.3.

classe USCS	Nombre total d'échantillons			Nombre d'essai granulométriques d'Atterberg en Suisse et dans les régions					
	CH	GE	CH-GE	CH	GE	CH-GE	CH	GE	CH-GE
GW	40	37	3	40	37	3	1		1
GP	102	93	9	102	93	9			
GM	707	699	8	707	699	8	9	2	7
GC	184	15	169	183	14	169	72	15	57
GM-ML	175	169	6	175	169	6	7	3	4
GM-GC	73	41	32	73	41	32	73	41	32
GC-CL	330	193	137	328	193	135	317	181	136
GC-CH	6		6	6		6			
SW	1		1	1		1			
SP	22	15	7	22	15	7			
SM	149	130	19	144	126	18	10	4	6
SC	34	2	32	32		32	3	2	1
SM-ML	350	278	72	350	278	72	49	11	38
SM-SC	94	44	50	94	44	50	94	44	50
SC-CL	275	191	84	273	191	82	258	176	82
SC-CH	32		32	32		32	3		3
ML	335	222	113	319	207	112	127	59	68
CL-ML	244	175	69	193	124	69	243	175	68
CL	2770	2095	675	1921	1277	644	2692	2046	646
CH	118	9	109	108	6	102	94	9	85
OL	25	2	23	25	2	23	23	2	21
OH	26		26	26		26	26		26
MH	64	3	61	62	1	61	64	3	61
Pt	19		19	2		2	3		3
Totaux	6175	4413	1762	5218	3517	1701	4168	2773	1395

origine des échantillons : **CH** la Suisse entière
GE la région genevoise
CH-GE la Suisse sans Genève

Fig 2.3 Répartition des échantillons genevois et suisses classés selon l'USCS

Les courbes granulométriques des échantillons genevois et suisses pour les différentes classes USCS sont présentées dans les figures 2.4 à 2.13. Leurs droites de régression et leurs variabilités dans le diagramme de plasticité font elles l'objet de la figure 2.14.

La comparaison des granulométries et des diagrammes de plasticité ne montre pas de différences significatives entre les échantillons de la région genevoise et ceux du reste de la Suisse. Une pondération nous a ainsi paru inutile.

La similitude entre les sols genevois et ceux du reste de la Suisse s'explique surtout par l'origine glaciaire commune de la plupart de ces sols et par la présence, sur toute la région des Alpes, des principales nappes géologiques.

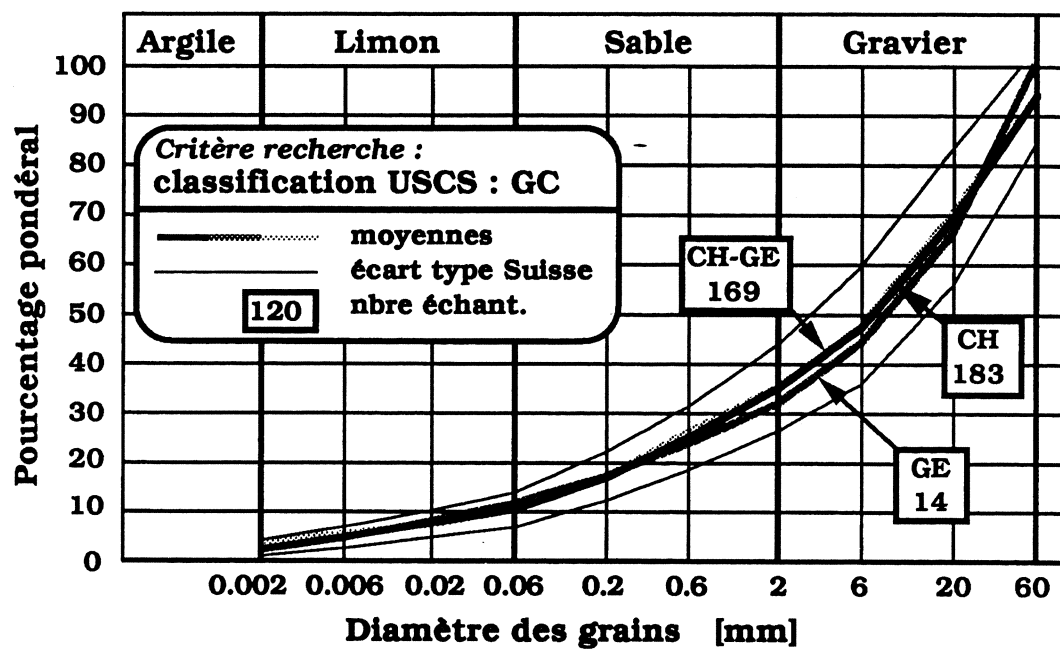


Fig 2.4 Fuseaux granulométriques de la classe USCS: GC

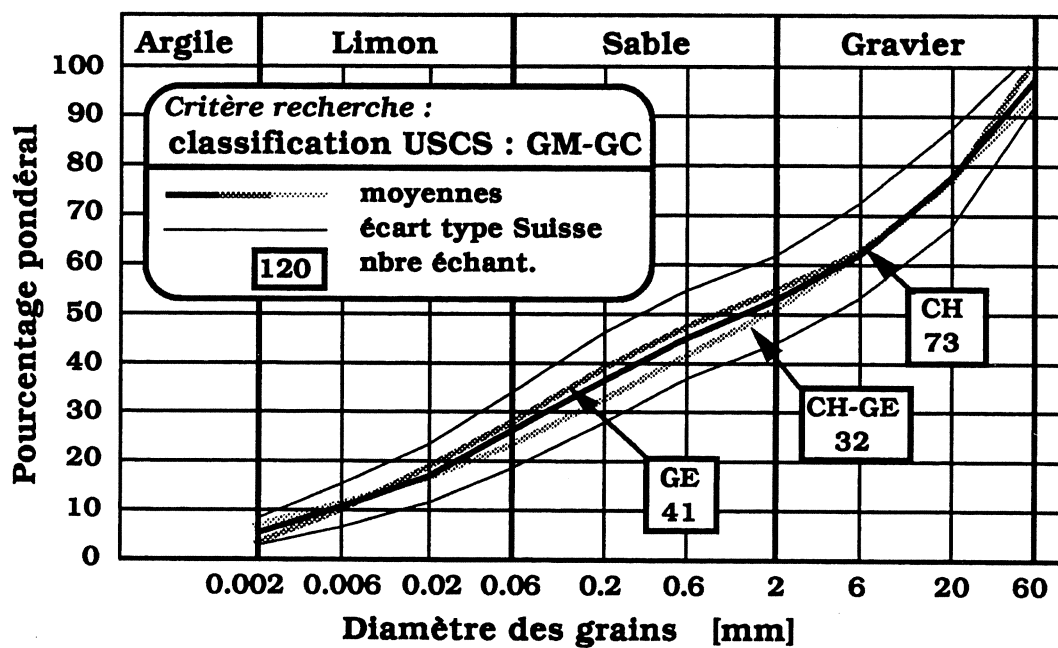


Fig 2.5 Fuseaux granulométriques de la classe USCS: GM-GC

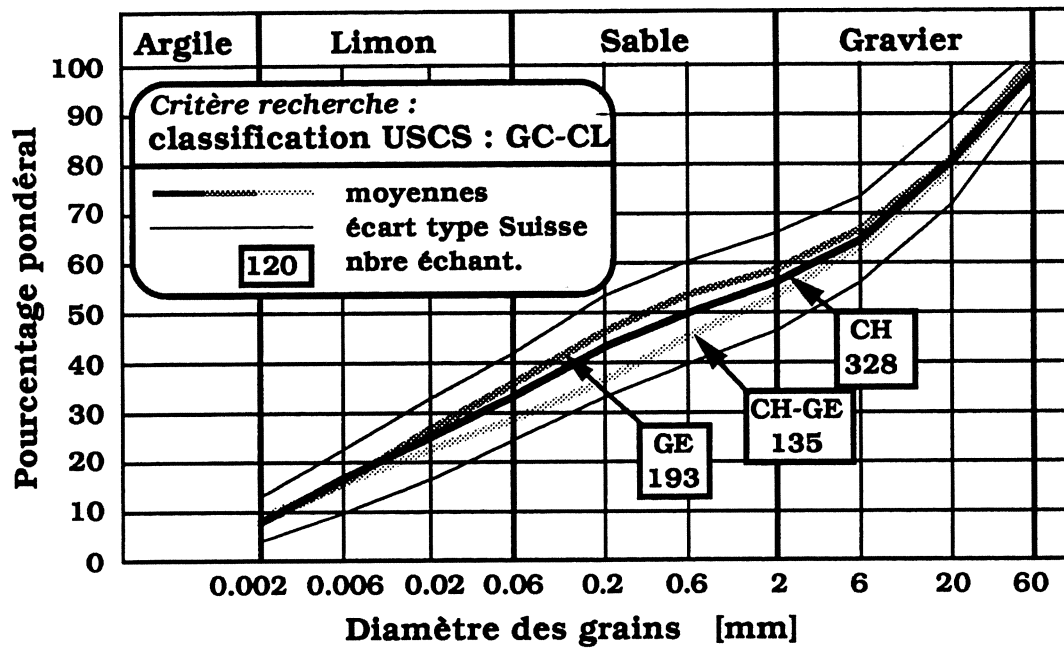


Fig 2.6 Fuseaux granulométriques de la classe USCS: GC-CL

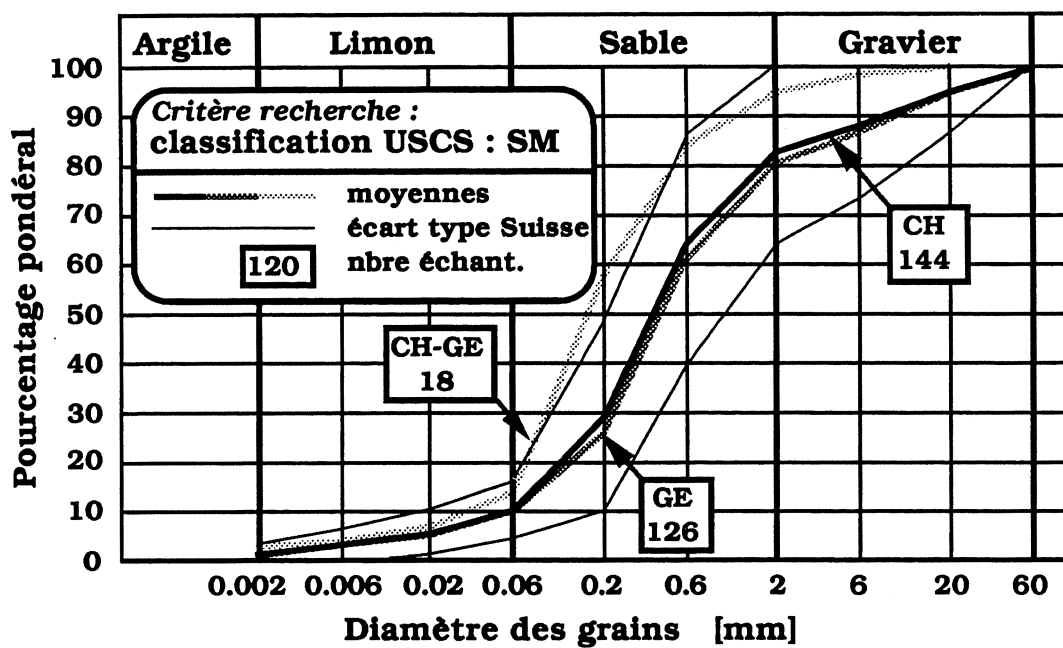


Fig 2.7 Fuseaux granulométriques de la classe USCS: SM

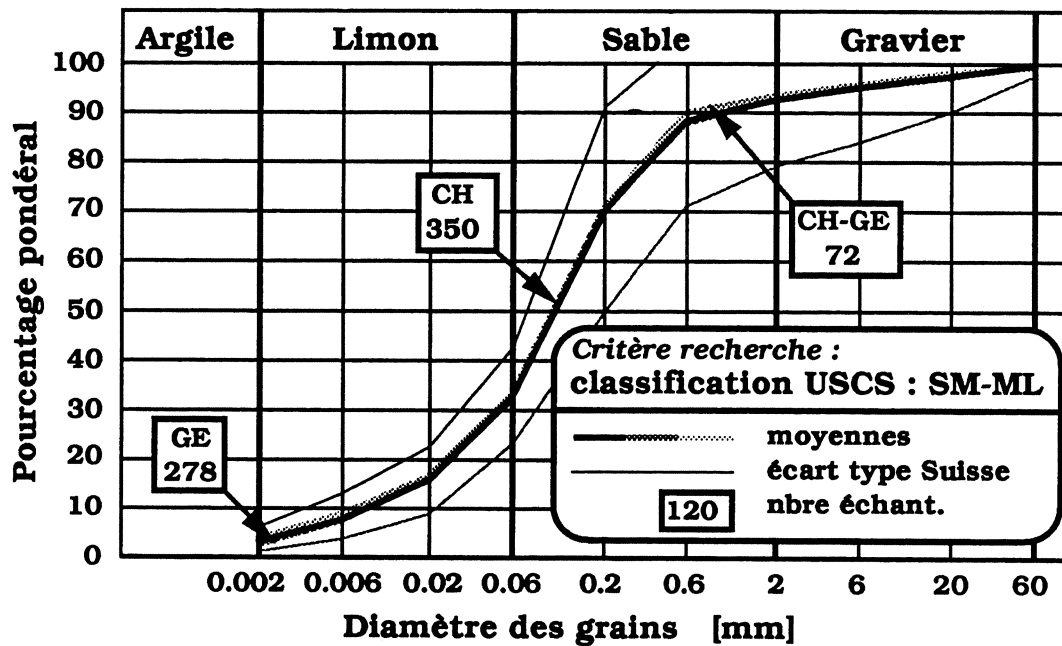


Fig 2.8 Fuseaux granulométriques de la classe USCS: SM-ML

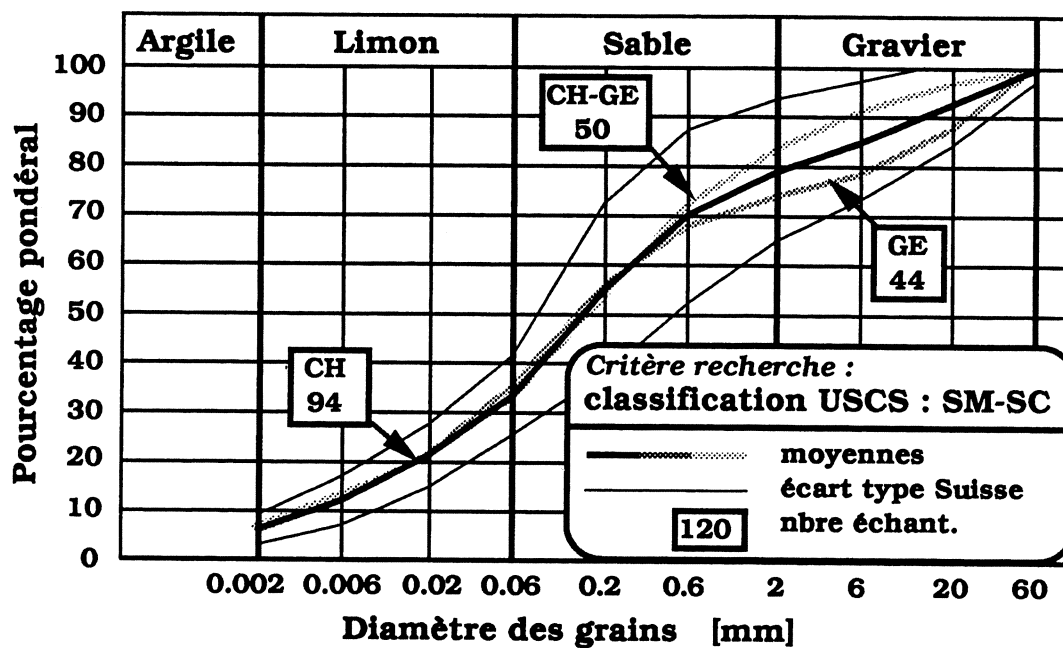


Fig 2.9 Fuseaux granulométriques de la classe USCS: SM-SC

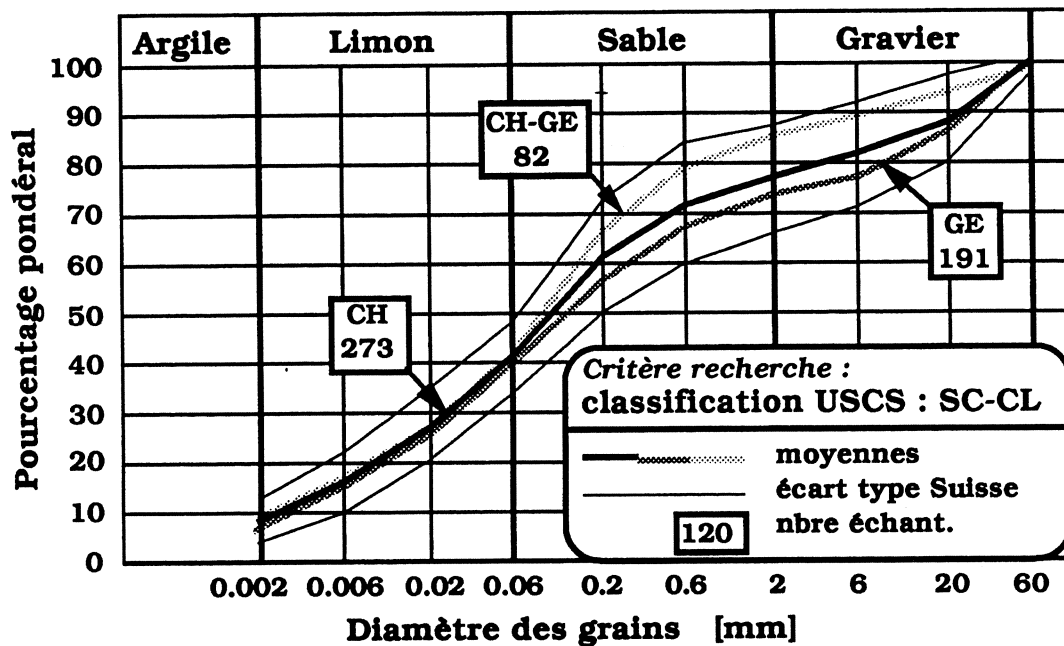


Fig 2.10 Fuseaux granulométriques de la classe USCS: SC-CL

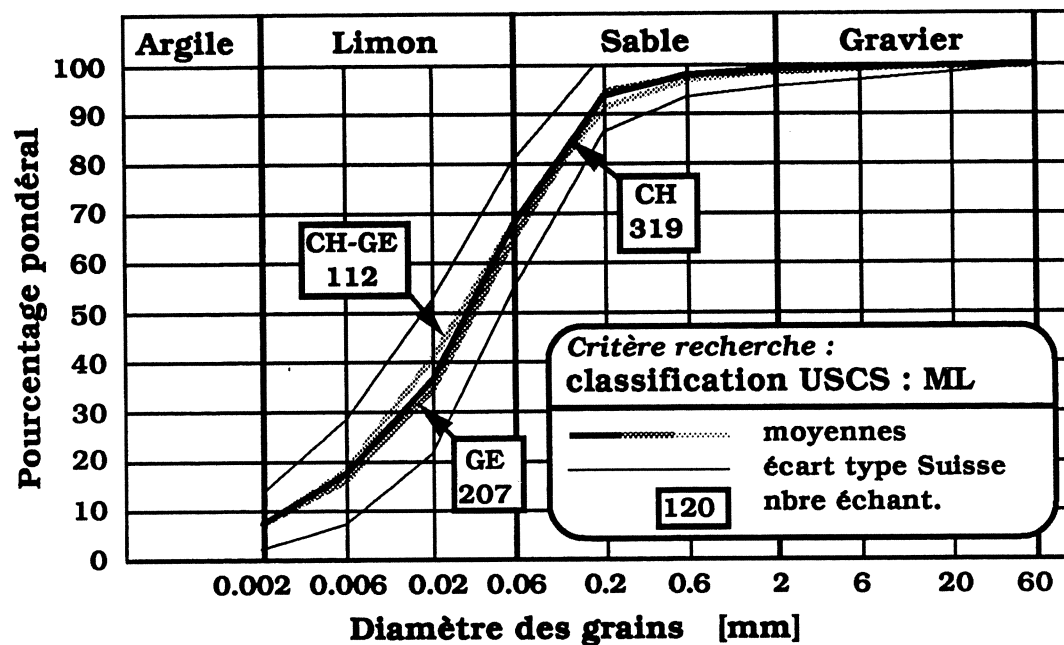


Fig 2.11 Fuseaux granulométriques de la classe USCS: ML

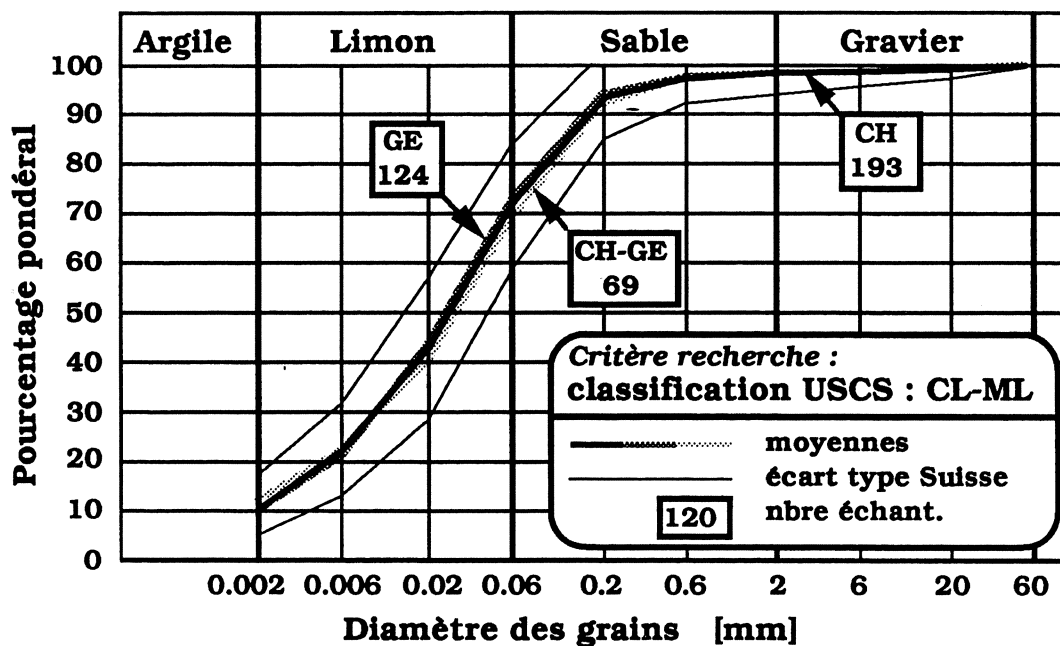


Fig 2.12 Fuseaux granulométriques de la classe USCS: CL-ML

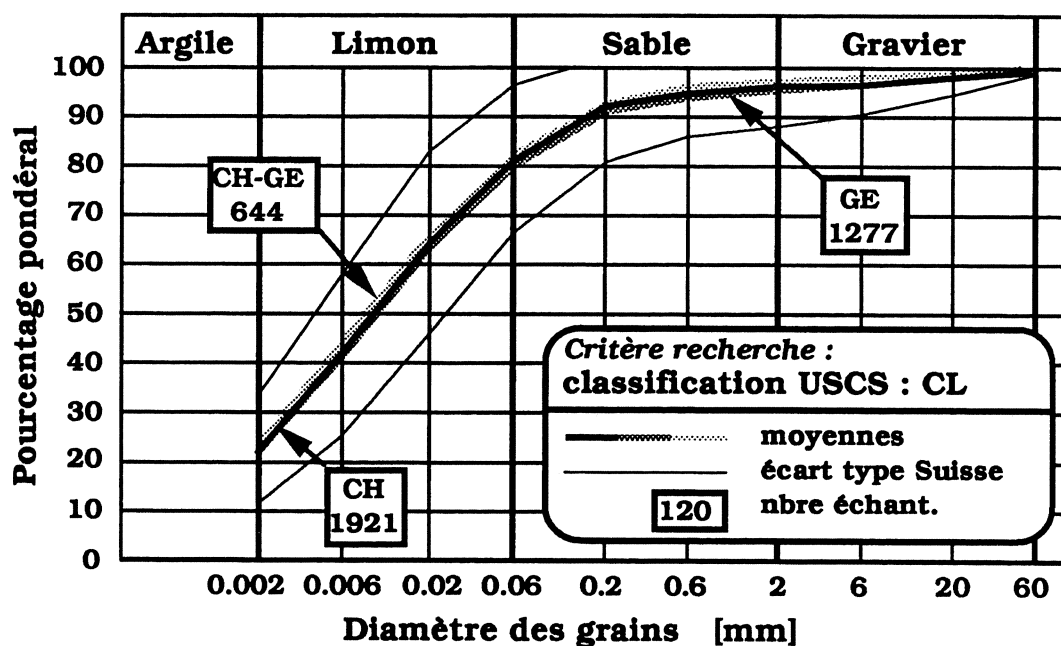


Fig 2.13 Fuseaux granulométriques de la classe USCS: CL

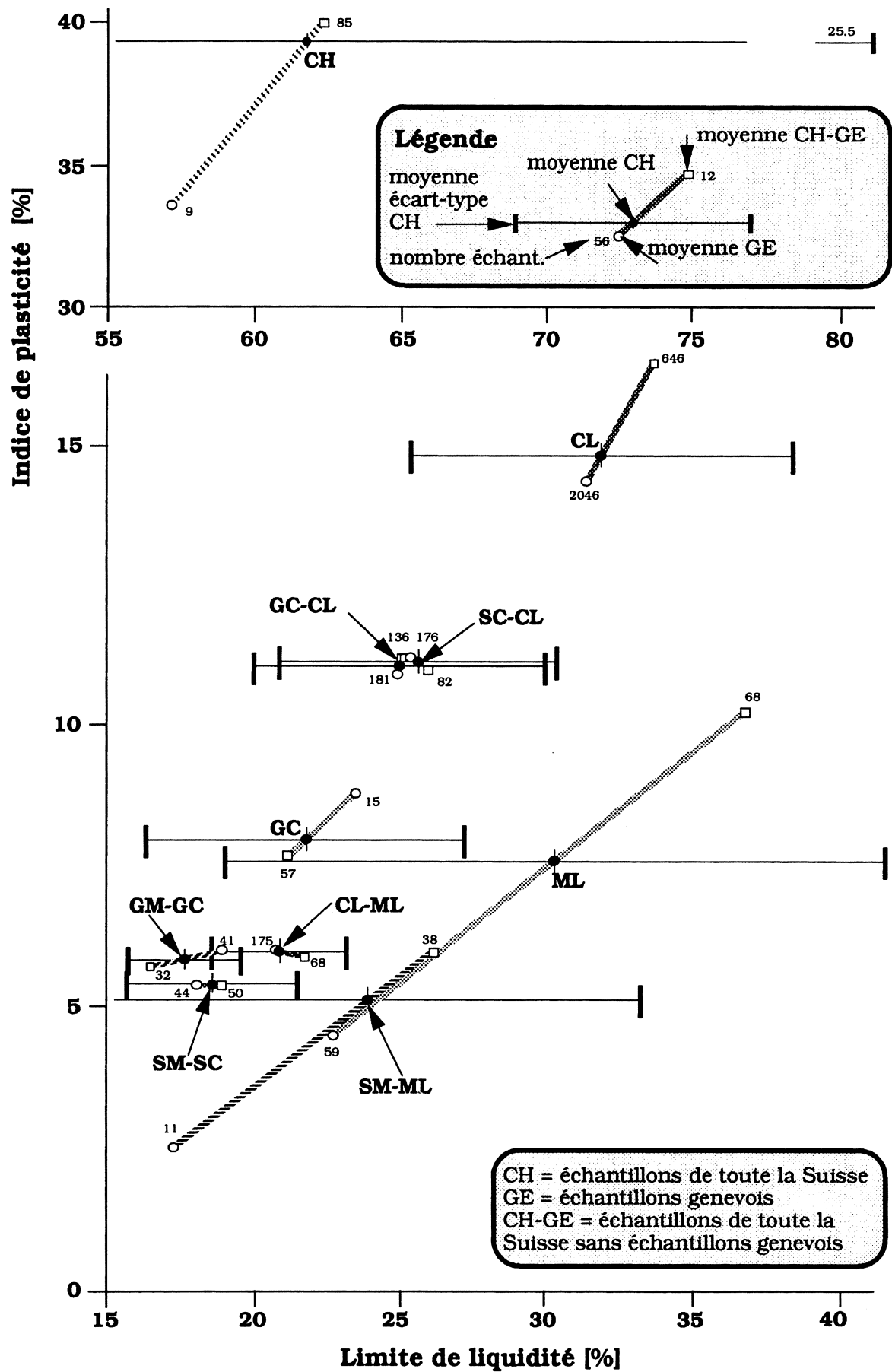


Fig 2.14 Pondération des sols suisses et genevois. Diagramme de plasticité

2.4 Statistiques

Nous entendons par "statistique" l'établissement, pour chaque classe USCS et pour l'ensemble des échantillons de toutes la Suisse, :

- des fuseaux granulométriques avec écart type qui permettront notamment de calculer les pourcentages d'argile, de limon, de sable et de gravier;
- des histogrammes des principales caractéristiques des sols avec calcul de la moyenne μ , de l'écart type S et du coefficient de dissymétrie β_1 qui est défini par la figure 2.15.

Les valeurs obtenues par cette étude statistique doivent, en premier lieu, servir à l'établissement du tableau des caractéristiques moyennes des sols suisses lors de la révision de la norme SN 670'010.

Les résultats de cette vaste analyse statistique font l'objet du chapitre 3.

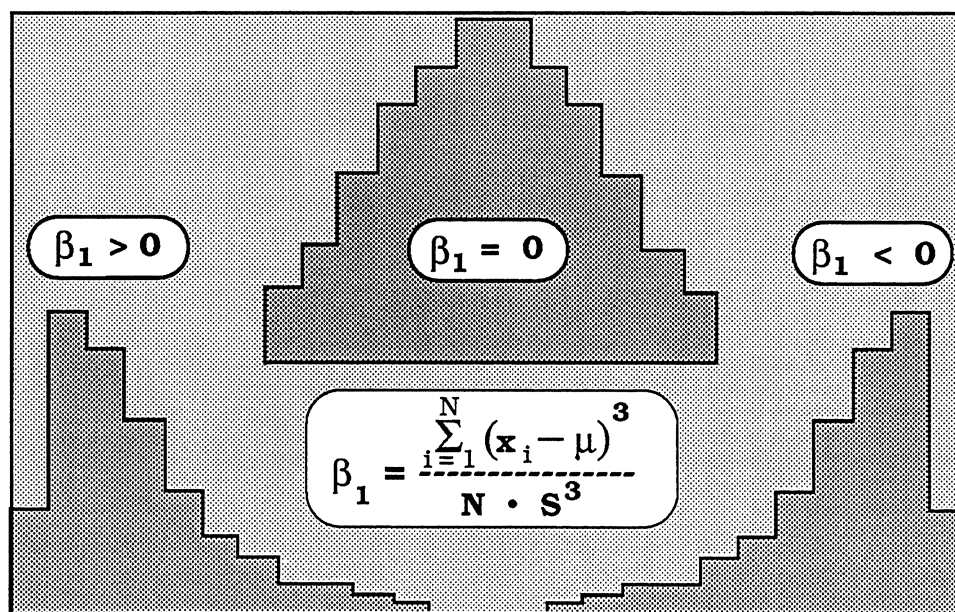


Fig 2.15 Signification du coefficient de dissymétrie β_1

2.5 Corrélations

Pour un ingénieur géotechnicien et, encore plus, pour un laboratoire de mécanique des sols d'une école polytechnique, la disposition d'en moyenne 20 caractéristiques des sols par échantillon sur une population de quelque 7000 échantillons ne peut conduire qu'à l'établissement de diverses corrélations dont l'ensemble de la profession est très gourmand!

Il faut cependant avoir à l'esprit qu'il existe deux types de corrélations :

- des corrélations établies sur un nombre restreint de résultats d'essais mais avec des procédures d'essai très précises, dans un même laboratoire et si possible par un même opérateur; de telles corrélations sont le plus souvent réalisées dans le cadre d'une thèse ou par un laboratoire de recherche;
- des corrélations établies sur un très grand nombre de résultats d'essais provenant d'échantillons traités par différents laboratoires avec des procédures d'essai pas connues en détail et probablement un peu différentes d'un laboratoire à l'autre.

Les corrélations que nous avons réalisées sont du deuxième type et leur intérêt vient surtout du nombre important de valeurs qu'elles englobent.

Les corrélations suivantes ont été ainsi établies et leurs résultats font l'objet du chapitre 4 :

- diagramme de plasticité
- angle de frottement effectif Φ' en fonction de l'indice de plasticité I_p
- angle de frottement effectif Φ' en fonction du pourcentage d'argile
- cohésion apparente obtenue par le pénétromètre de poche c_{up} en fonction de l'indice de liquidité I_L ($I_L = (w - w_p)/I_p$)
- cohésion apparente obtenue par un essai de compression simple c_u en fonction de l'indice de liquidité I_L
- cohésion apparente obtenue par le pénétromètre de poche c_{up} en fonction de l'indice de consistance I_C ($I_C = (w_L - w)/I_p$)
- cohésion apparente obtenue par un essai de compression simple c_u en fonction de l'indice de consistance I_C
- cohésion apparente obtenue par le pénétromètre de poche c_{up} en fonction de la contrainte verticale initiale en place σ_{v0}'
- cohésion apparente obtenue par un scissomètre c_{us} en fonction de la contrainte verticale initiale en place σ_{v0}'
- cohésion apparente obtenue par un essai de compression simple c_u en fonction de la contrainte verticale initiale en place σ_{v0}'
- cohésion apparente obtenue par un essai de compression simple c_u en fonction de celle obtenue par le pénétromètre de poche c_{up}
- cohésion apparente obtenue par un essai de compression simple c_u en fonction de celle obtenue par le scissomètre c_{us}
- indice de compression C_c en fonction de la limite de liquidité w_L
- indice de gonflement C_s en fonction de la limite de liquidité w_L
- $(1+e_0)/C_c$ en fonction de la masse volumique sèche ρ_d
- $(1+e_0)/C_s$ en fonction de la masse volumique sèche ρ_d
- indice de compression C_s en fonction de l'indice de gonflement C_c
- perméabilité k_D en fonction du diamètre à 10% des grains d_{10}

La plupart de ces corrélations sont des corrélations standards de la mécanique des sols.

Sur les différents graphiques correspondant à ces relations, chaque couple de valeurs est représenté par un symbole graphique. Quand tous ces couples sont dessinés, le graphique prend l'aspect d'un nuage de points. Les points distribués aléatoirement sur toute la surface du graphique signalent qu'il n'y a aucun lien entre les deux caractéristiques. Si, au contraire, les points sont bien rangés le long d'une droite ou d'une courbe une liaison fonctionnelle existe entre les deux caractéristiques; on dit alors que la corrélation est forte ou que le degré de corrélation est élevé. Si, au contraire, le nuage de points est étalé, la corrélation est faible.

La droite (ou la courbe) de régression est la droite d'équation $y = mx + b$ qui rend minimum la somme des carrés des distances verticales (y) entre les points expérimentaux.

Le degré de la corrélation s'évalue par le coefficient de corrélation r défini par la relation suivante :

$$r = \frac{N\sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{[N\sum x^2 - (\sum x)^2][N\sum y^2 - (\sum y)^2]}}$$

avec :

x, y coordonnées des points expérimentaux
 N nombre de points

Il varie théoriquement entre 0 (pas de corrélation) et 1 (corrélation forte). Dans nos corrélations et en principe, les droites de régression ne sont données que si le coefficient de corrélation r est plus grand que 0.5 en valeur absolue.

2.6 Correction et extension de l'USCS

Lors de la rédaction de la norme suisse SN 670'008 l'USCS a été un peu malheureusement modifié; il ne correspond ainsi pas exactement au système international aujourd'hui normalisé par ASTM D 2487. Une partie du chapitre 5 discute des différences existant entre la norme suisse et la norme ASTM et de leurs conséquences.

La classification USCS n'est, en outre, de loin pas parfaite; la plus grande critique que l'on puisse faire à son égard est, pour les sols des régions ayant subi les grandes glaciations, le beaucoup trop important volume de sols classés sous le symbole CL. On constate en effet sur la figure 2.2 que 45% des échantillons analysés en Suisse sont des CL. En outre elle ne fait pas intervenir la notion de surconsolidation des sols fins qui est importante pour l'ingénieur. Une extension de ce système de classement des sols serait ainsi le bienvenu et, dans le chapitre 5, une proposition est faite dans ce sens.

2.7 Classification géologique

En Suisse, presque tous les rapports géotechniques contiennent une description géologique des sols. Les classifications géologiques utilisées sont cependant propre à chaque bureau de géologie ou de géotechnique et sont souvent un mélange (heureux pour l'ingénieur) d'une classification stratigraphique (chronologique) et de termes génétiques.

Les moyens d'information s'automatisant toujours plus et l'importance croissante des projets de génie civil conduisant de plus en plus de bureaux à travailler ensemble, le besoin d'une classification géologique standard des sols se fait aujourd'hui fortement sentir dans le domaine du génie civil.

Une classification génétique, très simple, a déjà été proposée par Dysli, Fontana, Parriaux et Schlüchter et publiée en allemand et en français [1], [2]. Sur la base de cette publication une enquête a été menée auprès de la plupart des bureaux de géotechnique et de géologie de Suisse. Le chapitre 7 décrit la classification déjà proposée et analyse les résultats de l'enquête.

3. Statistiques

3.1 Granulométrie

L'analyse statistique des granulométries est présentée graphiquement par la courbe granulométrique moyenne et les deux courbes d'écart type qui délimitent le fuseau granulométrique probable. Chaque classe USCS (selon SN 670'008), à l'exception de la classe SW pour laquelle nous ne disposons pas d'assez de granulométries, fait l'objet d'un graphique sur lequel la croix signifie que le fuseau concerne l'ensemble de la Suisse.

Ces graphiques (figures) sont numérotés de 3.1 à 3.23.

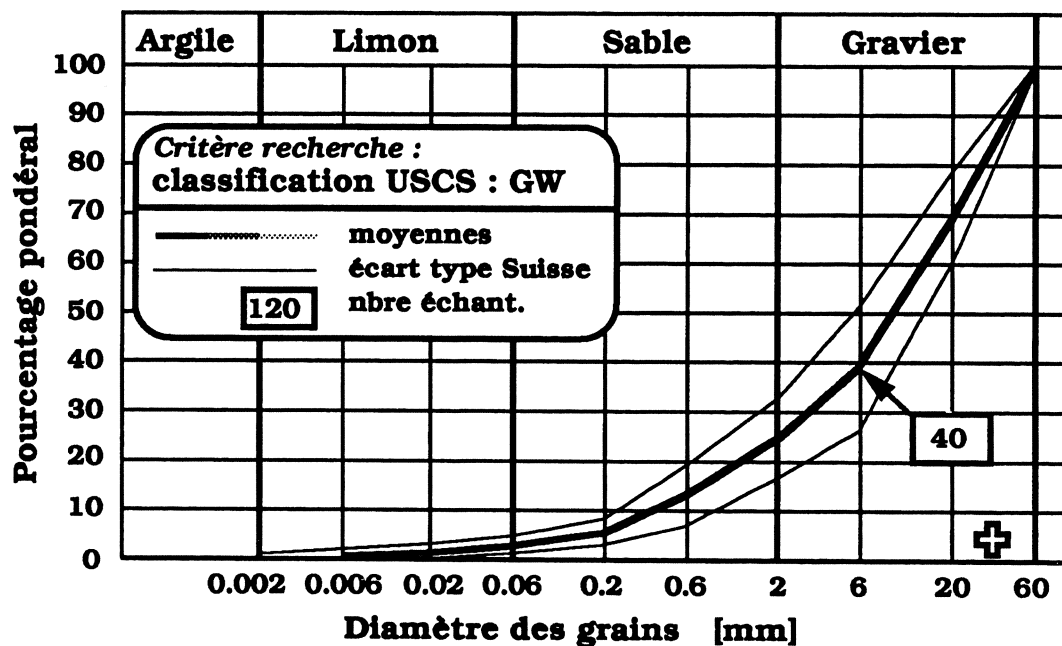


Fig 3.1 Fuseau granulométrique de la classe USCS: GW

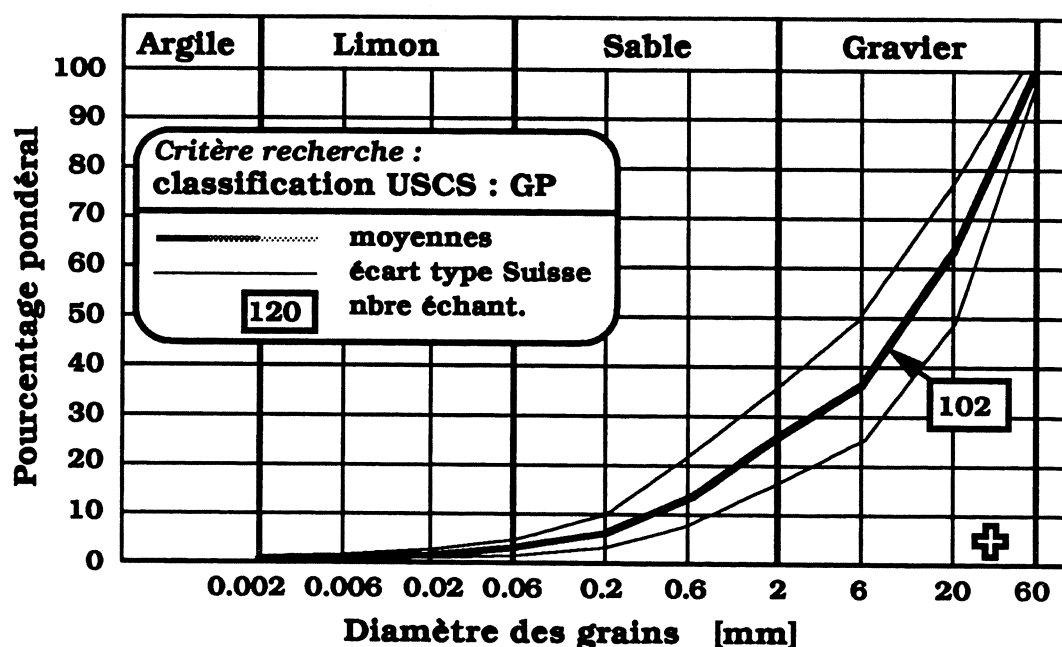


Fig 3.2 Fuseau granulométrique de la classe USCS: GP

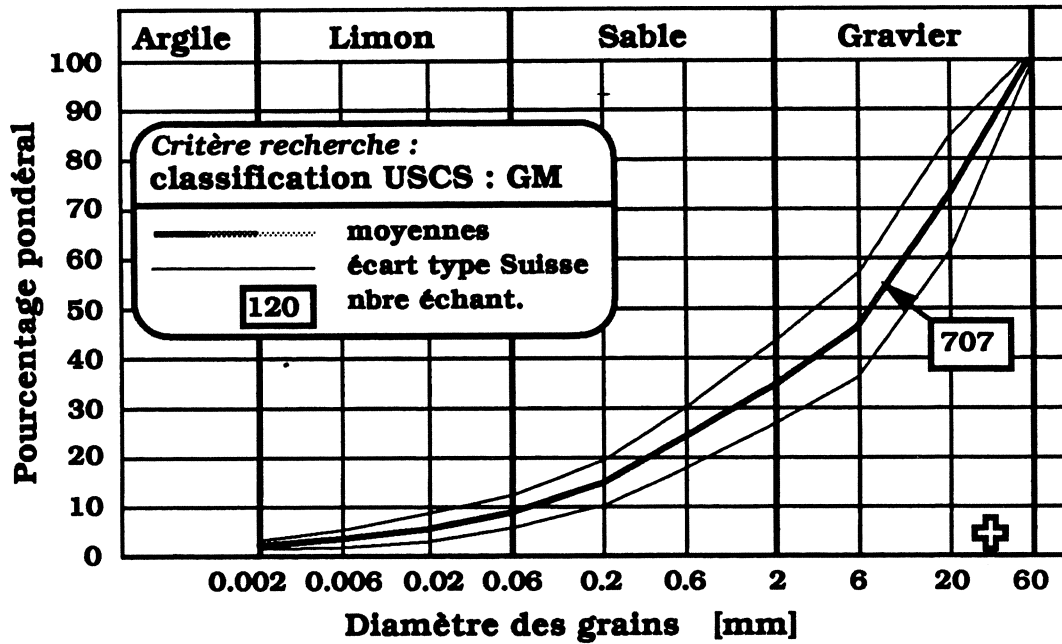


Fig 3.3 Fuseau granulométrique de la classe USCS: GM

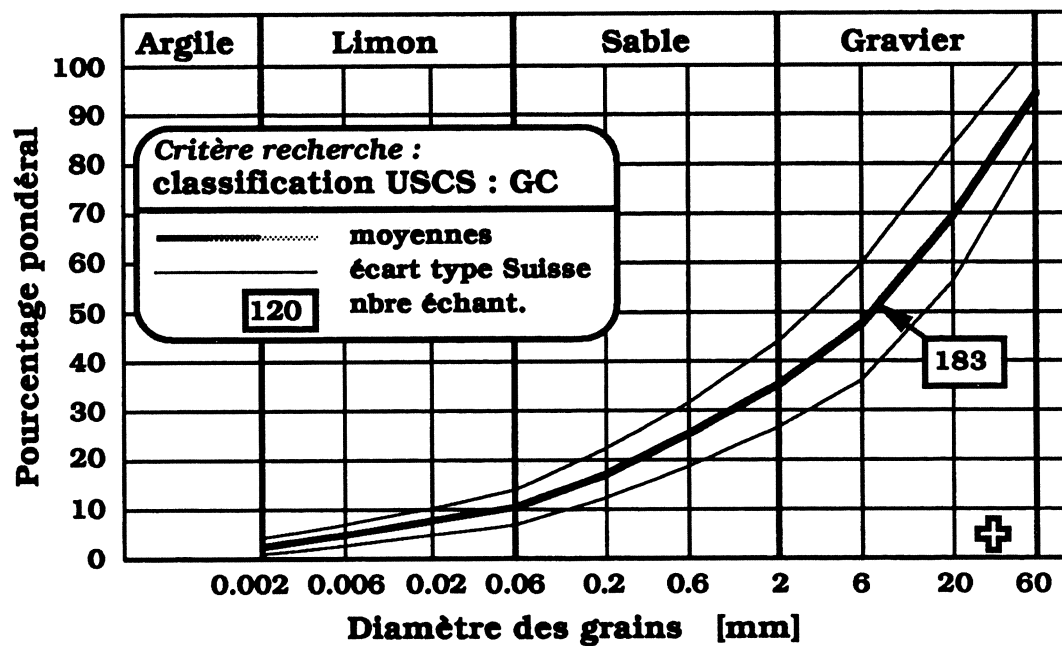


Fig 3.4 Fuseau granulométrique de la classe USCS: GC

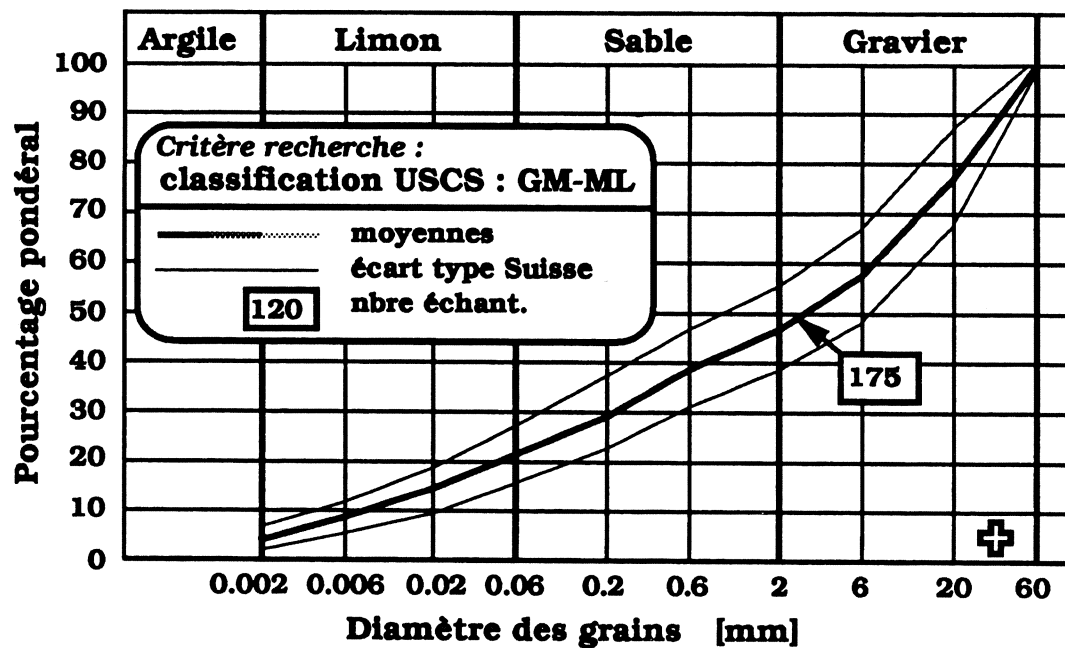


Fig 3.5 Fuseau granulométrique de la classe USCS: GM-ML

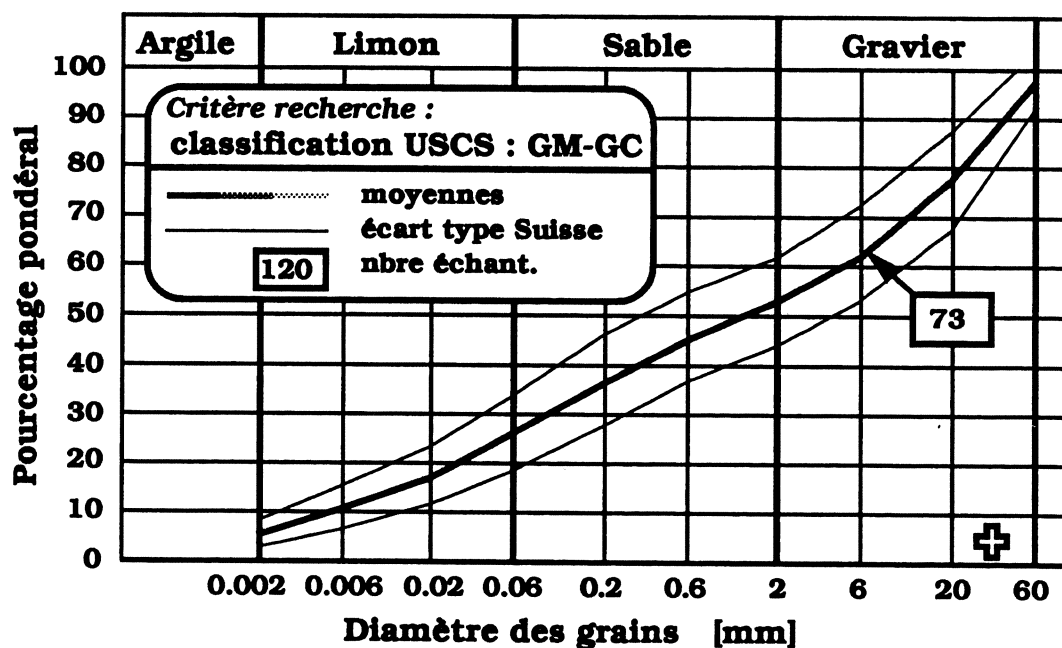


Fig 3.6 Fuseau granulométrique de la classe USCS: GM-GC

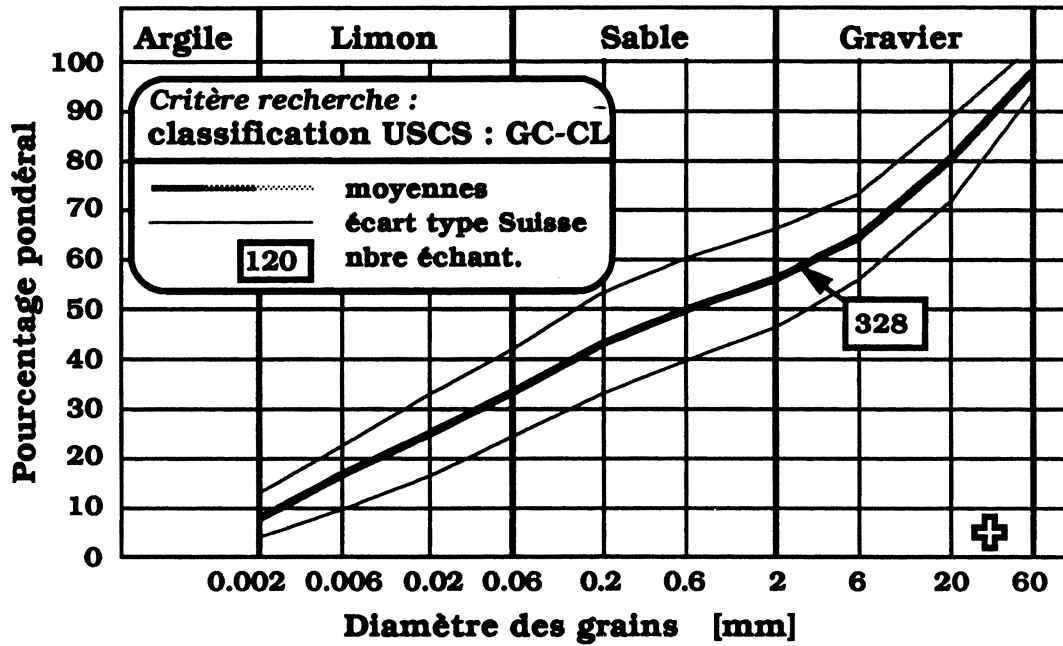


Fig 3.7 Fuseau granulométrique de la classe USCS: GC-CL

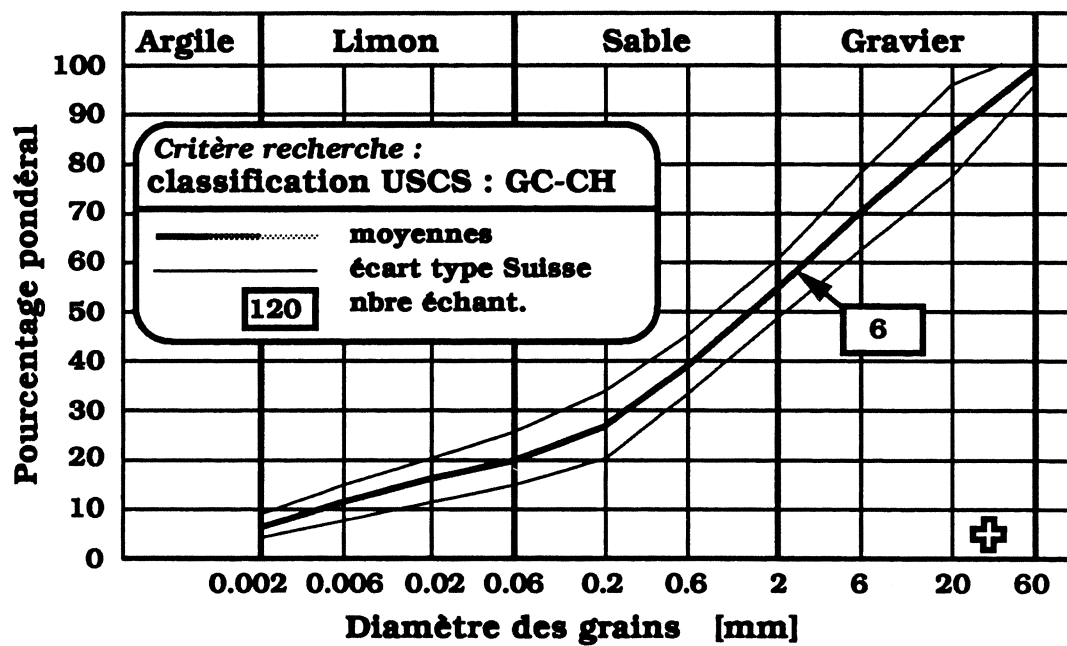


Fig 3.8 Fuseau granulométrique de la classe USCS: GC-CH

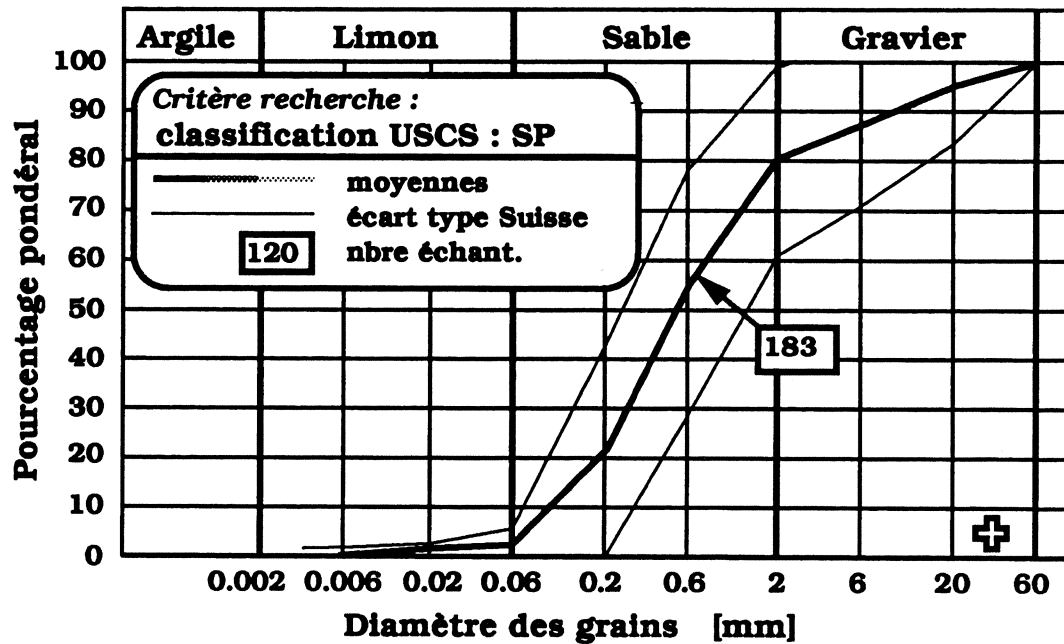


Fig 3.9 Fuseau granulométrique de la classe USCS: SP

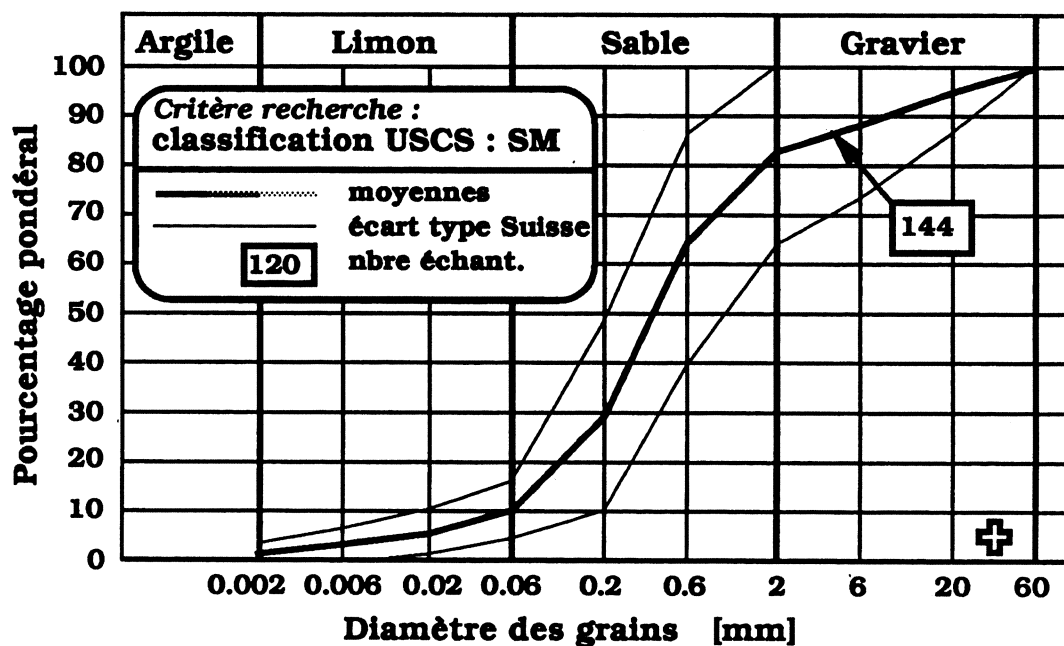


Fig 3.10 Fuseau granulométrique de la classe USCS: SM

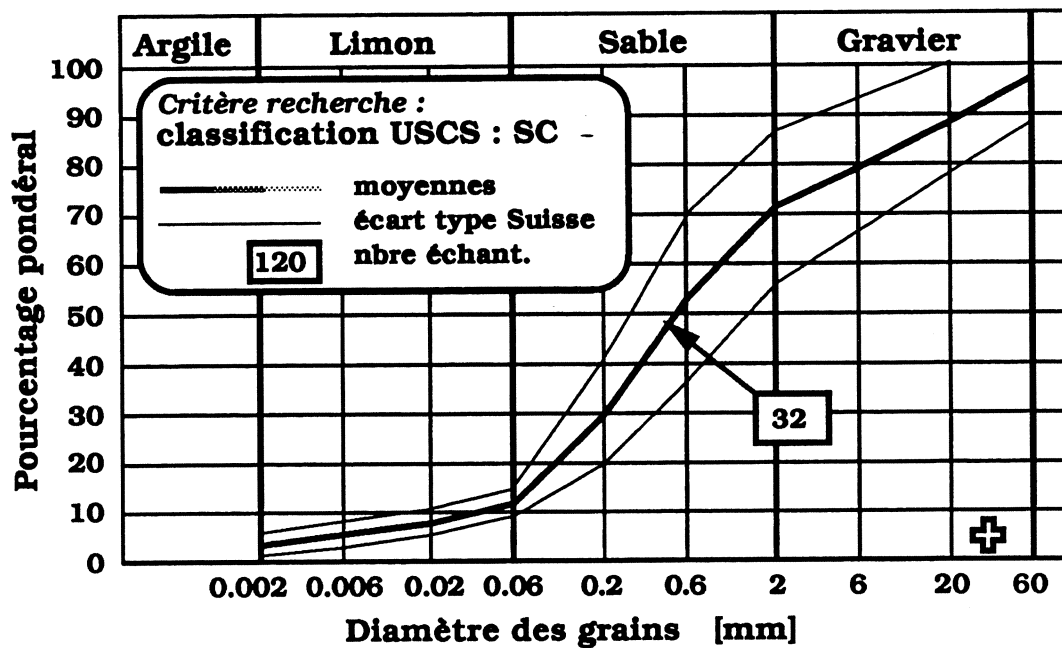


Fig 3.11 Fuseau granulométrique de la classe USCS: SC

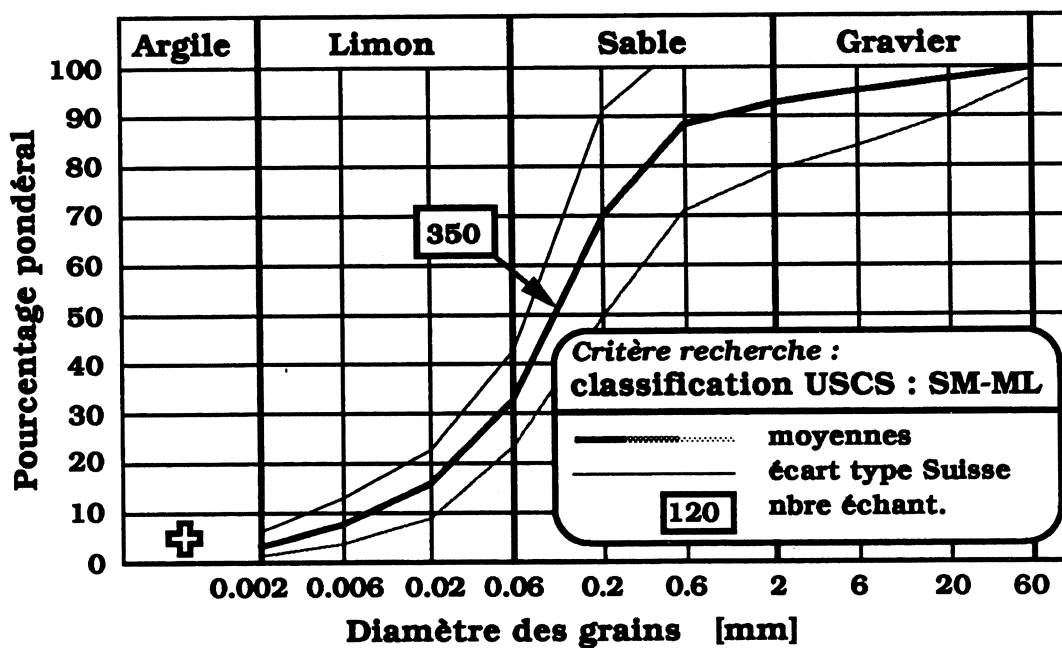


Fig 3.12 Fuseau granulométrique de la classe USCS: SM-ML

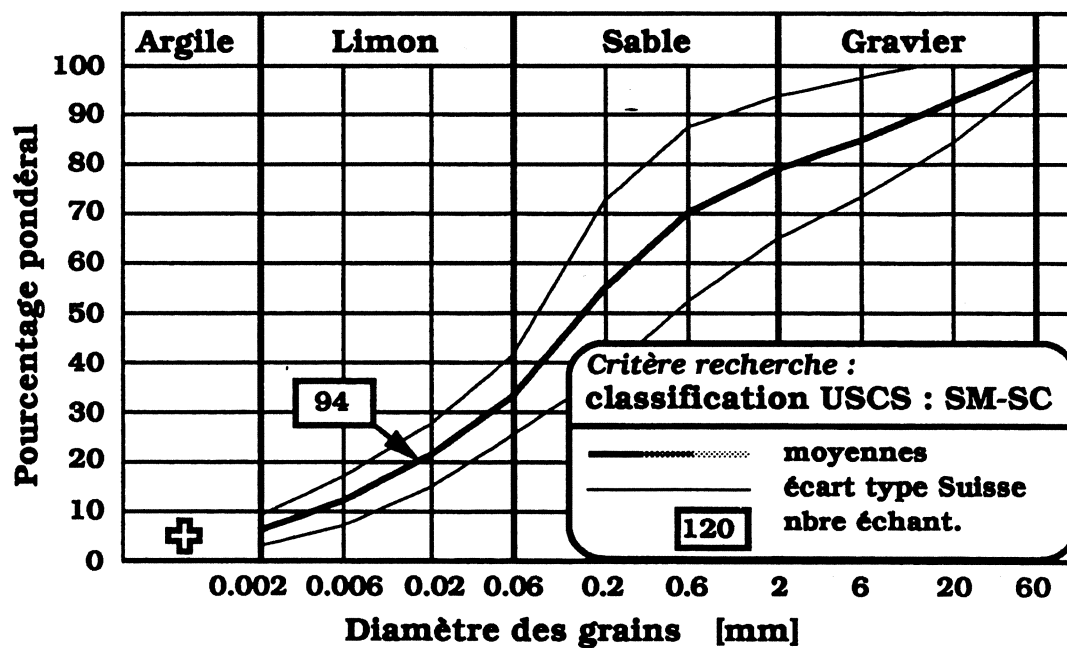


Fig 3.13 Fuseau granulométrique de la classe USCS: SM-SC

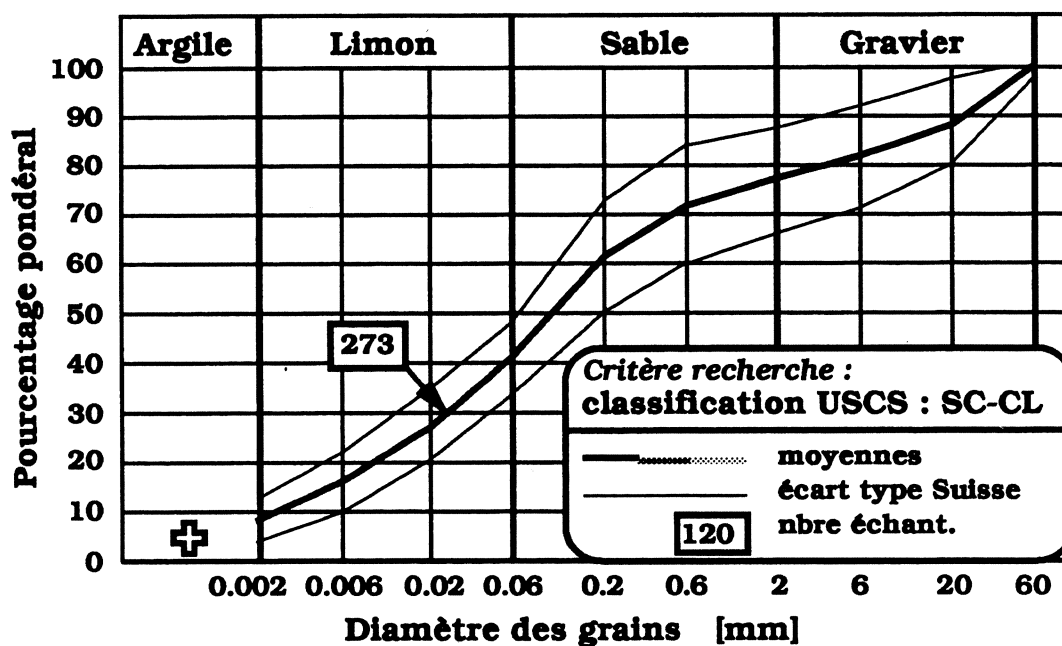


Fig 3.14 Fuseau granulométrique de la classe USCS: SC-CL

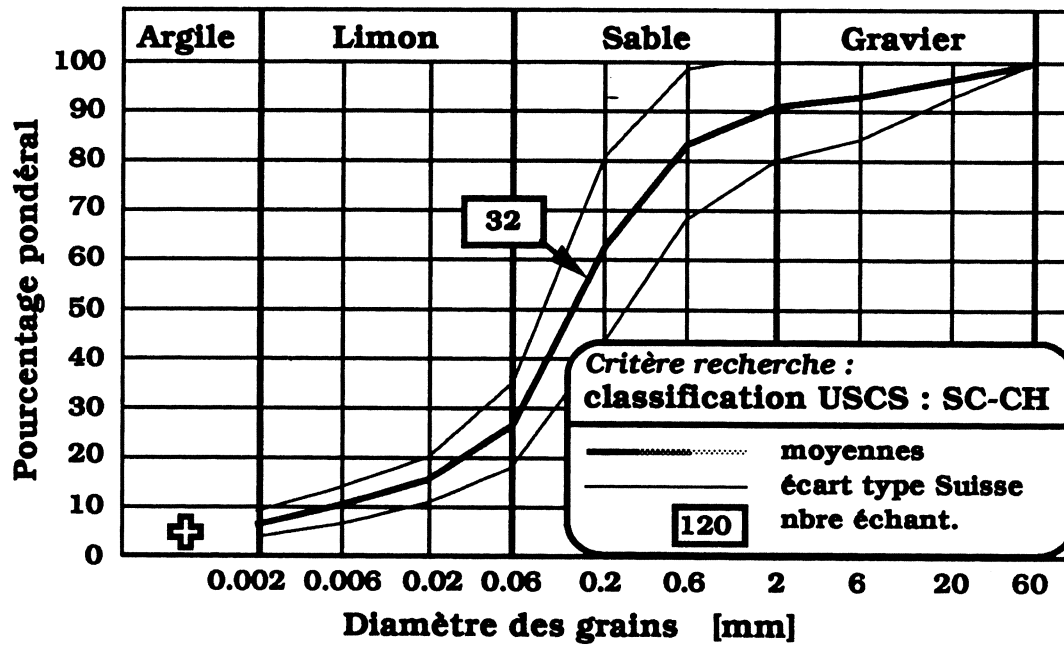


Fig 3.15 Fuseau granulométrique de la classe USCS: SC-CH

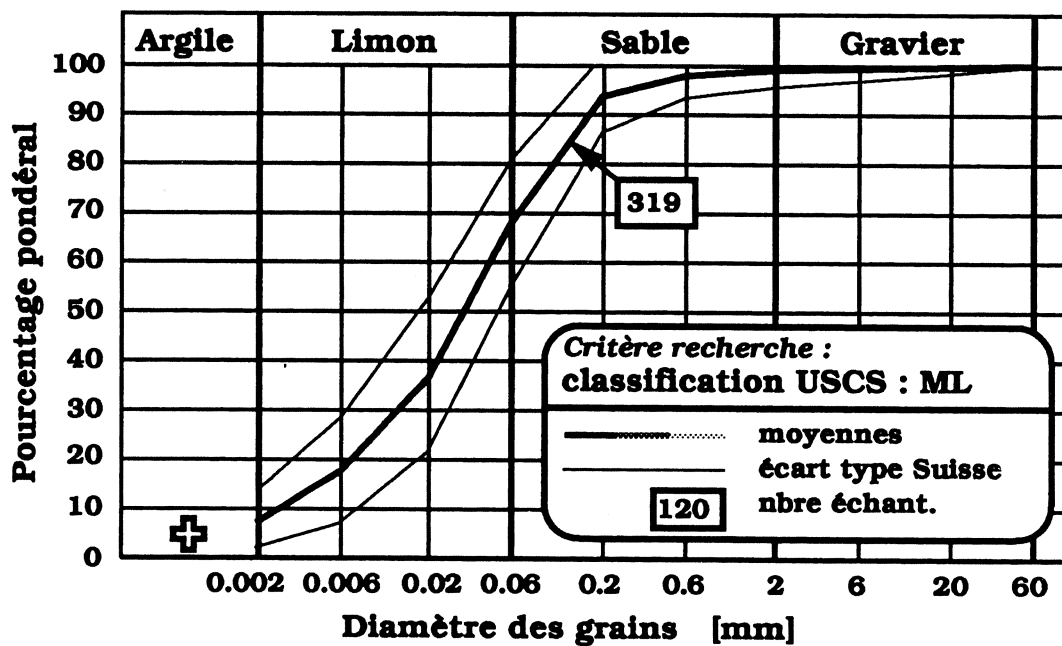


Fig 3.16 Fuseau granulométrique de la classe USCS: ML

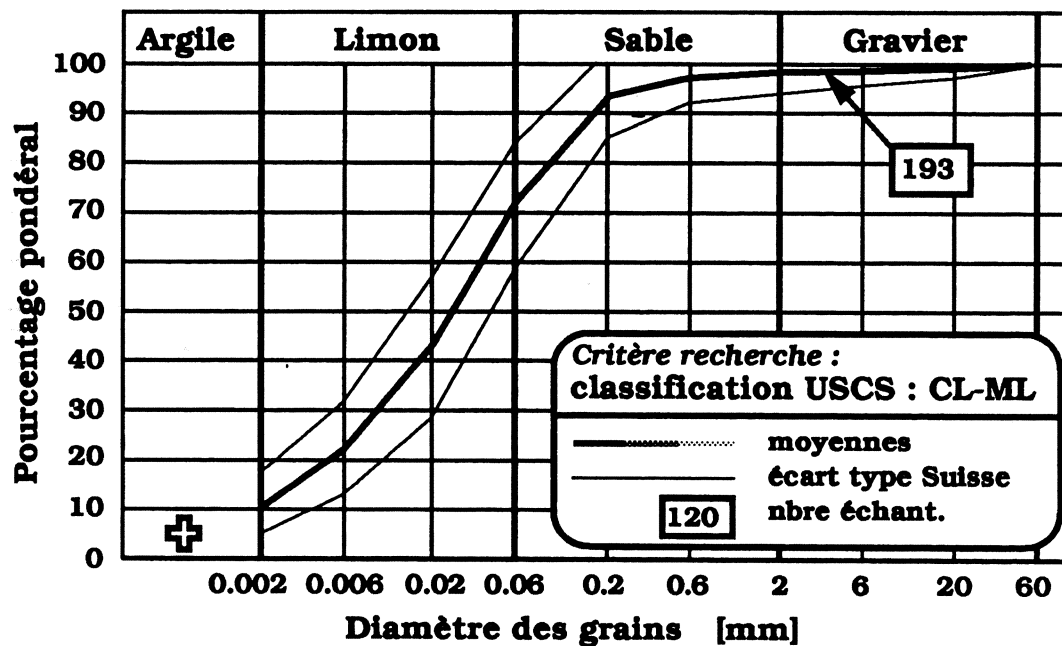


Fig 3.17 Fuseau granulométrique de la classe USCS: CL-ML

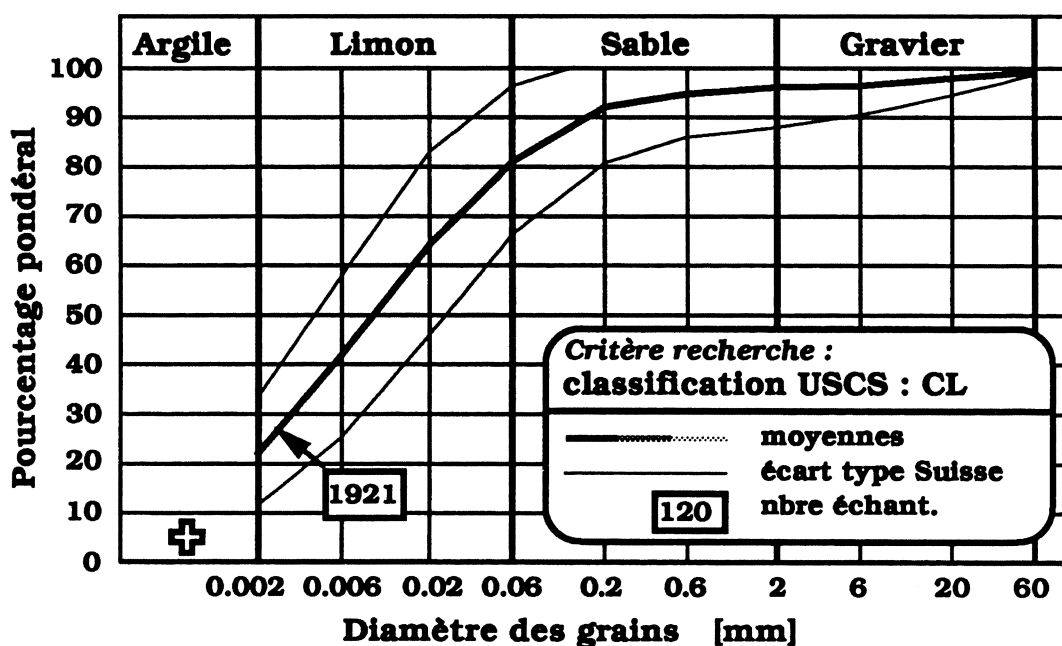


Fig 3.18 Fuseau granulométrique de la classe USCS: CL

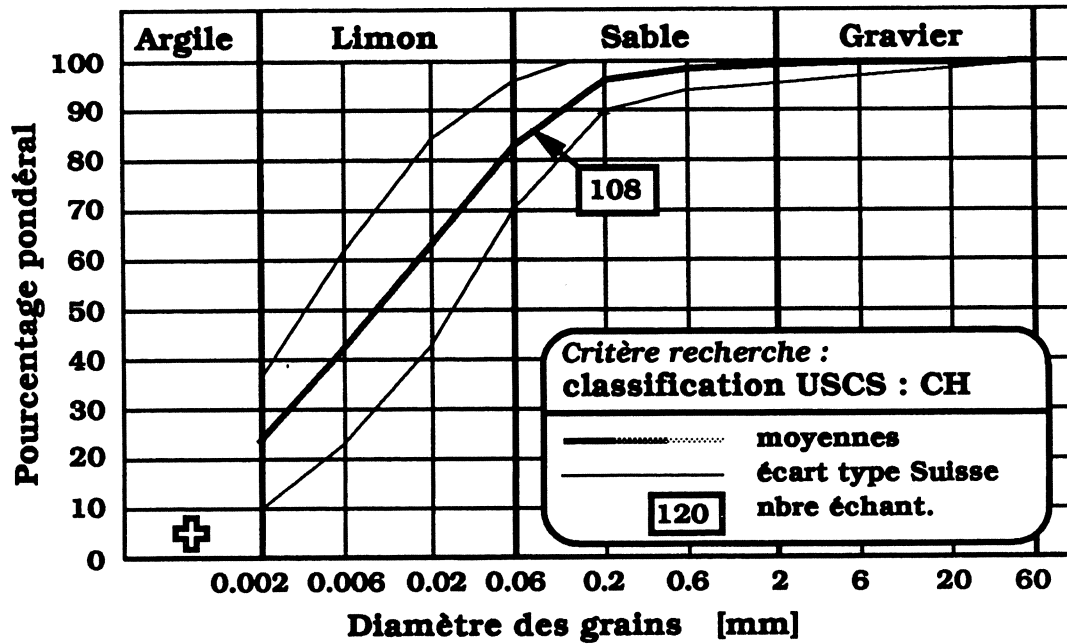


Fig 3.19 Fuseau granulométrique de la classe USCS: CH

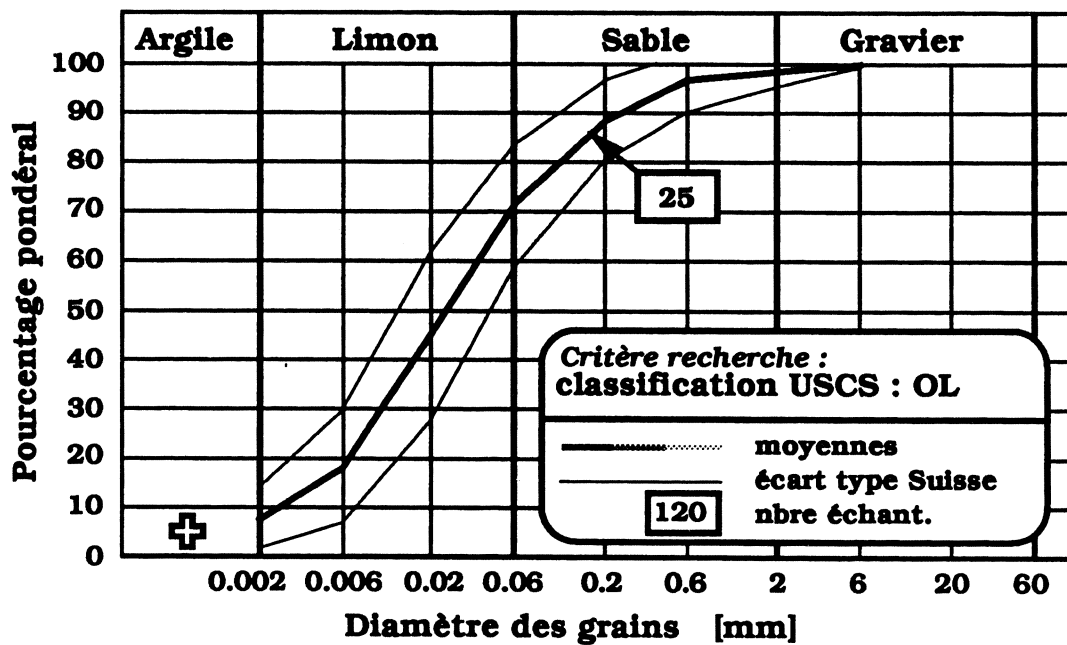


Fig 3.20 Fuseau granulométrique de la classe USCS: OL

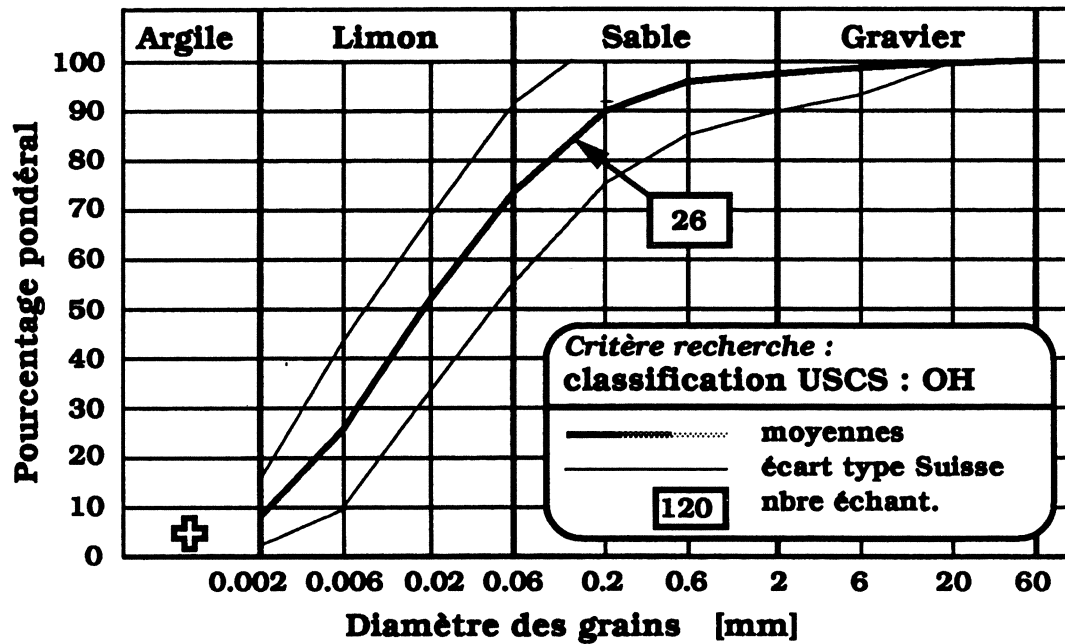


Fig 3.21 Fuseau granulométrique de la classe USCS: OH

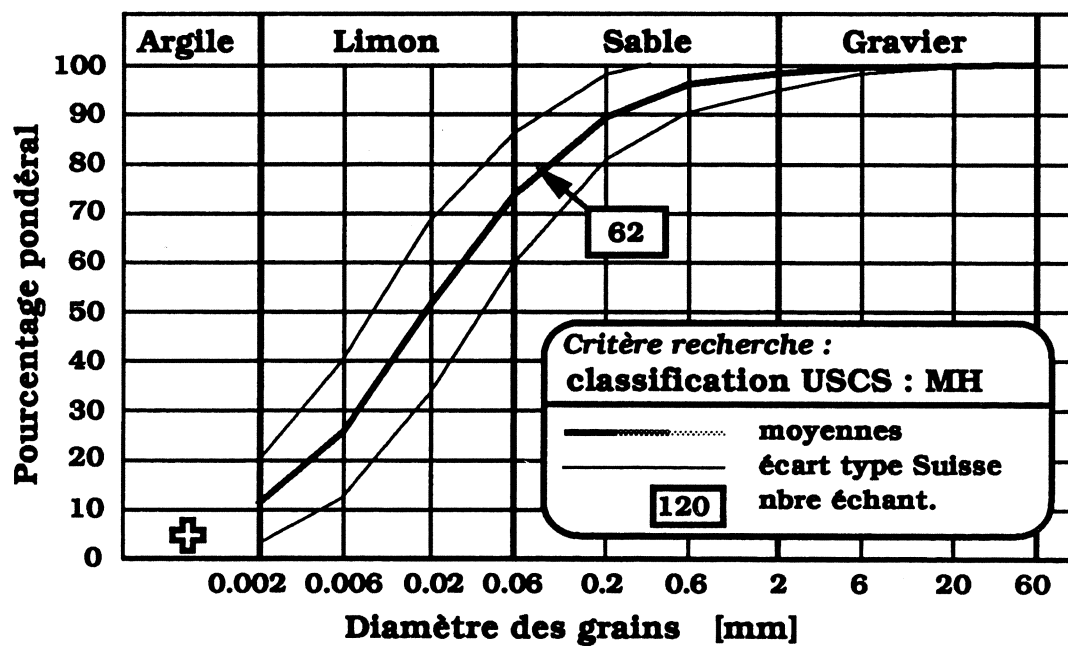


Fig 3.22 Fuseau granulométrique de la classe USCS: MH

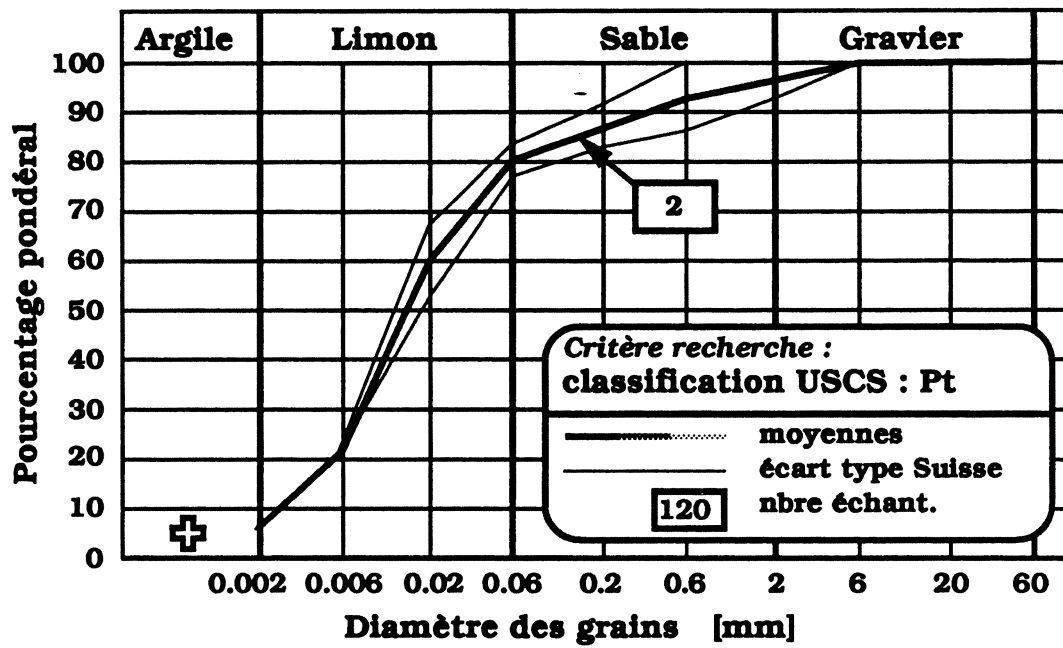


Fig 3.23 Fuseau granulométrique de la classe USCS: Pt

3.2 Autres caractéristiques

Les analyses statistiques des principales caractéristiques des sols qui ne sont pas des courbes granulométriques sont présentées sous forme d'histogrammes. Les histogrammes de sols de classes USCS voisines sont souvent groupés sur un même graphique.

A chaque histogramme est associé une étiquette contenant la classe USCS, la valeur moyenne μ , l'écart-type S , le coefficient de dissymétrie β_1 et le nombre d'échantillons N . Si le nombre d'échantillons N est plus petit que 10, l'histogramme ne sera pas dessiné et seule l'étiquette est visible sur le graphique. Sur chaque graphique, la croix signifie qu'il concerne l'ensemble de la Suisse.

Sur chaque histogramme les classes (abscisse) sont constantes; elles sont cependant choisies d'une caractéristique à l'autre de façon à montrer au mieux la distribution.

Les caractéristiques des sols analysées statistiquement sont les suivantes :

- le pourcentage d'argile (<0.002 mm)
- le pourcentage de limon (0.002 à 0.06 mm)
- le pourcentage de sable (0.06 à 2 mm)
- le pourcentage de gravier (2 à 60 mm)
- la limite de liquidité w_L [% massique]
- l'indice de plasticité I_p [% massique]
- la masse volumique du sol (humide) ρ [$\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$]
- la teneur en eau w [% massique]
- l'indice de vide initial e_0 [-]
- l'angle de frottement effectif Φ' [°]
- la cohésion effective c' [kPa]
- la cohésion apparente [kPa] obtenue par l'essai de compression simple c_u , par le pénétromètre de poche c_{up} ou par un scissomètre c_{us}
- l'indice de compressibilité C_c [-]
- l'indice de gonflement C_s [-]
- le coefficient de perméabilité k_D [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

Pour une recherche plus facile des graphiques, il sont groupés en paragraphes incluant un nombre restreint de classes USCS; le tableau ci-dessous définit ces groupes et les figures correspondantes :

Paragraphes	Classes USCS	Figures
3.2.1	GW, GP, GM, GC	3.24 à 3.33
3.2.2	GM-ML, CM-GC, GC-CL, GC-CH	3.34 à 3.45
3.2.3	SW, SP, SM, SC	3.46 à 3.56
3.2.4	SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH	3.57 à 3.71
3.2.5	ML, CL-ML, CL, CH, MH	3.72 à 3.89
3.2.6	OL, OH, Pt	3.90 à 3.102

3.2.1 GW, GP, GM, GC

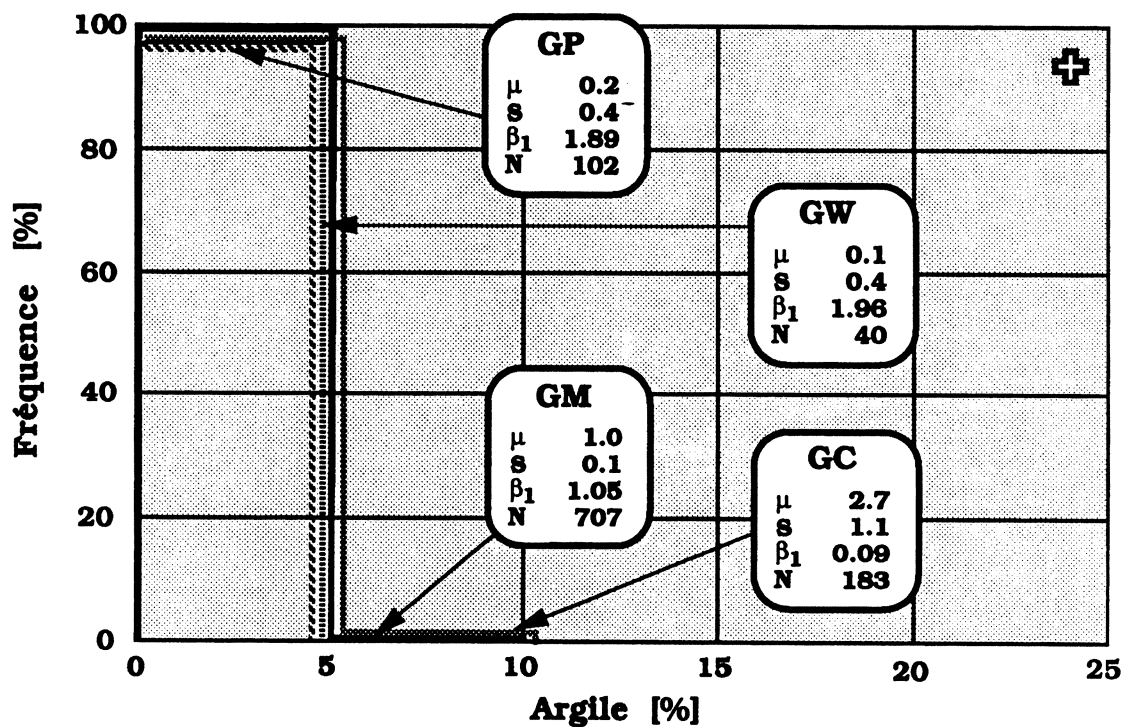


Fig 3.24 Histogramme du pourcentage pondéral de l'argile des classes USCS : GW, GP, GM, GC

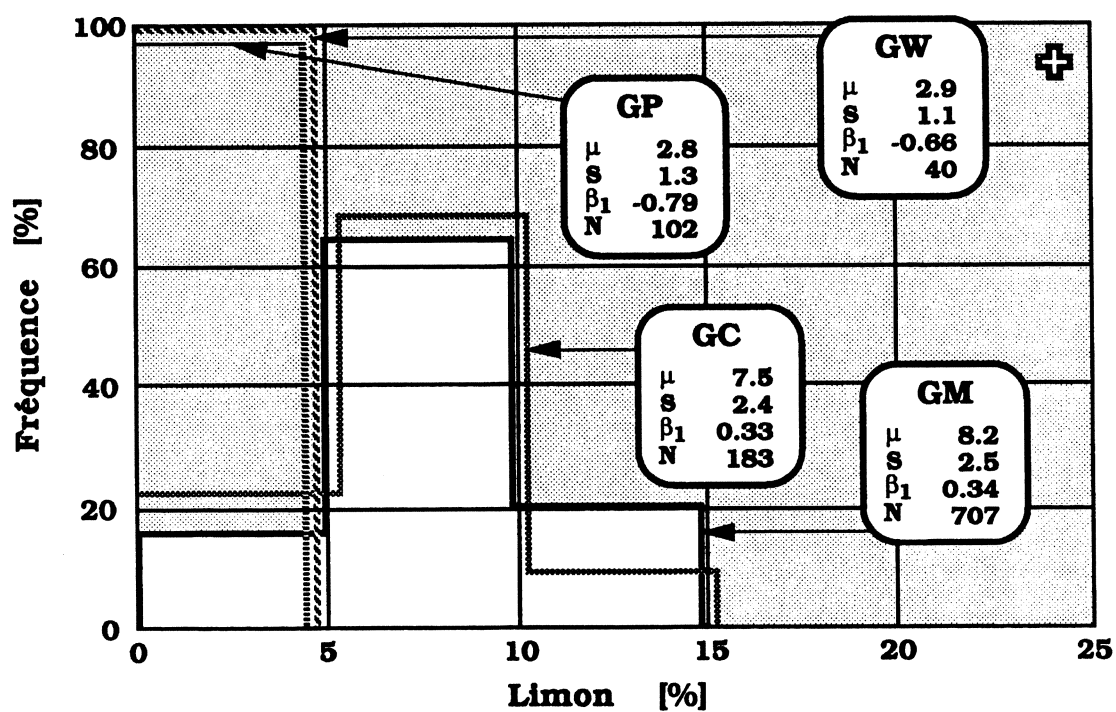


Fig 3.25 Histogramme du pourcentage pondéral du limon des classes USCS : GW, GP, GM, GC

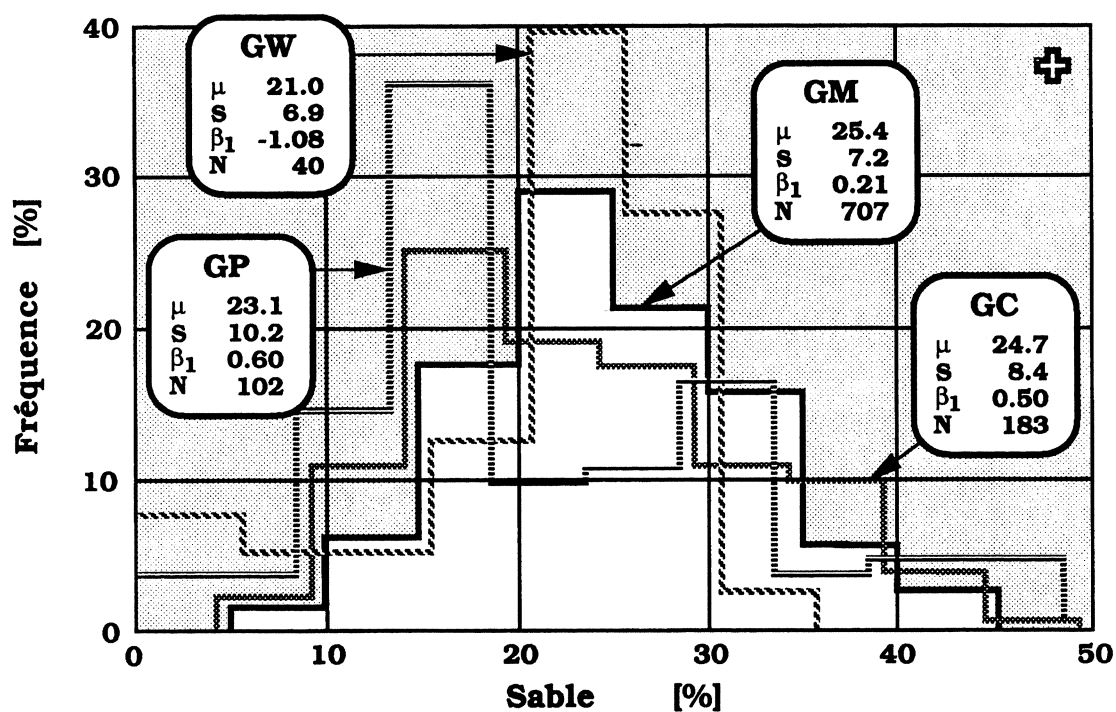


Fig 3.26 Histogramme du pourcentage pondéral du sable des classes USCS :
GW, GP, GM, GC

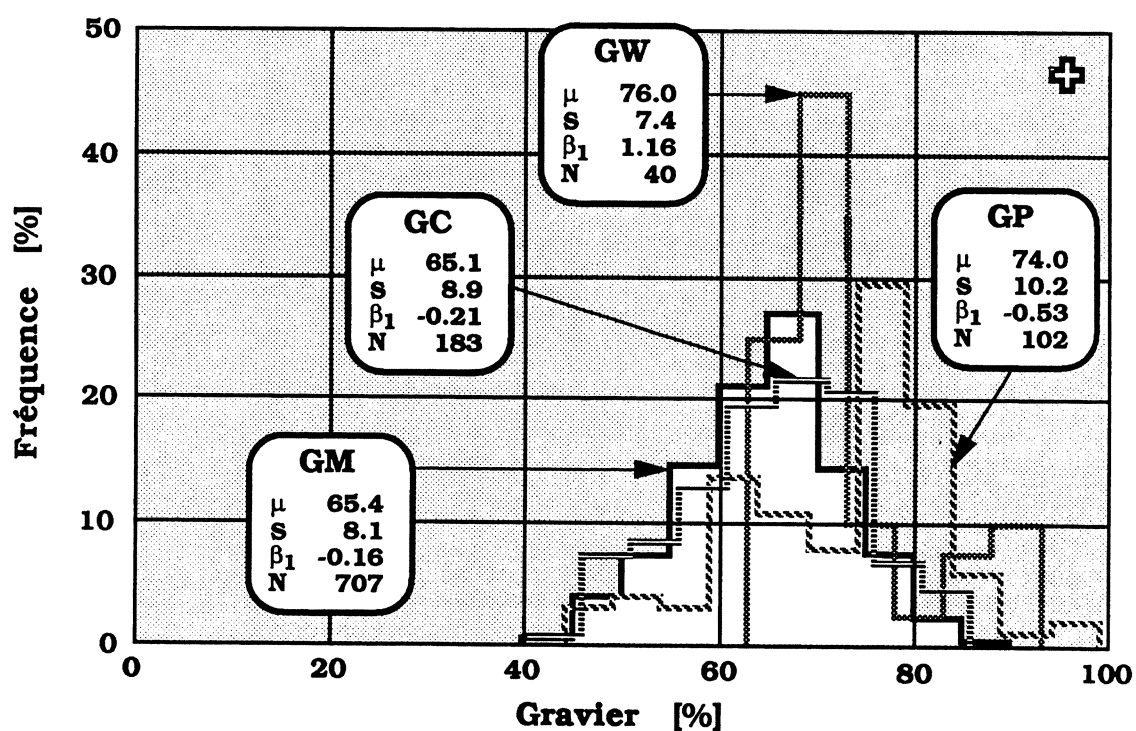
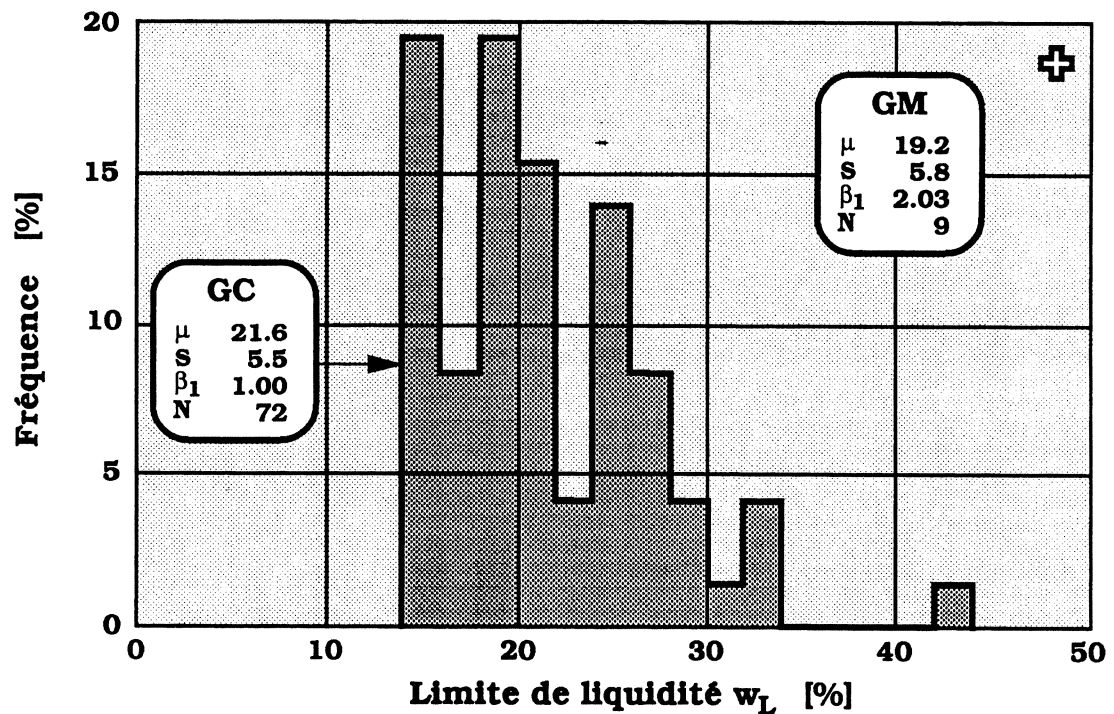
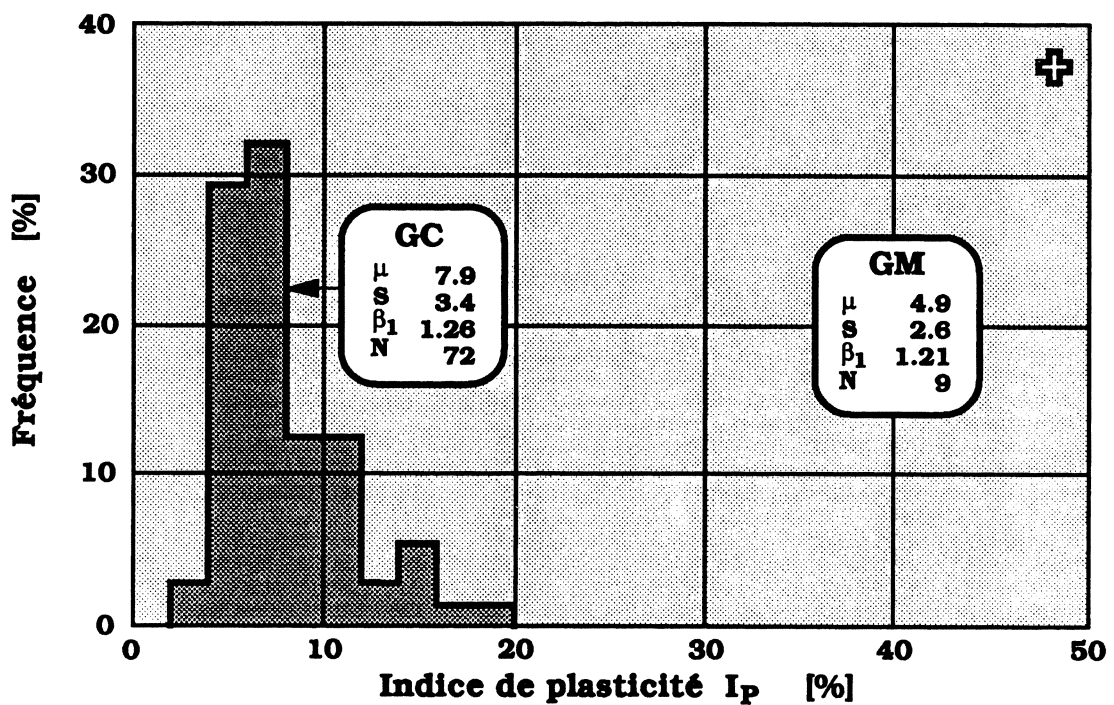


Fig 3.27 Histogramme du pourcentage pondéral du gravier des classes USCS :
GW, GP, GM, GC

Fig 3.28 Histogramme de la limite de liquidité w_L des classes USCS : GM, GCFig 3.29 Histogramme de l'indice de plasticité I_p des classes USCS : GM, GC

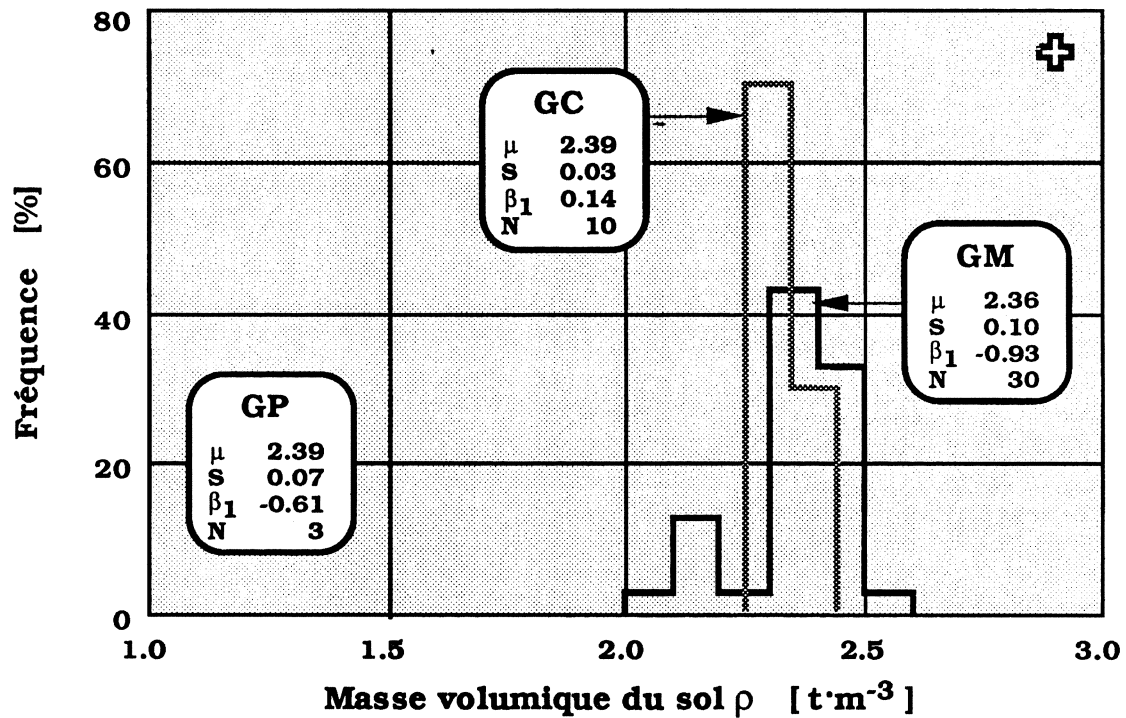


Fig 3.30 Histogramme de la masse volumique du sol ρ des classes USCS : GP, GM, GC

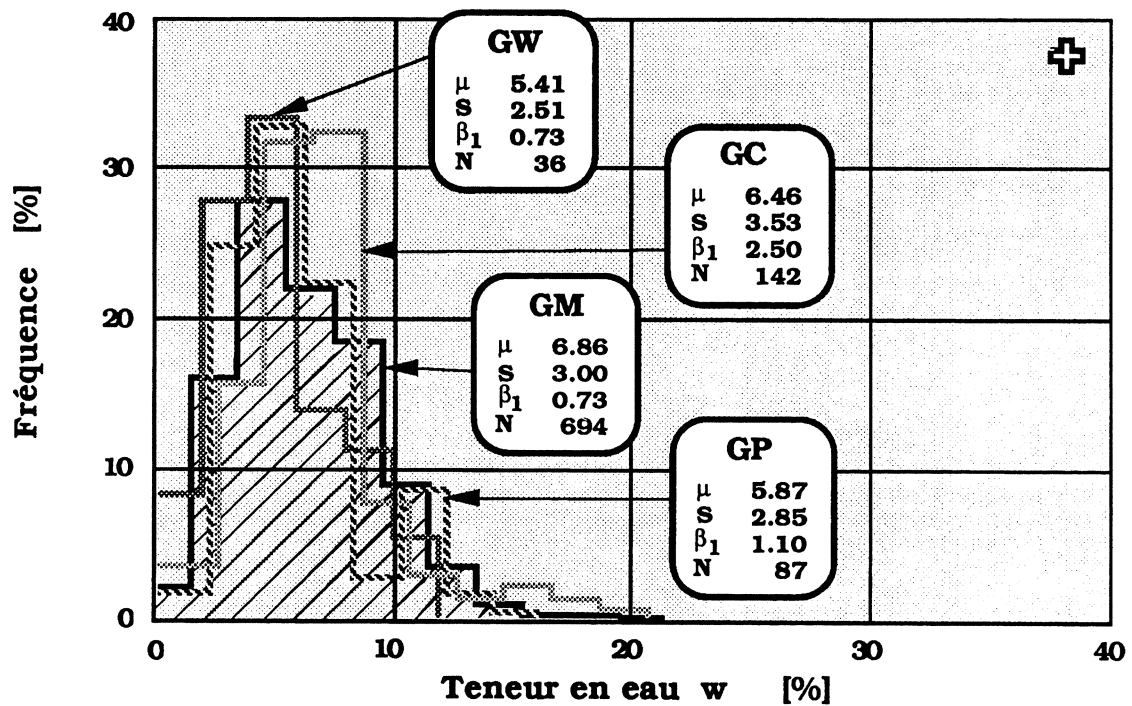


Fig 3.31 Histogramme de la teneur en eau w des classes USCS : GW, GP, GM, GC

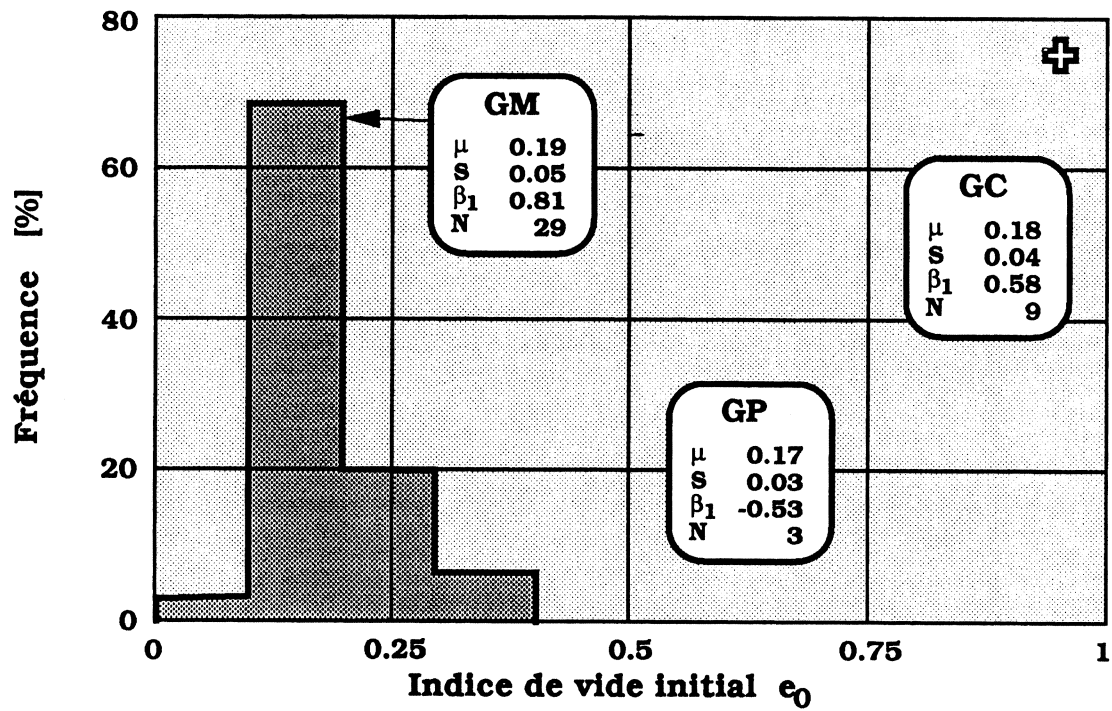


Fig 3.32 Histogramme de l'indice de vide initial e_0 des classes USCS : GP, GM, GC

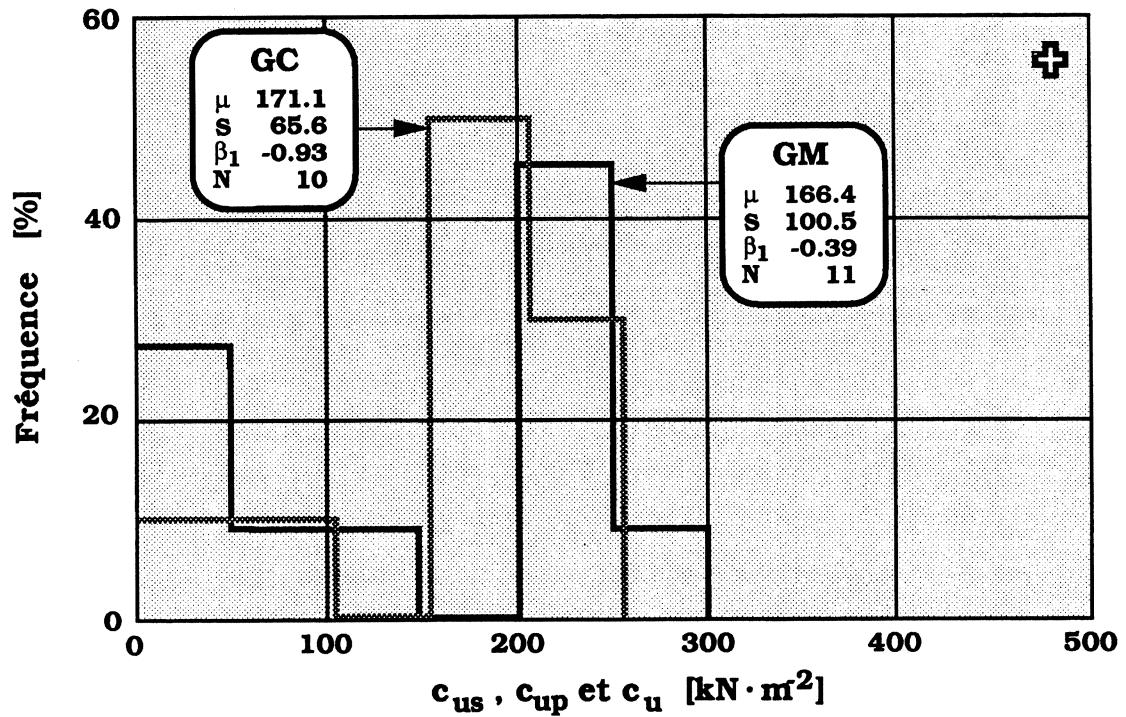


Fig 3.33 Histogramme de toutes les cohésions apparentes c_{up} , c_{us} et c_u des classes USCS GM, GC

3.2.2 GM-ML, GM-GC, GC-CL, GC-CH

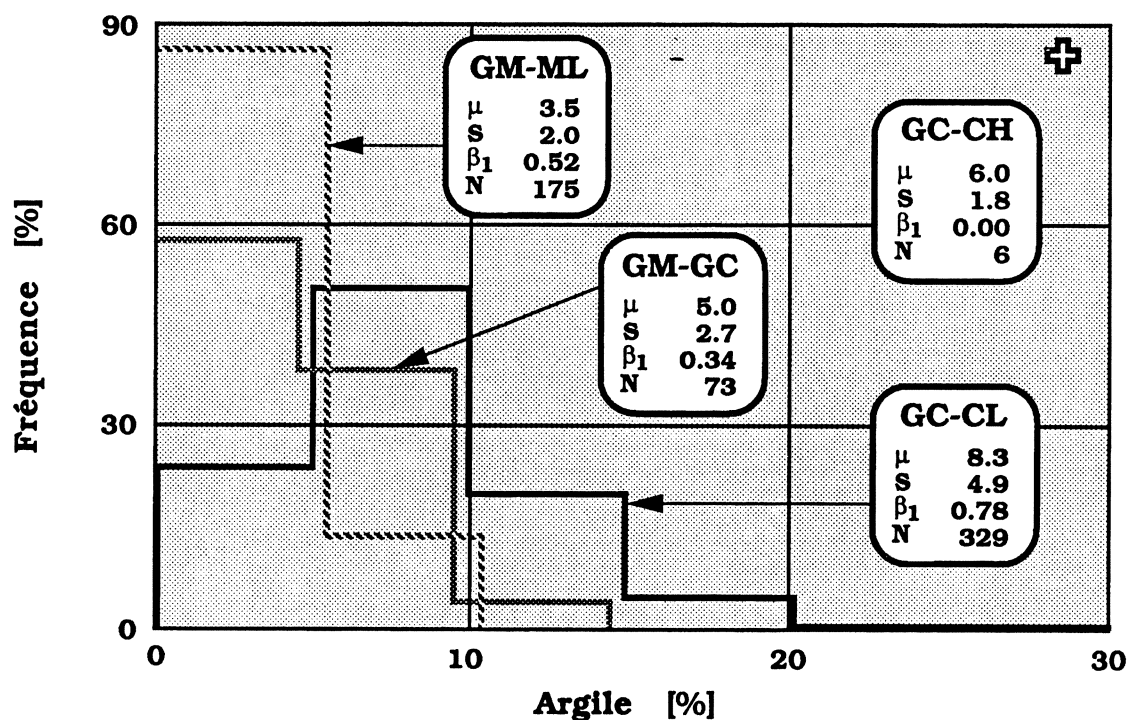


Fig 3.34 Histogramme du pourcentage pondéral de l'argile des classes USCS : GM-ML, GM-GC, GC-CL, GC-CH

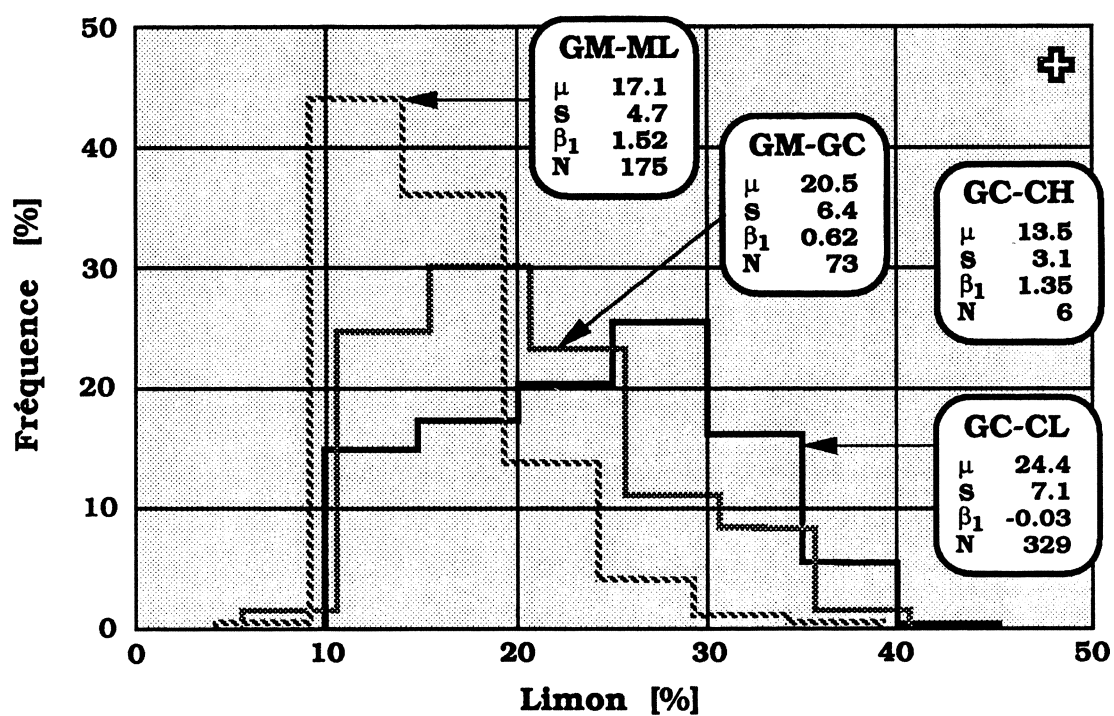


Fig 3.35 Histogramme du pourcentage pondéral du limon des classes USCS : GM-ML, GM-GC, GC-CL, GC-CH

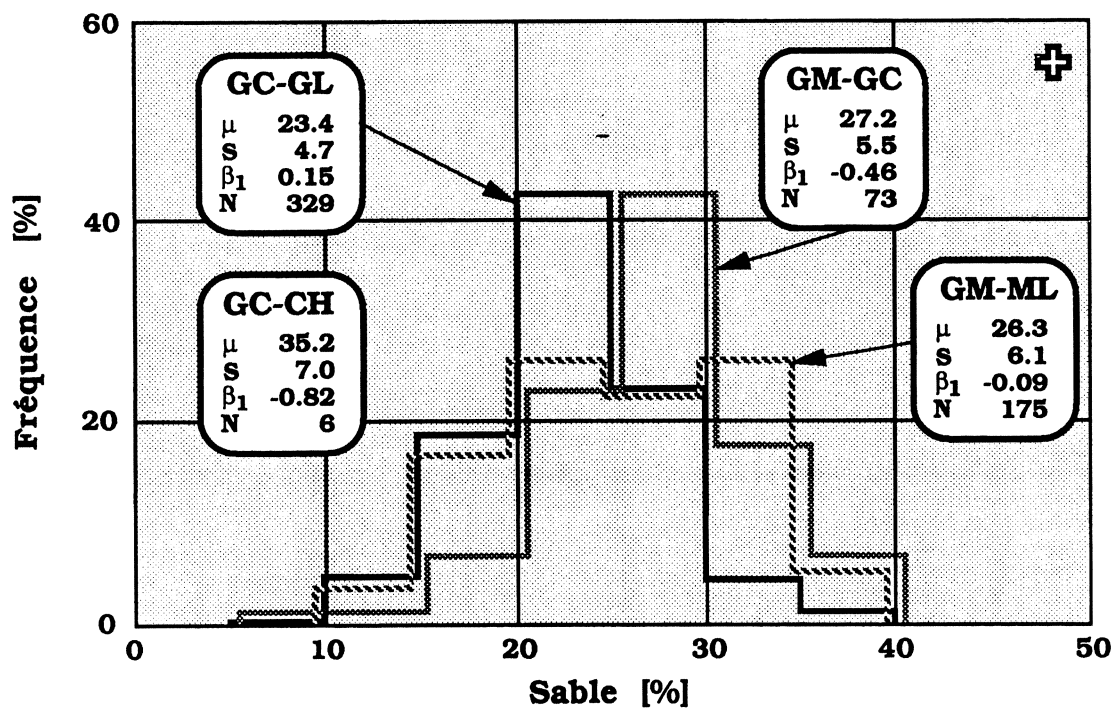


Fig 3.36 Histogramme du pourcentage pondéral du sable des classes USCS :
GM-ML, GM-GC, GC-CL, GC-CH

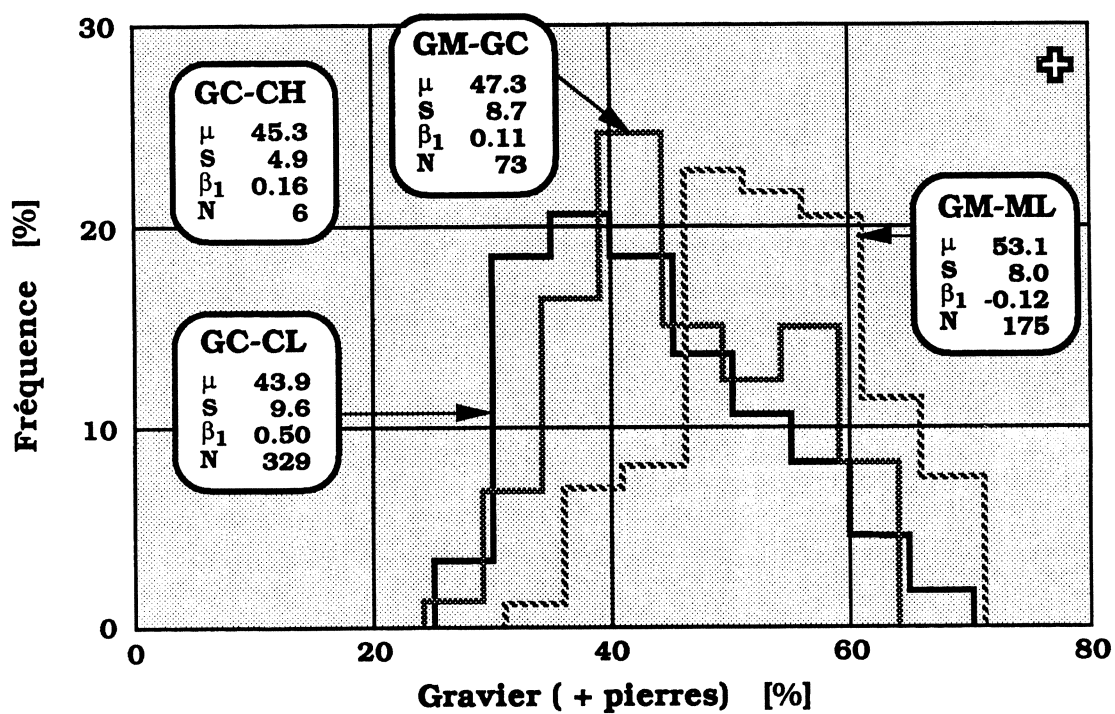


Fig 3.37 Histogramme du pourcentage pondéral du gravier des classes USCS :
GM-ML, GM-GC, GC-CL, GC-CH

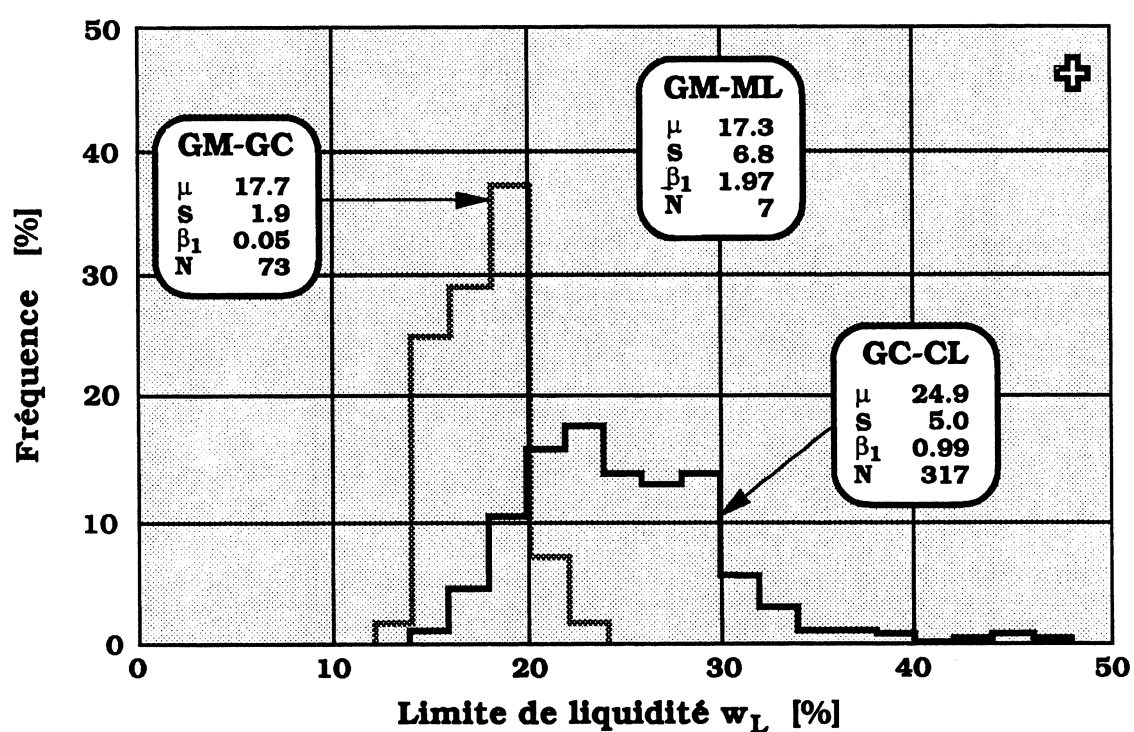


Fig 3.38 Histogramme de la limite de liquidité w_L des classes USCS : GM-ML, GM-GC, GC-CL

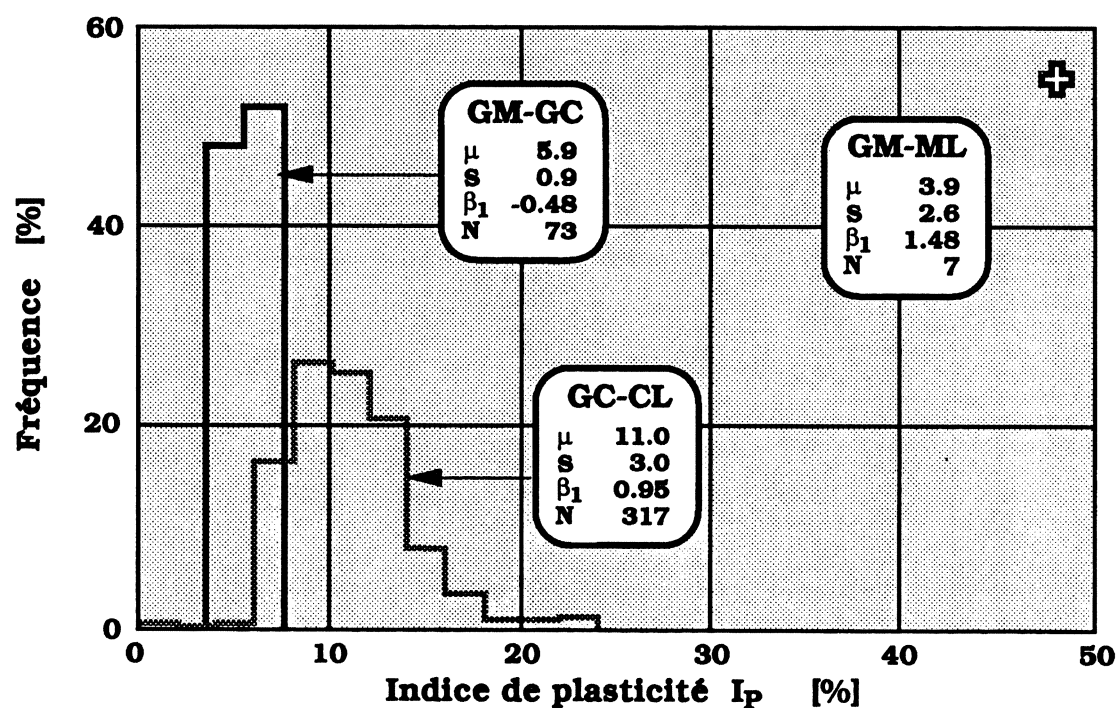


Fig 3.39 Histogramme de l'indice de plasticité I_p des classes USCS : GM-ML, GM-GC, GC-CL

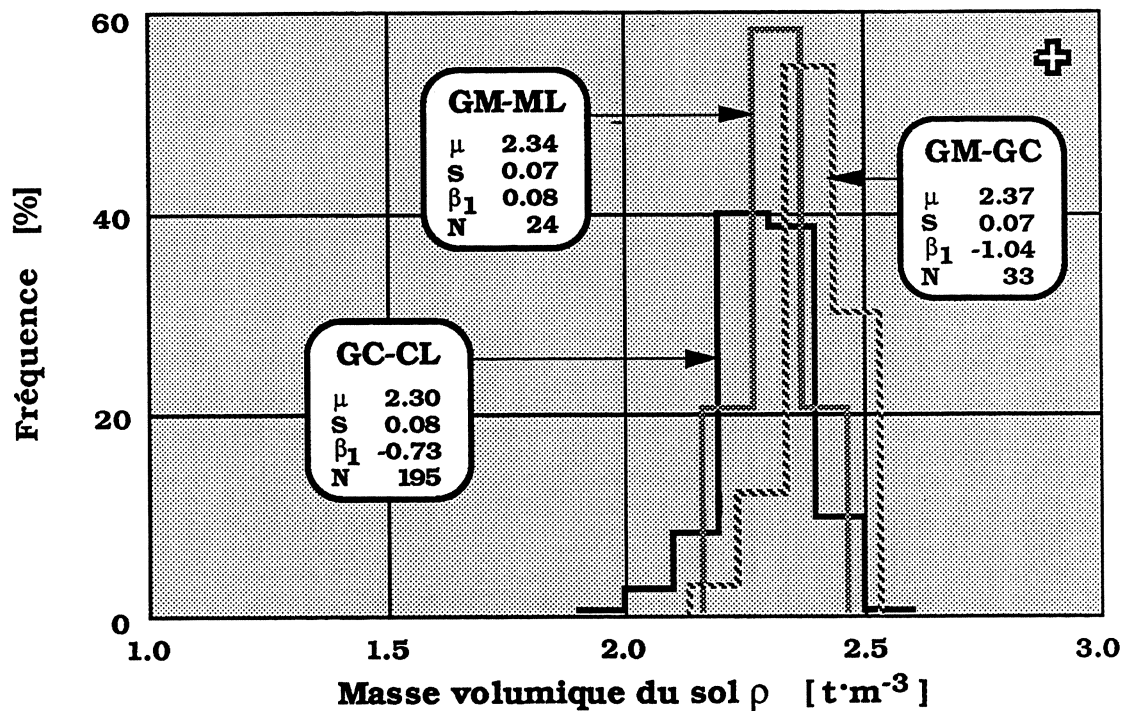


Fig 3.40 Histogramme de la masse volumique du sol ρ des classes USCS : GM-ML, GM-GC, GC-CL

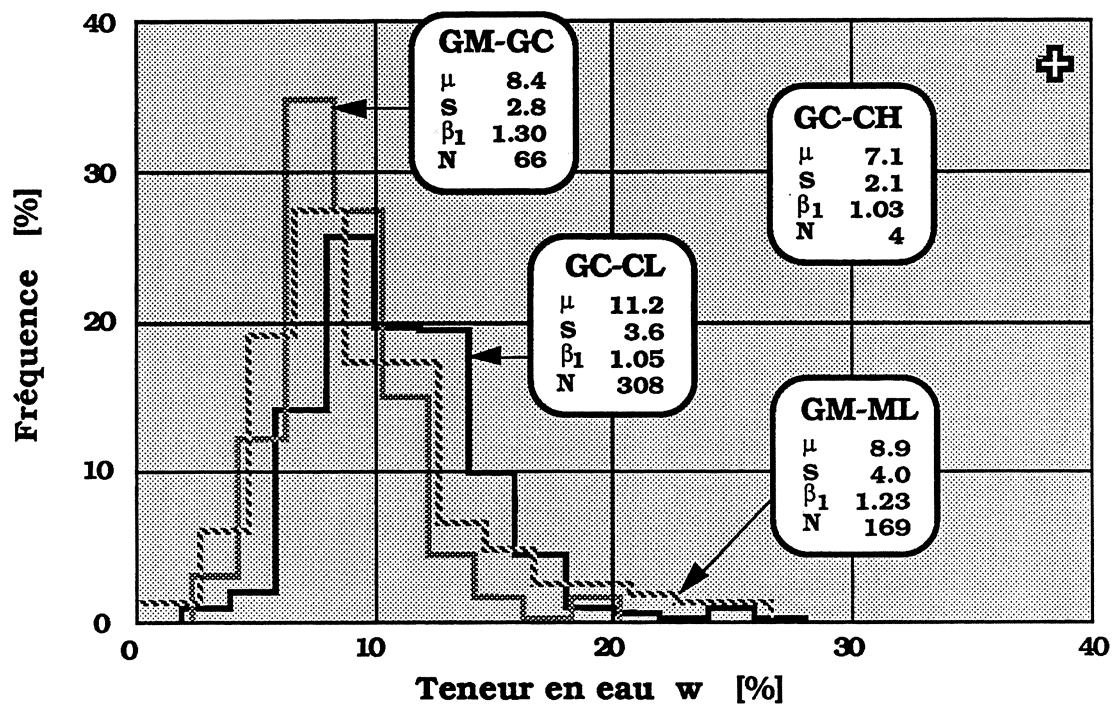


Fig 3.41 Histogramme de la teneur en eau w des classes USCS : GM-ML, GM-GC, GC-CL, GC-CH

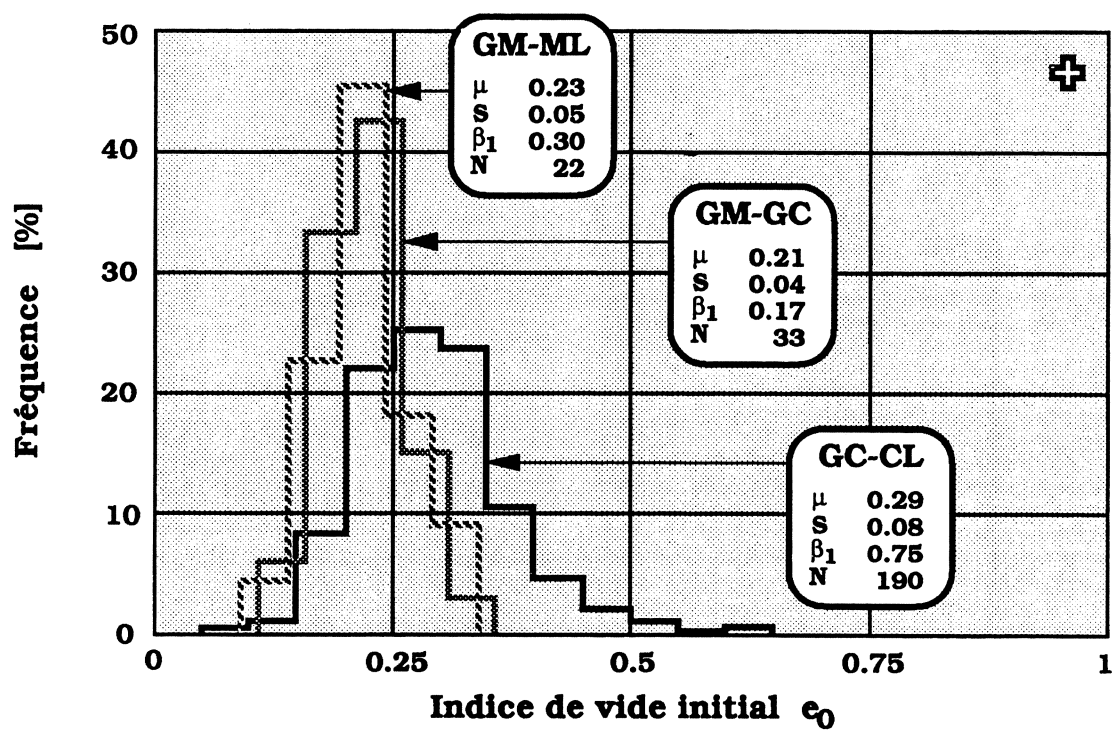


Fig 3.42 Histogramme de l'indice de vide initial e_0 des classes USCS : GM-ML, GM-GC, GC-CL

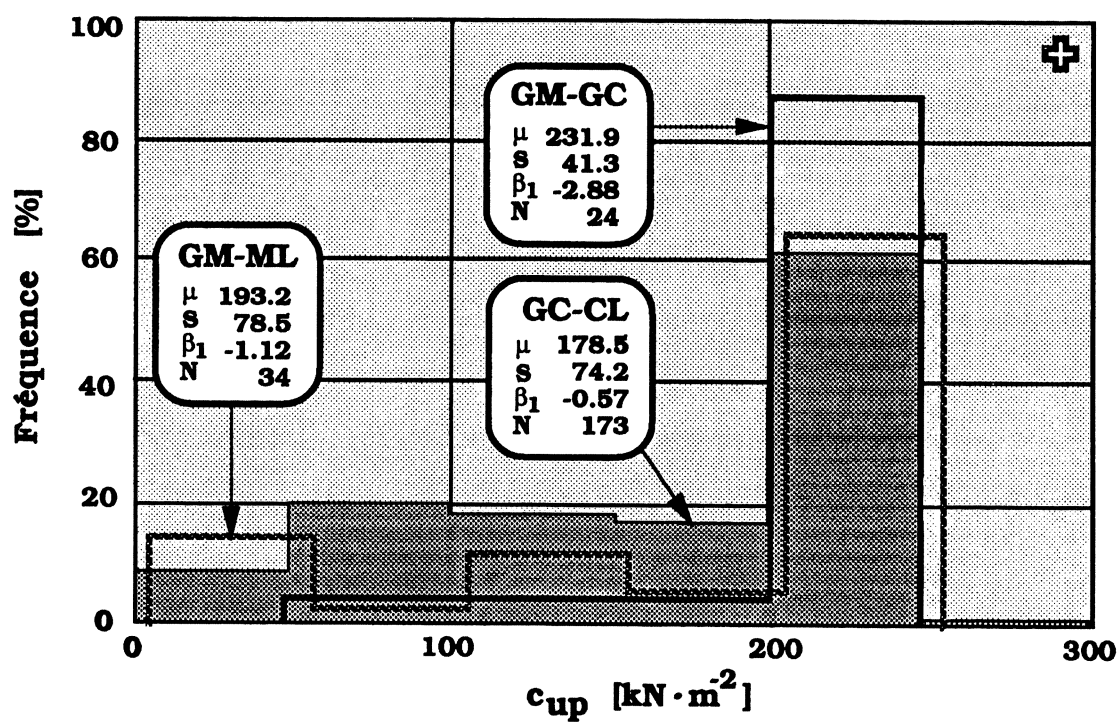


Fig 3.43 Histogramme de la cohésion apparente c_{up} (pénétrömètre de poche) des classes USCS : GM-ML, GM-GC, GC-CL

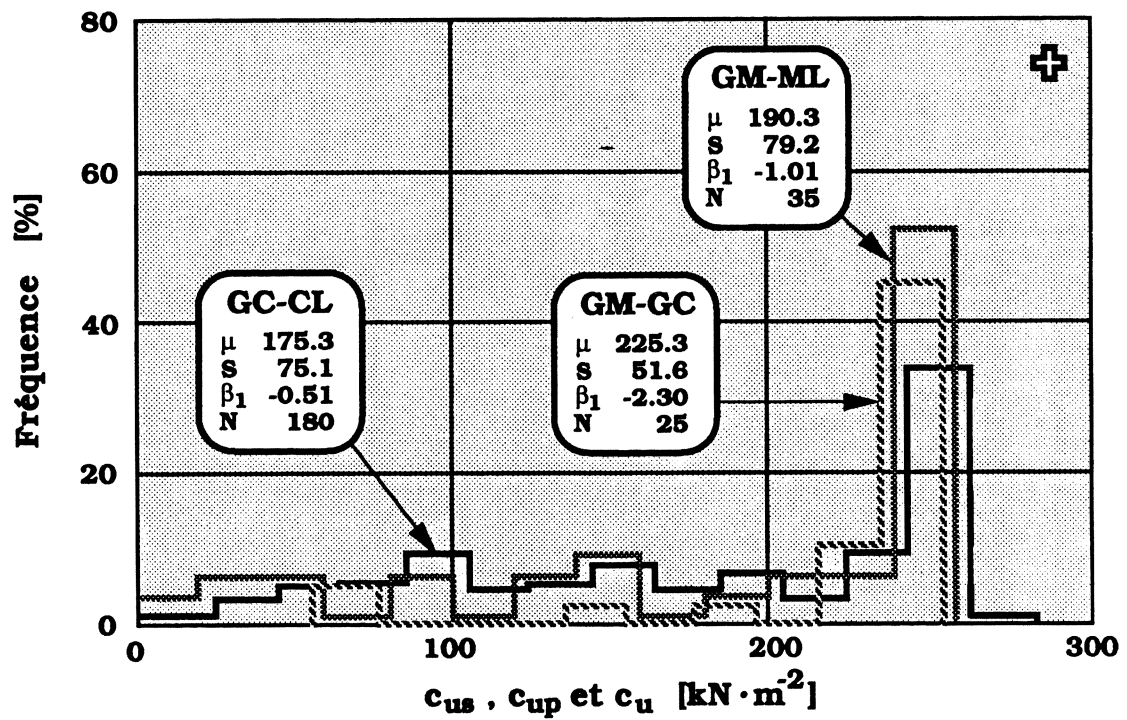


Fig 3.44 Histogramme de toutes les cohésions apparentes c_{up} , c_{us} et c_u des classes USCS : GM-ML, GM-GC, GC-CL

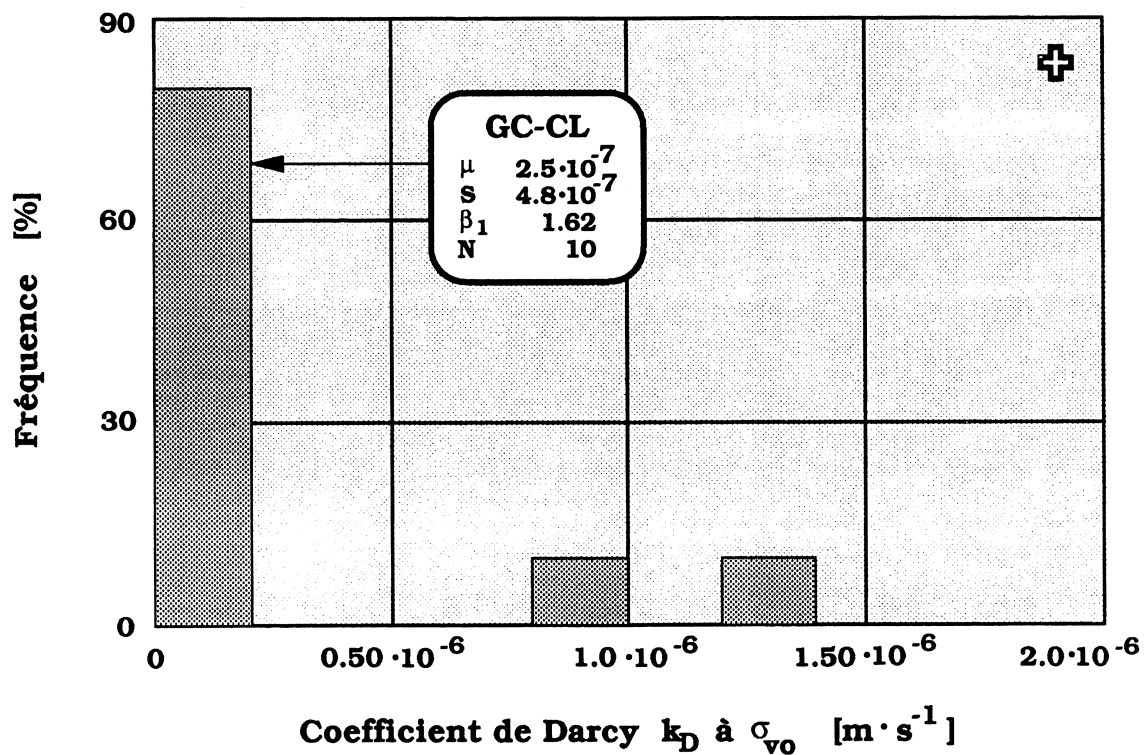


Fig 3.45 Histogramme du coefficient de perméabilité de Darcy k_D de la classe USCS : GC-CL

3.2.3 SW, SP, SM, SC

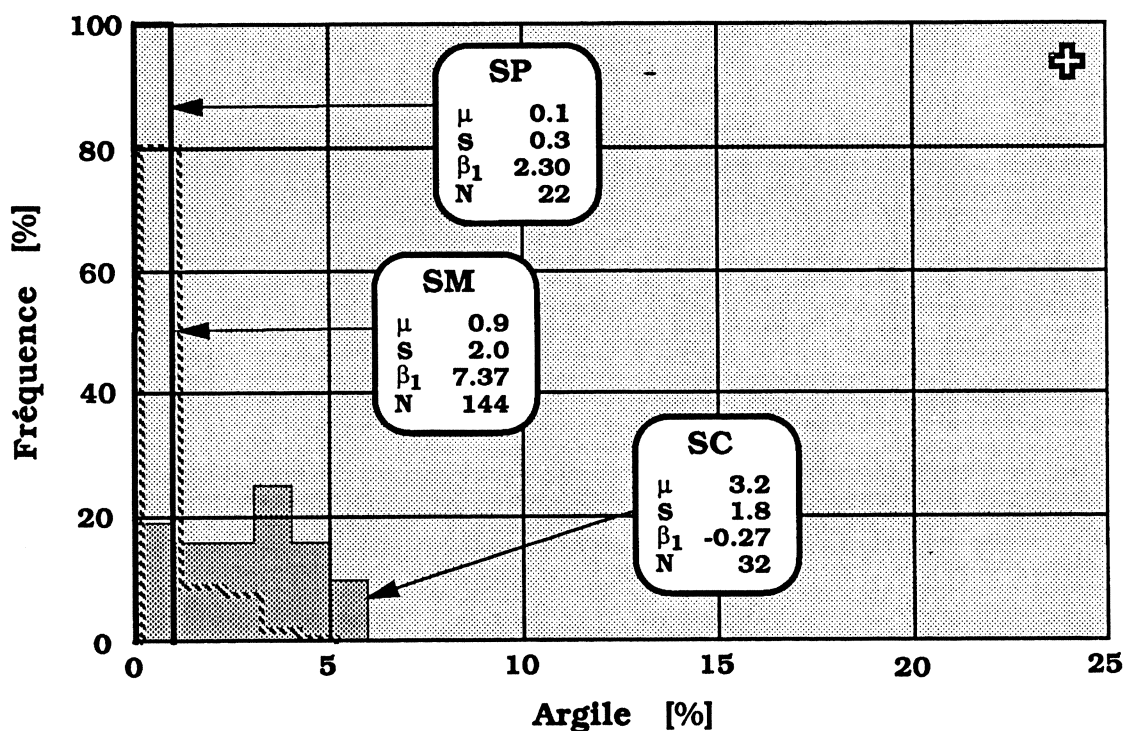


Fig 3.46 Histogramme du pourcentage pondéral de l'argile des classes USCS :
SP, SM, SC

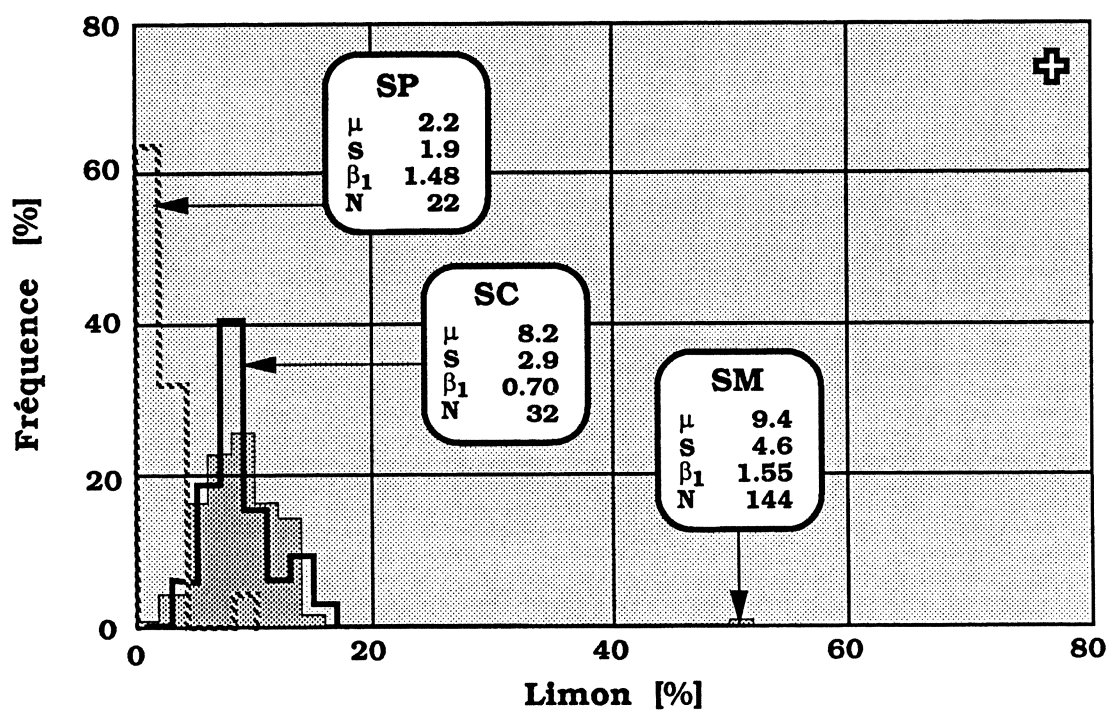


Fig 3.47 Histogramme du pourcentage pondéral du limon des classes USCS :
SP, SM, SC

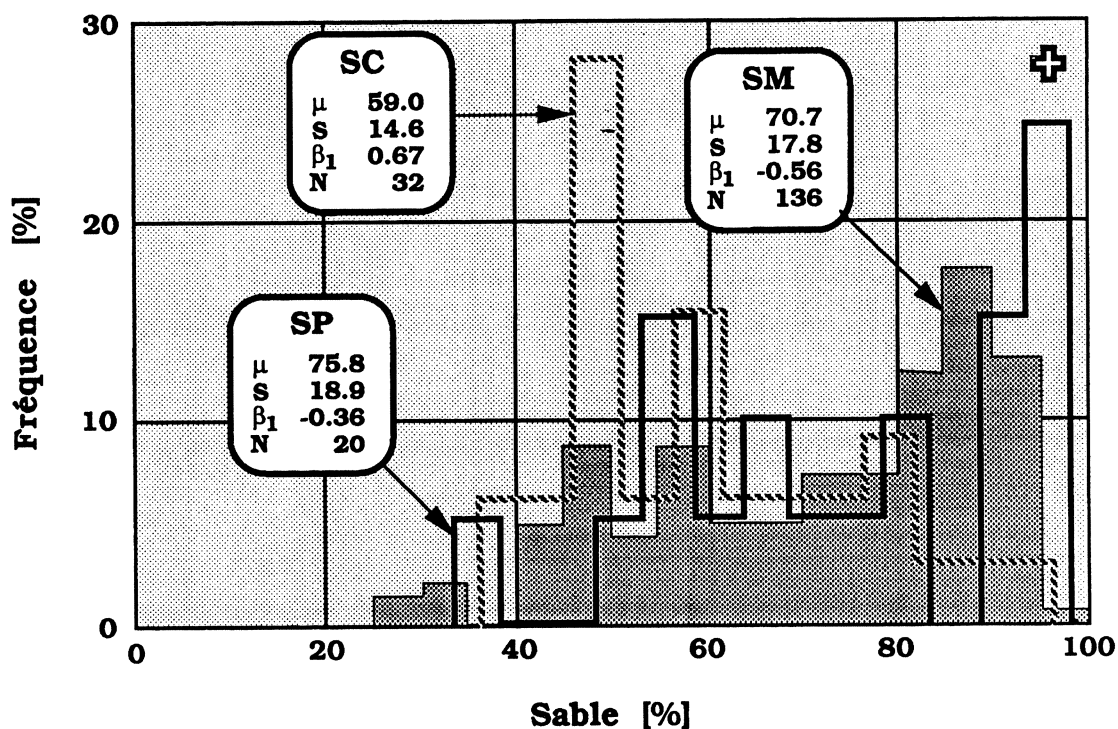


Fig 3.48 Histogramme du pourcentage pondéral du sable des classes USCS : SP, SM, SC

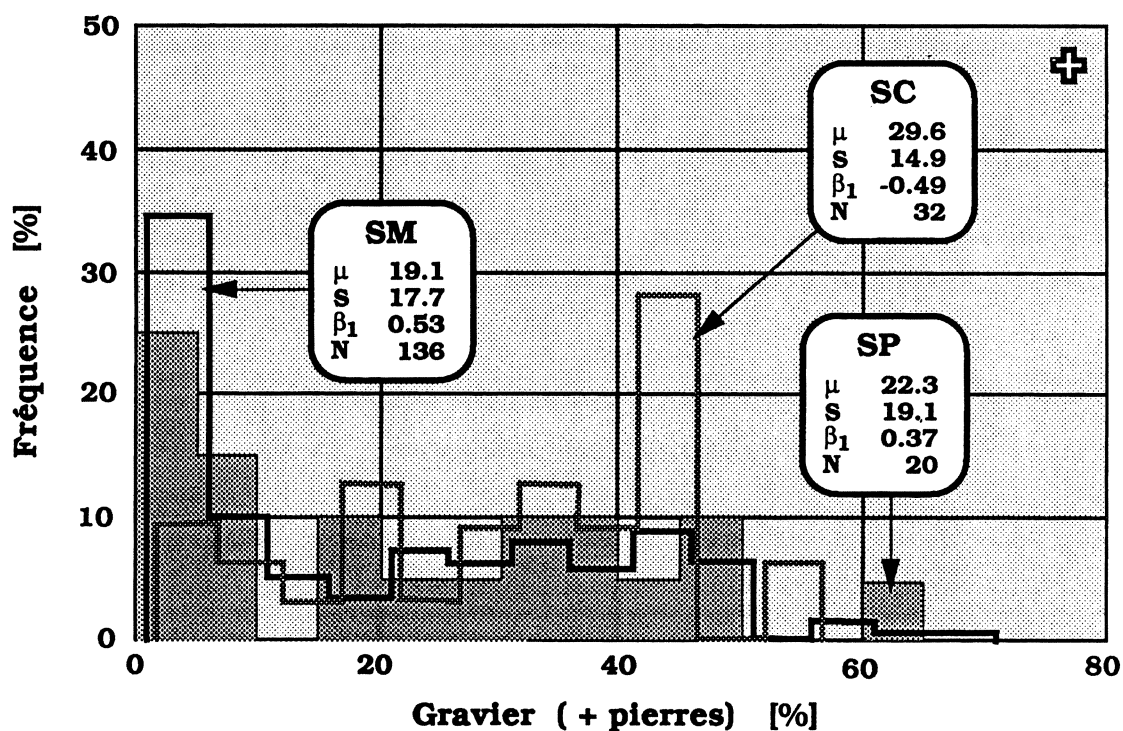
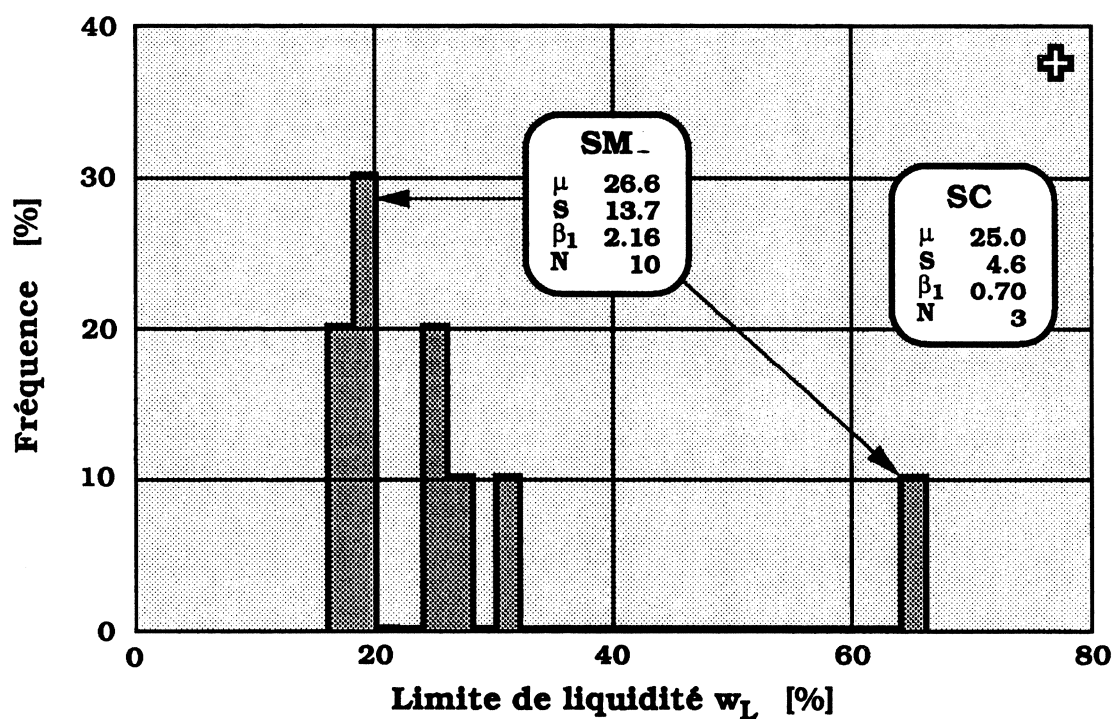
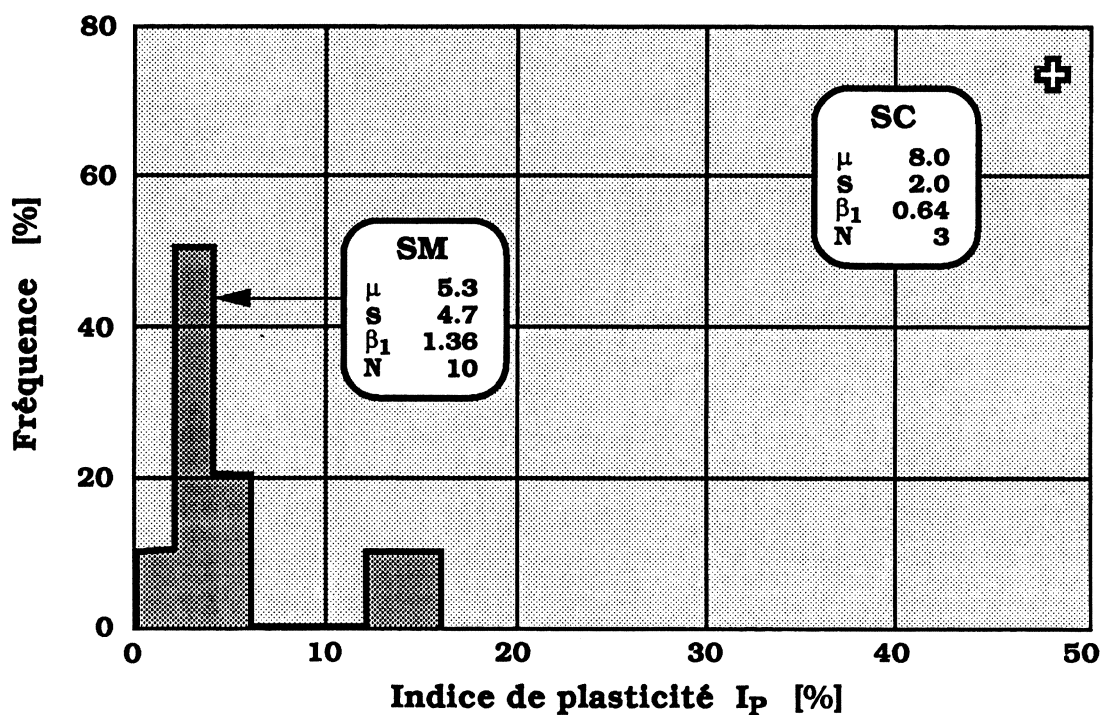


Fig 3.49 Histogramme du pourcentage pondéral du gravier des classes USCS : SP, SM, SC

Fig 3.50 Histogramme de la limite de liquidité w_L des classes USCS : SM, SCFig 3.51 Histogramme de l'indice de plasticité I_p des classes USCS : SM, SC

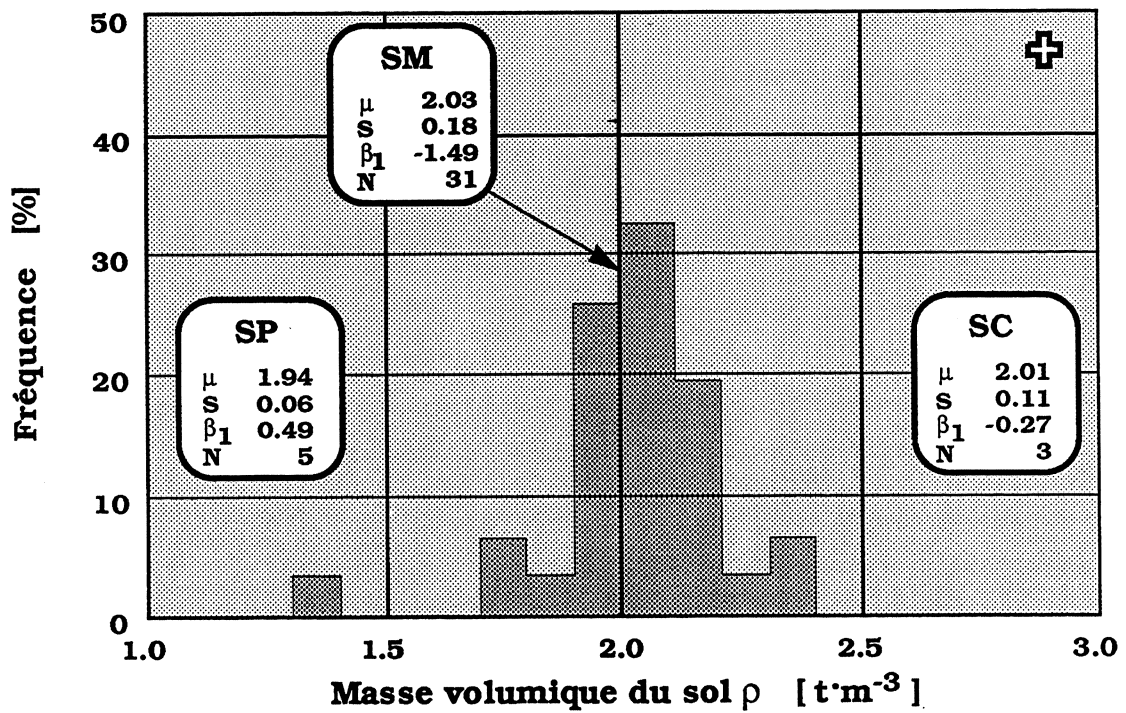


Fig 3.52 Histogramme de la masse volumique du sol ρ des classes USCS : SP, SM, SC

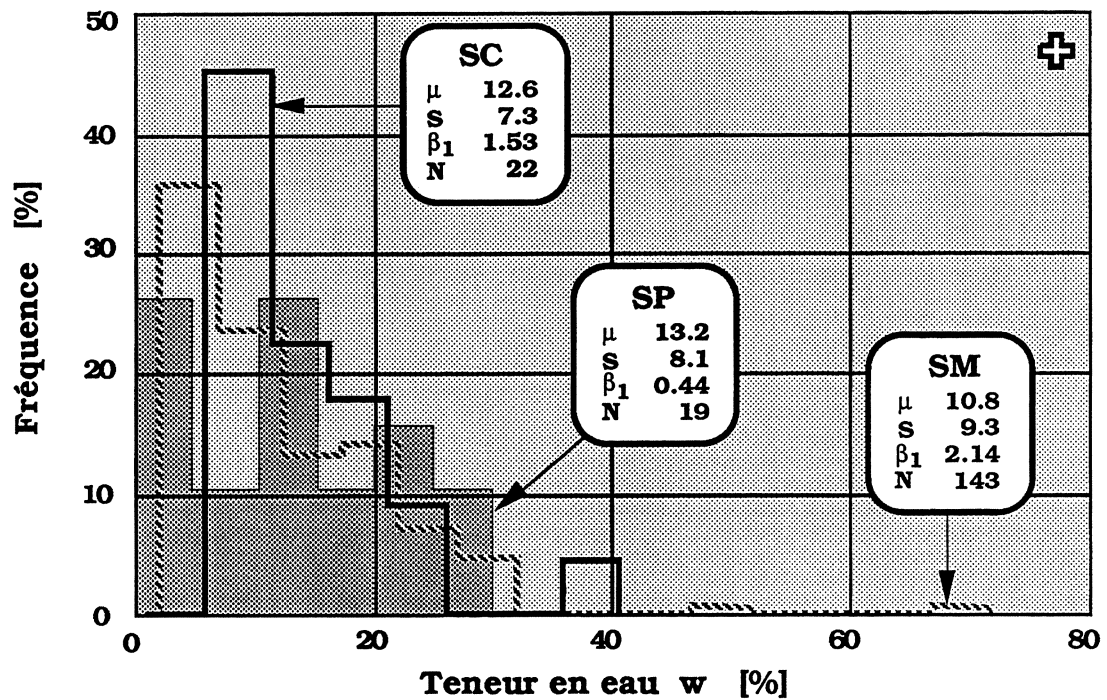
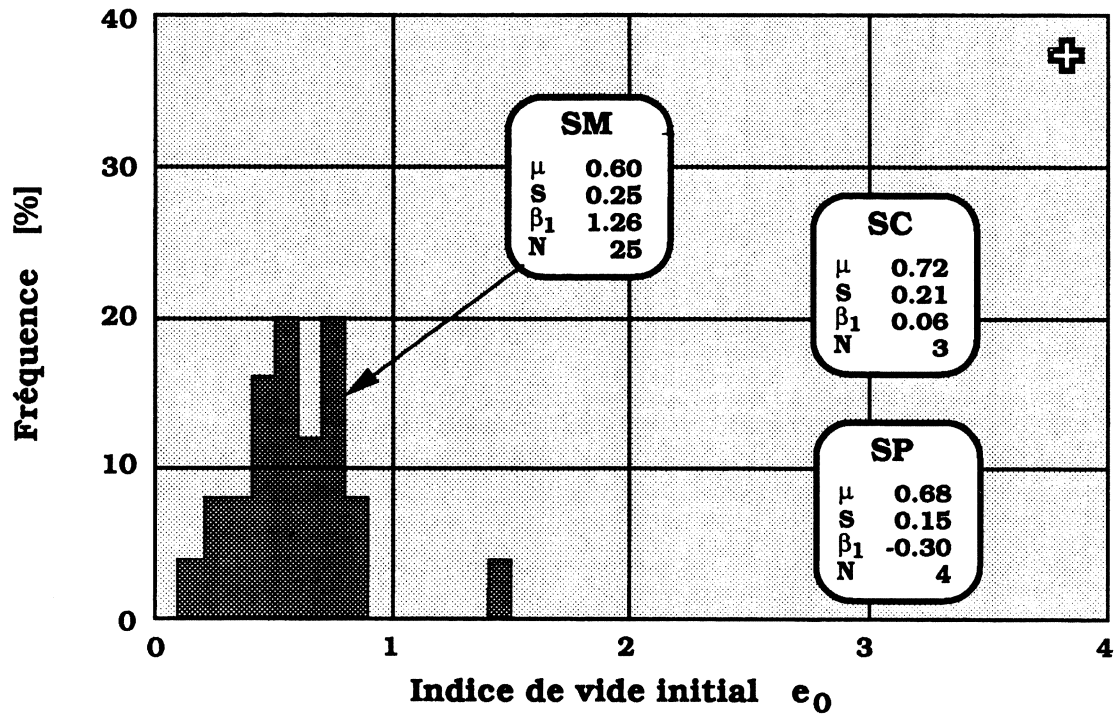
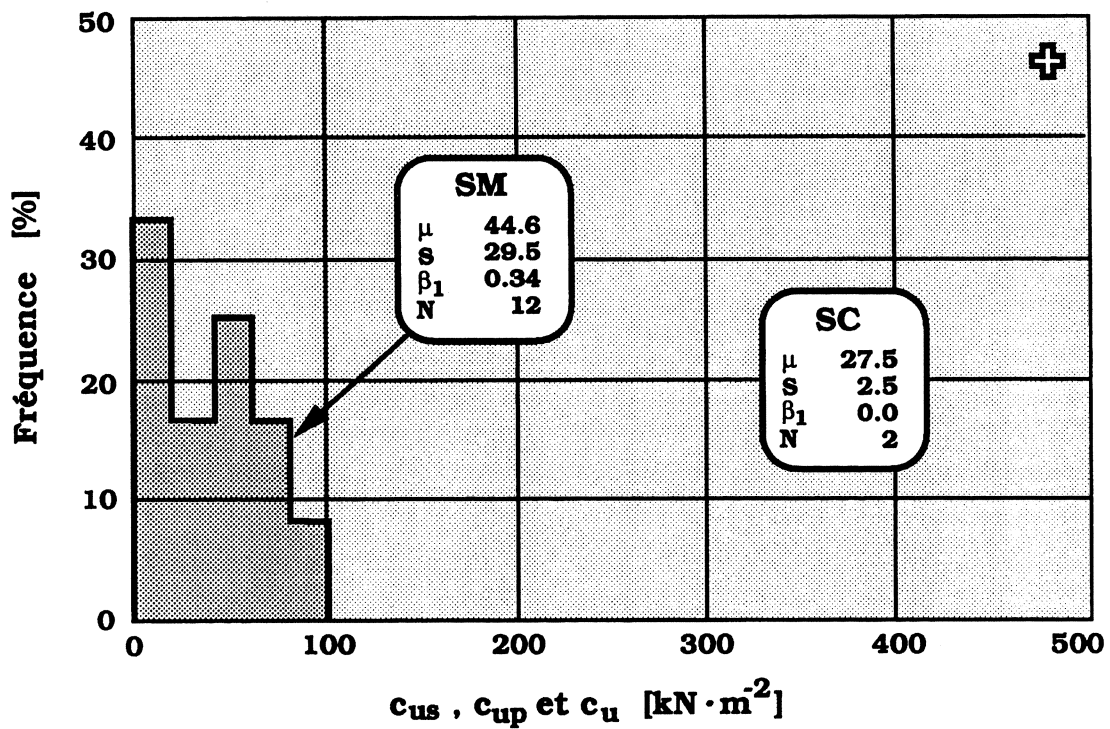


Fig 3.53 Histogramme de la teneur en eau w des classes USCS : SP, SM, SC

Fig 3.54 Histogramme de l'indice de vide initial e_0 des classes USCS : SP, SM, SCFig 3.55 Histogramme de toutes les cohésions apparentes c_{up} , c_{us} et c_u des classes USCS : SM, SC

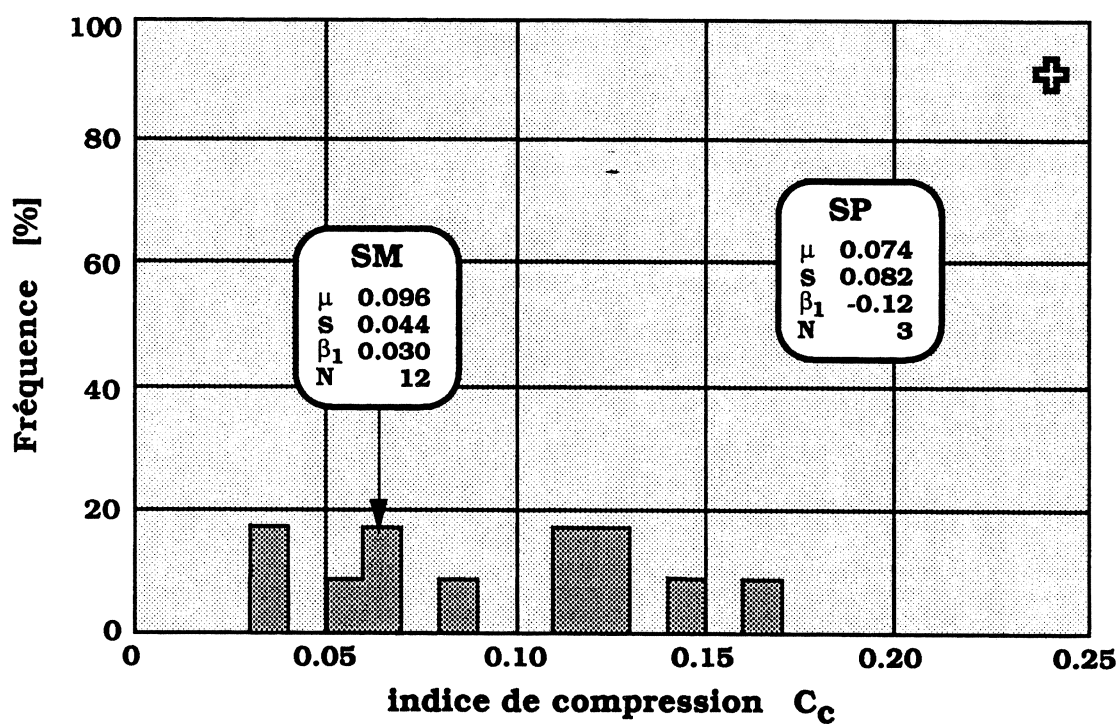


Fig 3.56 Histogramme de l'indice de compression C_c des classes USCS : SP, SM

3.2.4 SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH

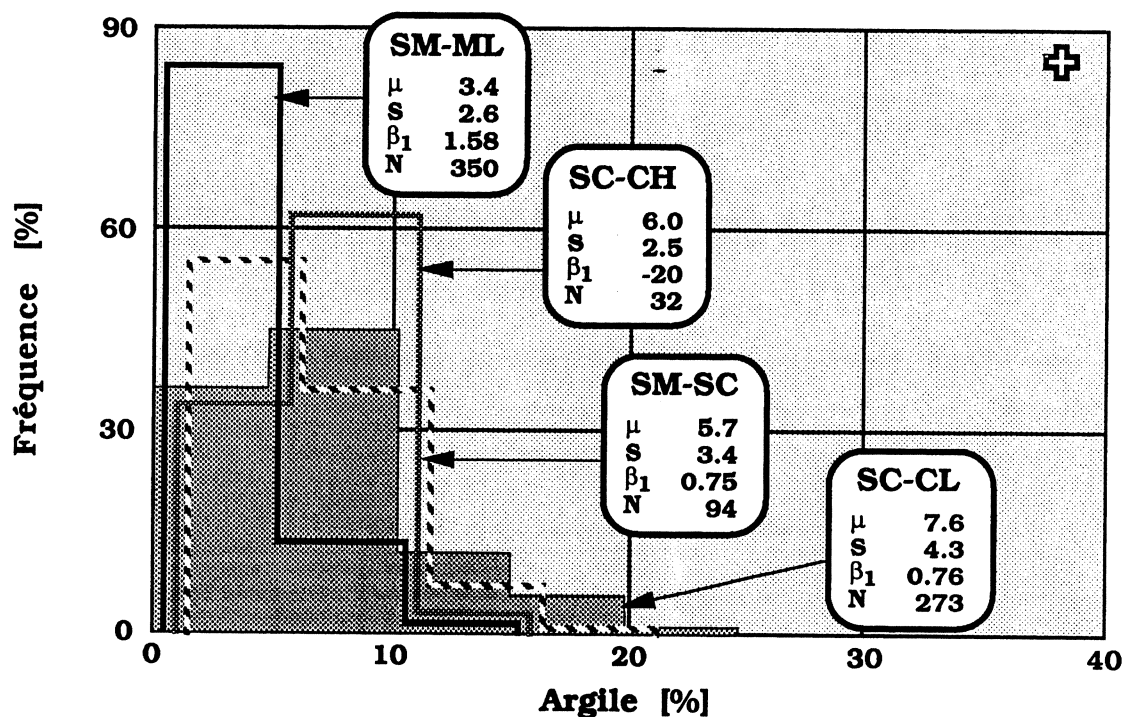


Fig 3.57 Histogramme du pourcentage pondéral de l'argile des classes USCS : SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH

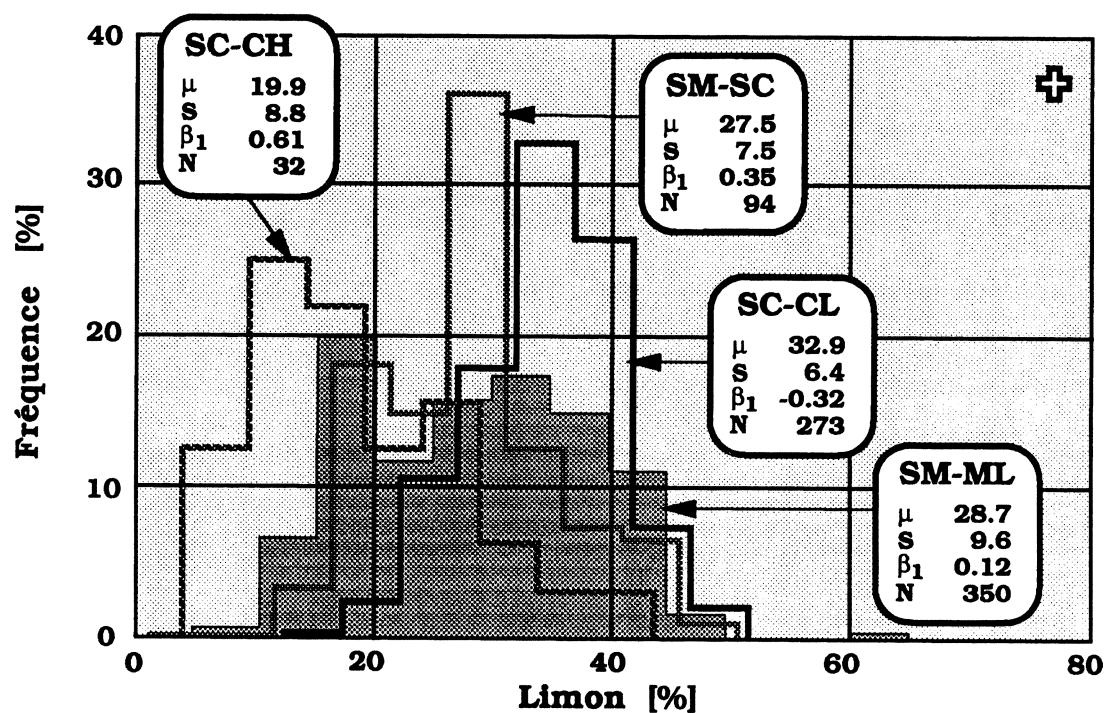


Fig 3.58 Histogramme du pourcentage pondéral du limon des classes USCS : SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH

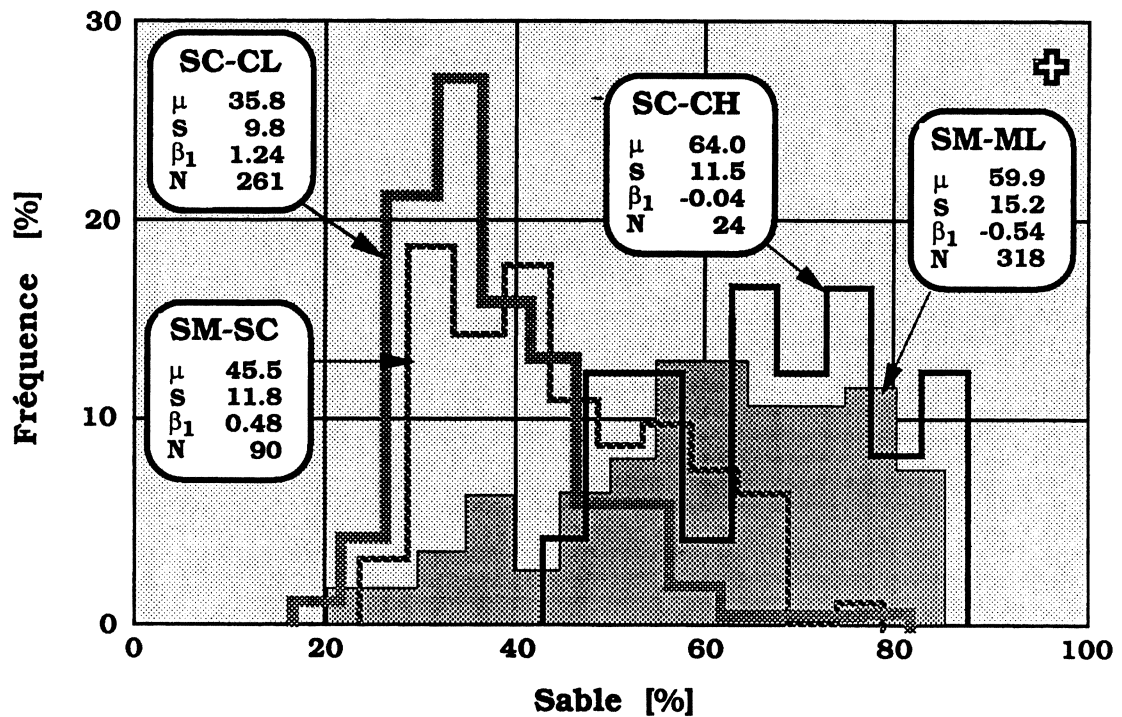


Fig 3.59 Histogramme du pourcentage pondéral du sable des classes USCS : SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH

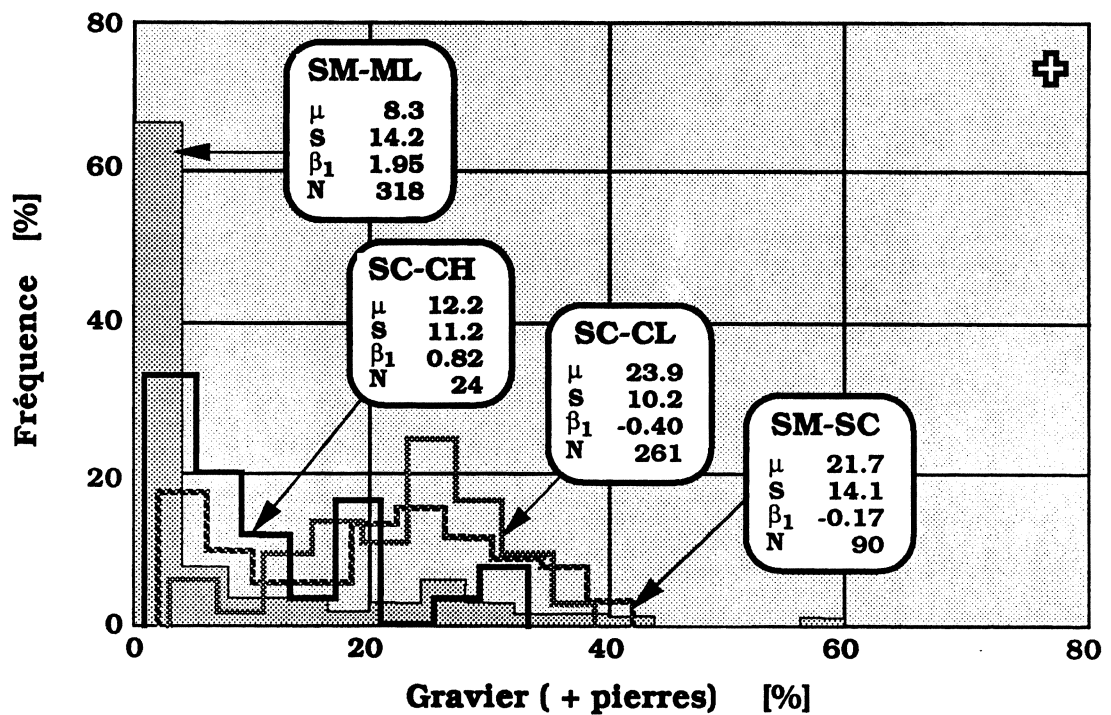


Fig 3.60 Histogramme du pourcentage pondéral du gravier des classes USCS : SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH

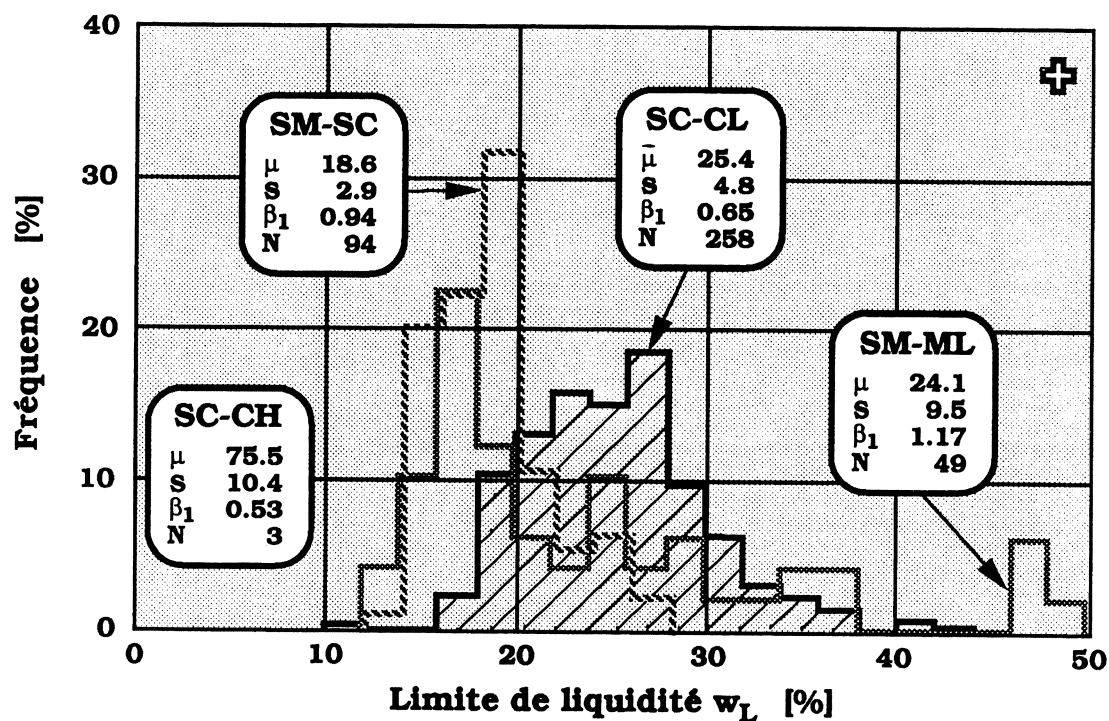


Fig 3.61 Histogramme de la limite de liquidité w_L des classes USCS : SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH

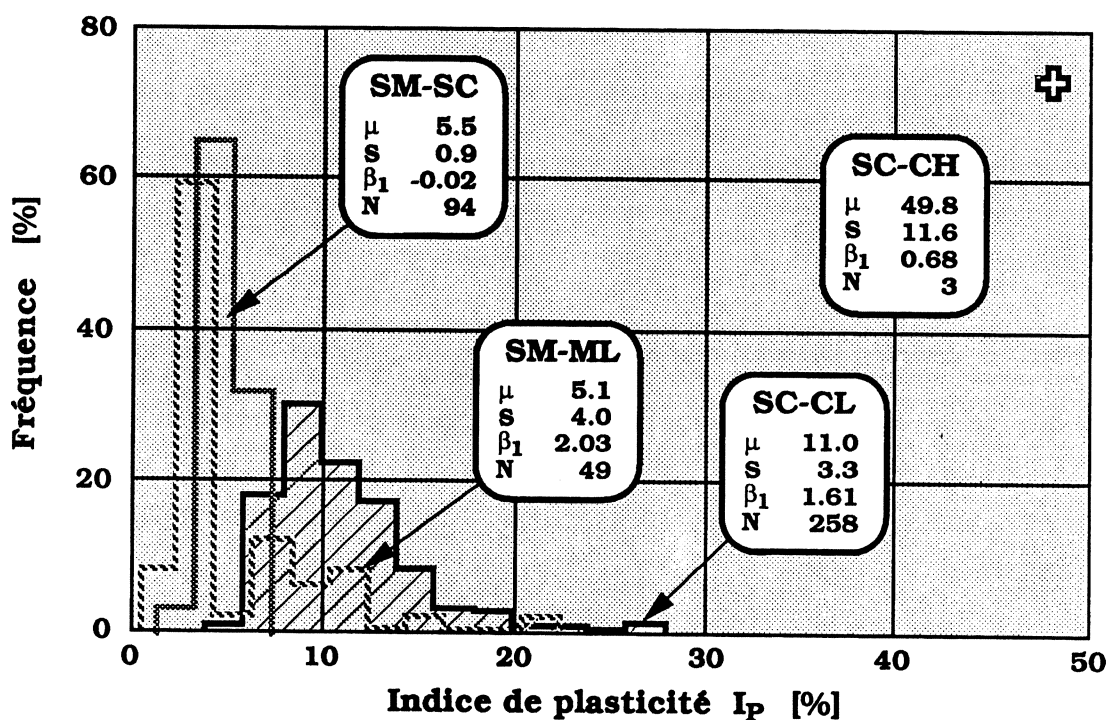


Fig 3.62 Histogramme de l'indice de plasticité I_p des classes USCS : SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH

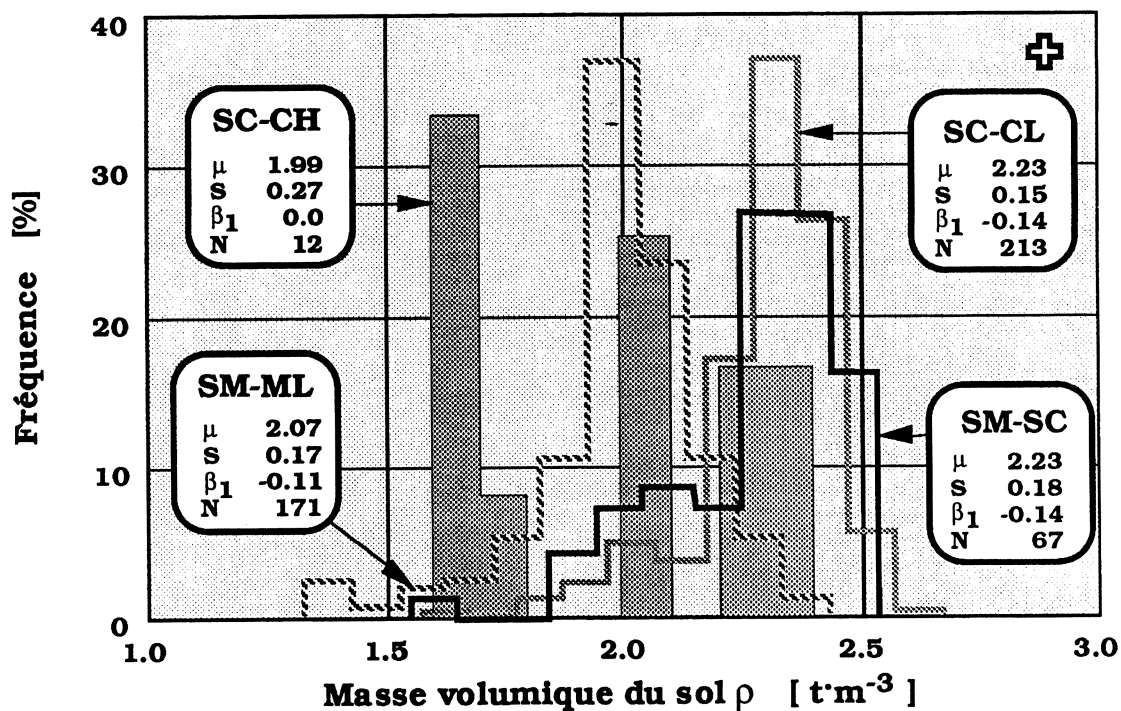


Fig 3.63 Histogramme de la masse volumique du sol ρ des classes USCS : SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH

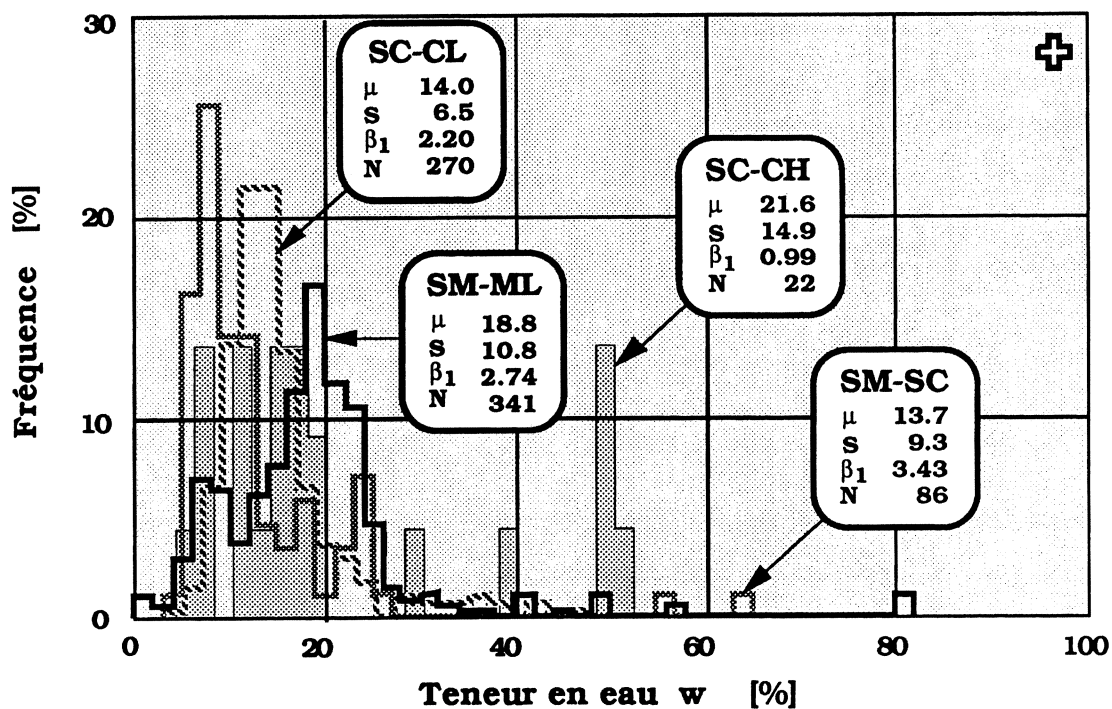


Fig 3.64 Histogramme de la teneur en eau w des classes USCS : SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH

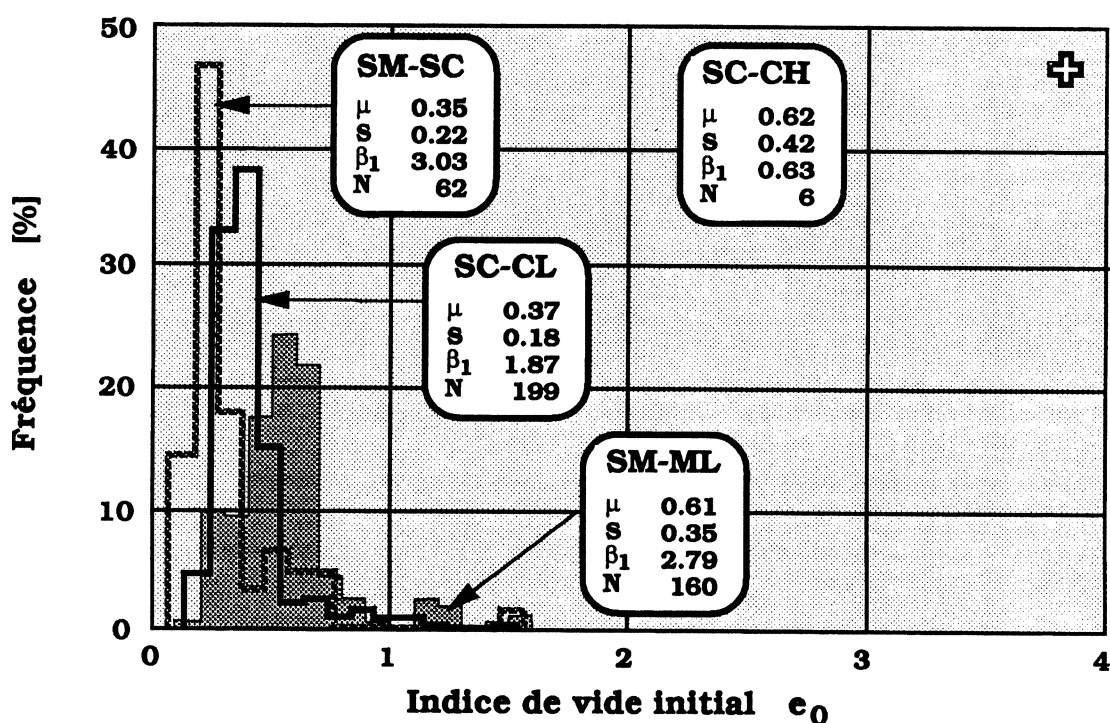


Fig 3.65 Histogramme de l'indice de vide initial e_0 des classes USCS : SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH

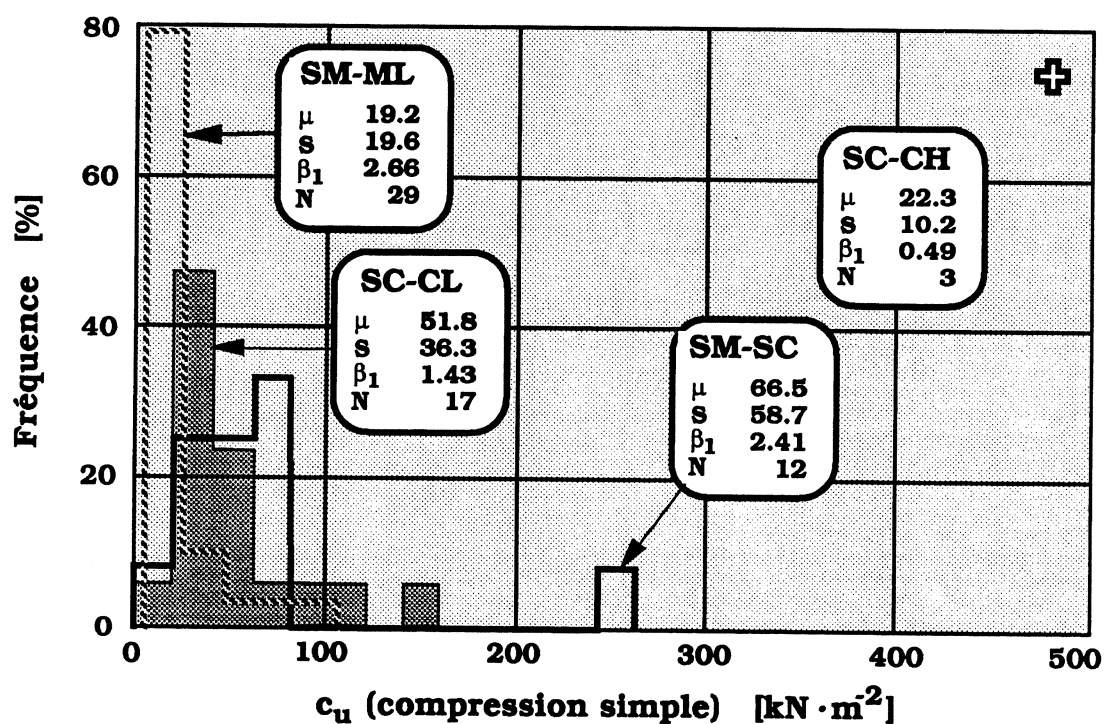


Fig 3.66 Histogramme de la cohésion apparente c_u (compression simple) des classes USCS : SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH

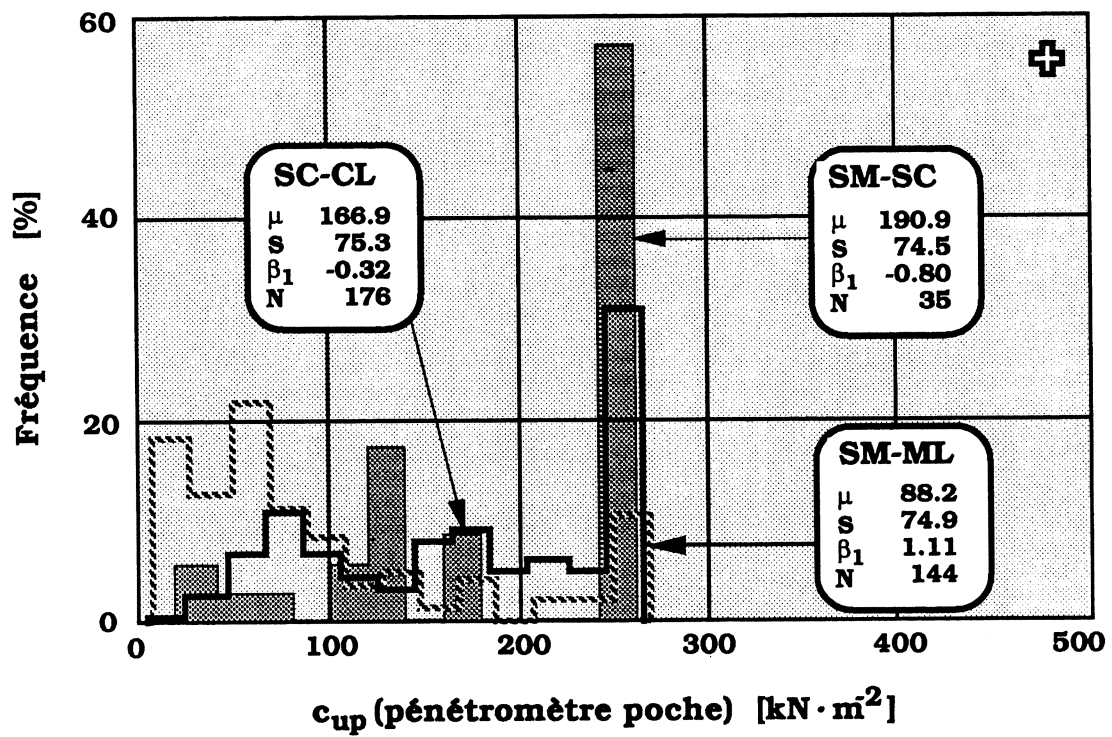


Fig 3.67 Histogramme de la cohésion apparente c_{up} (pénétrètre de poche) des classes USCS : SM-ML, SM-SC, SC-CL

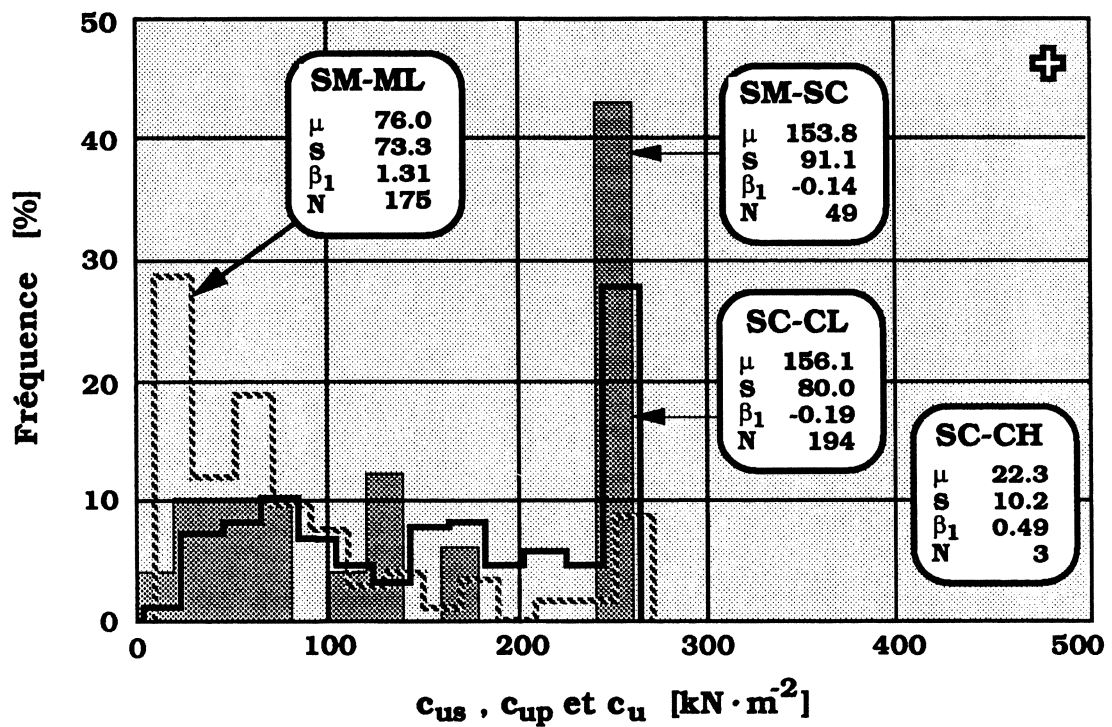


Fig 3.68 Histogramme de toutes les cohésions apparentes c_{up} , c_{us} et c_u des classes USCS : SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH

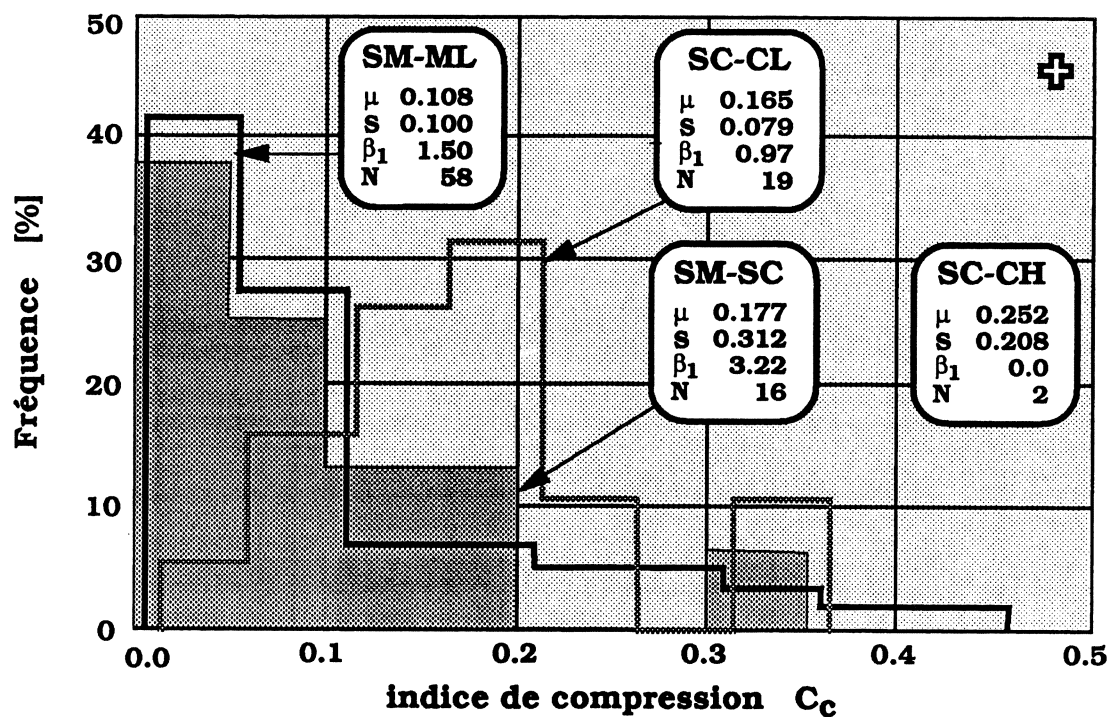


Fig 3.69 Histogramme de l'indice de compression C_c des classes USCS :
 SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH

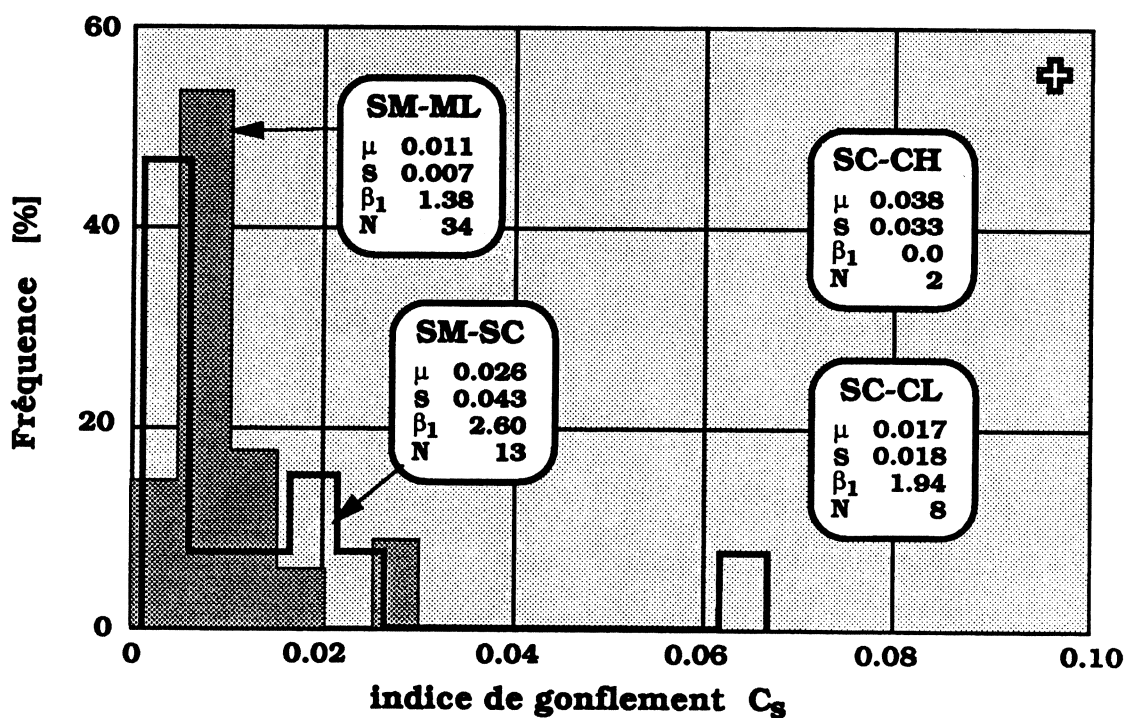


Fig 3.70 Histogramme de l'indice de gonflement C_s des classes USCS :
 SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH

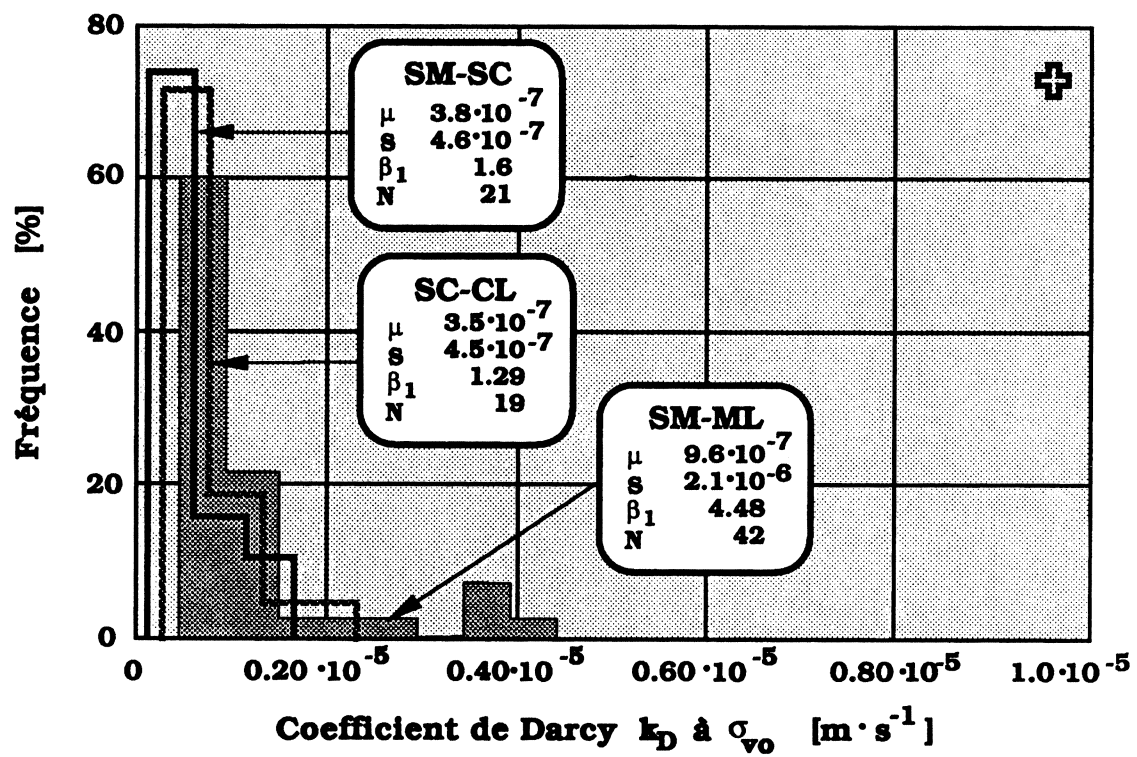


Fig 3.71 Histogramme du coefficient de perméabilité de Darcy k_D de la classe USCS : SM-ML, SM-SC, SC-CL

3.2.5 ML, CL-ML, CL, CH, MH

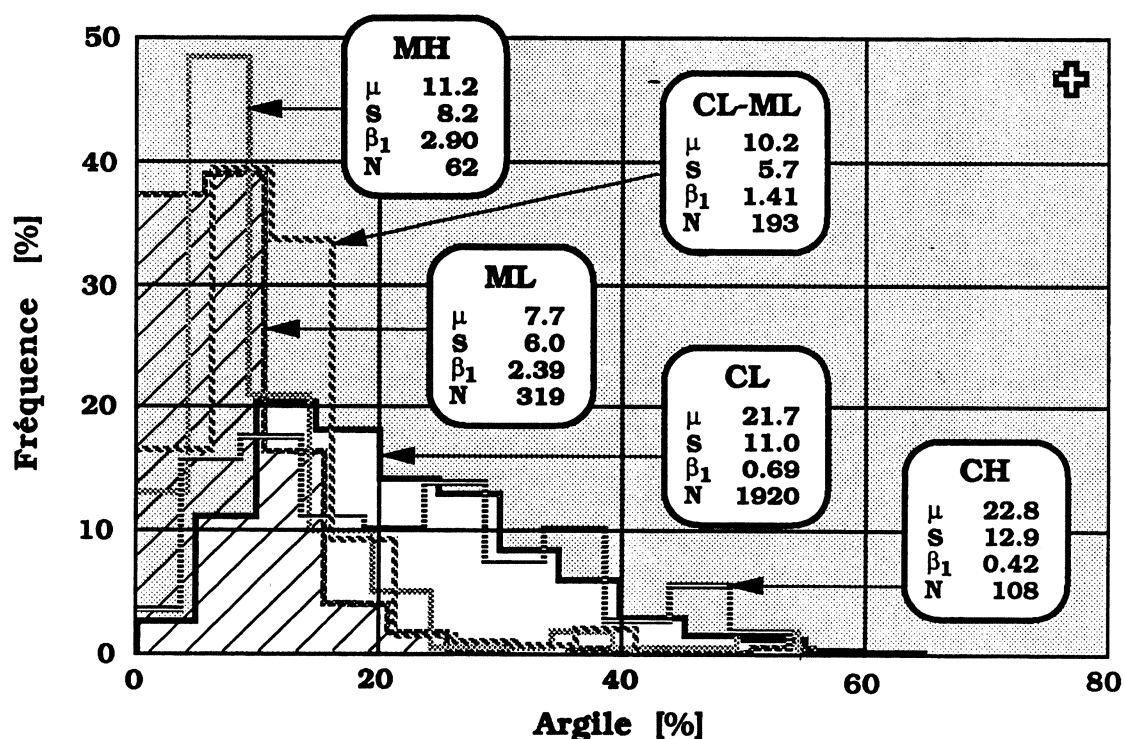


Fig 3.72 Histogramme du pourcentage pondéral de l'argile des classes USCS :
ML, CL-ML, CL, CH, MH

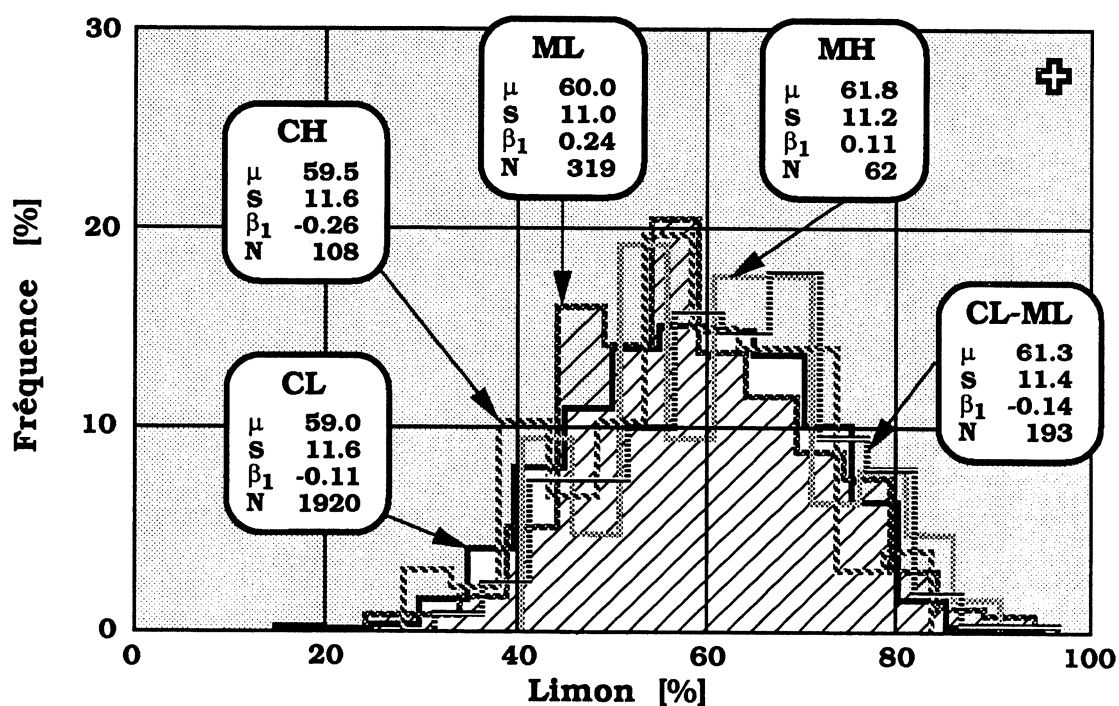


Fig 3.73 Histogramme du pourcentage pondéral du limon des classes USCS :
ML, CL-ML, CL, CH, MH

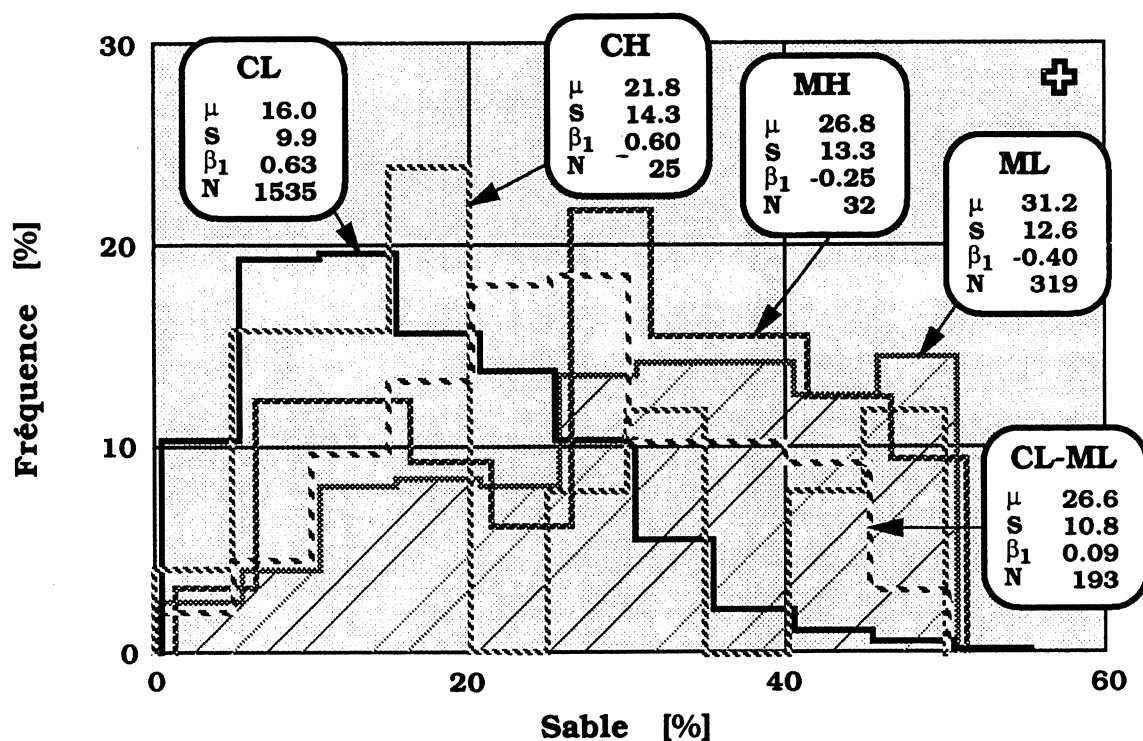


Fig 3.74 Histogramme du pourcentage pondéral du sable des classes USCS : ML, CL-ML, CL, CH, MH

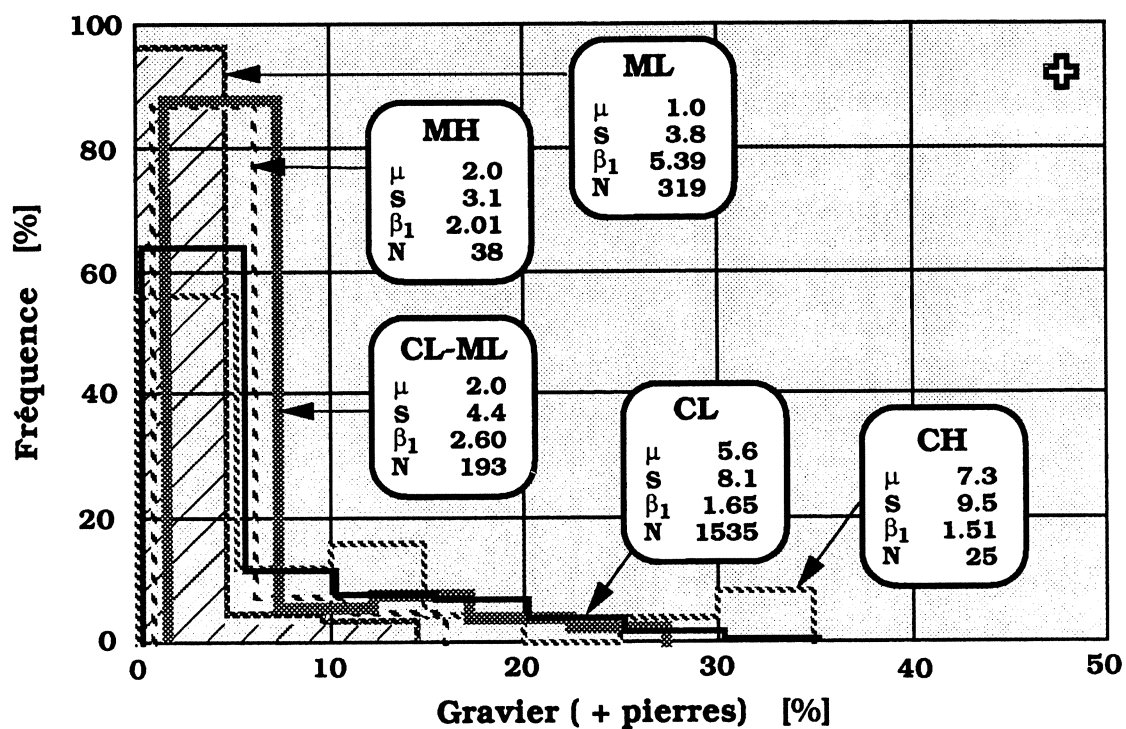


Fig 3.75 Histogramme du pourcentage pondéral du gravier des classes USCS : ML, CL-ML, CL, CH, MH

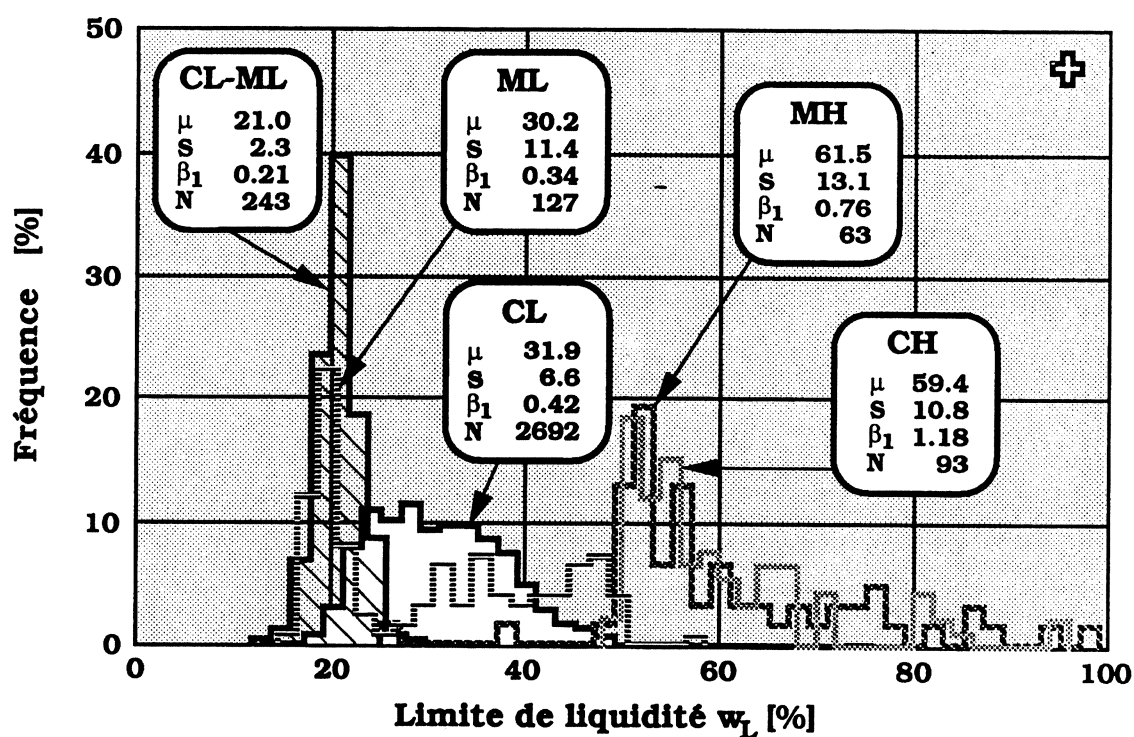


Fig 3.76 Histogramme de la limite de liquidité w_L des classes USCS : ML, CL-ML, CL, CH, MH

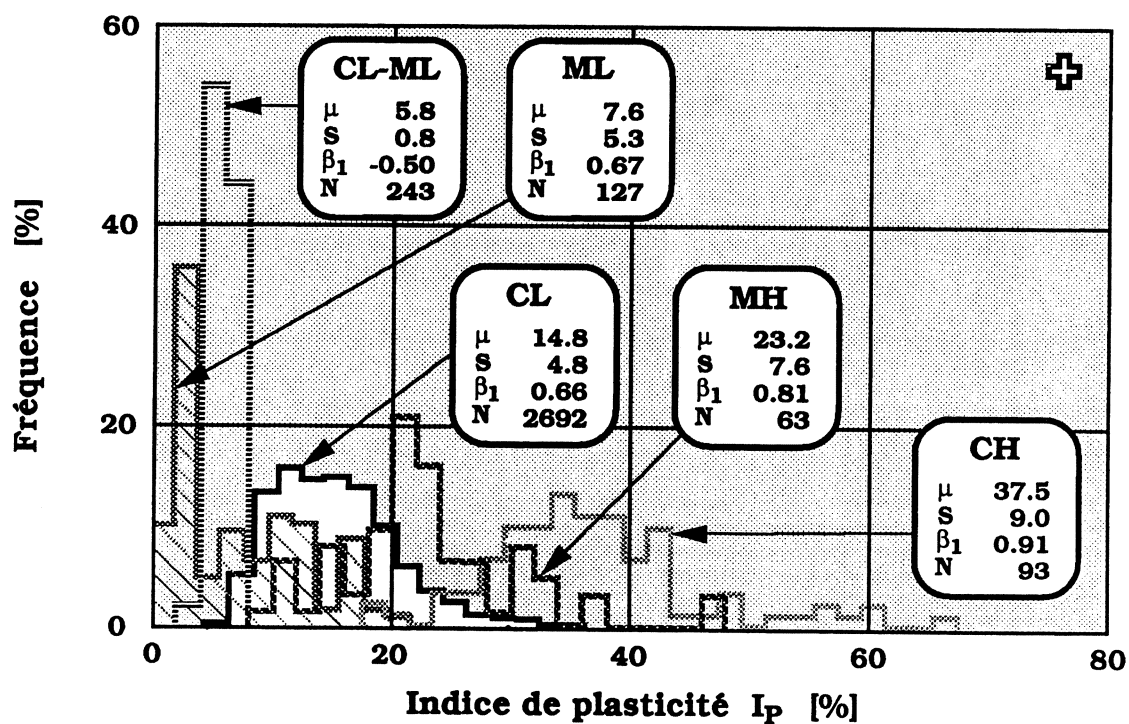


Fig 3.77 Histogramme de l'indice de plasticité I_p des classes USCS : ML, CL-ML, CL, CH, MH

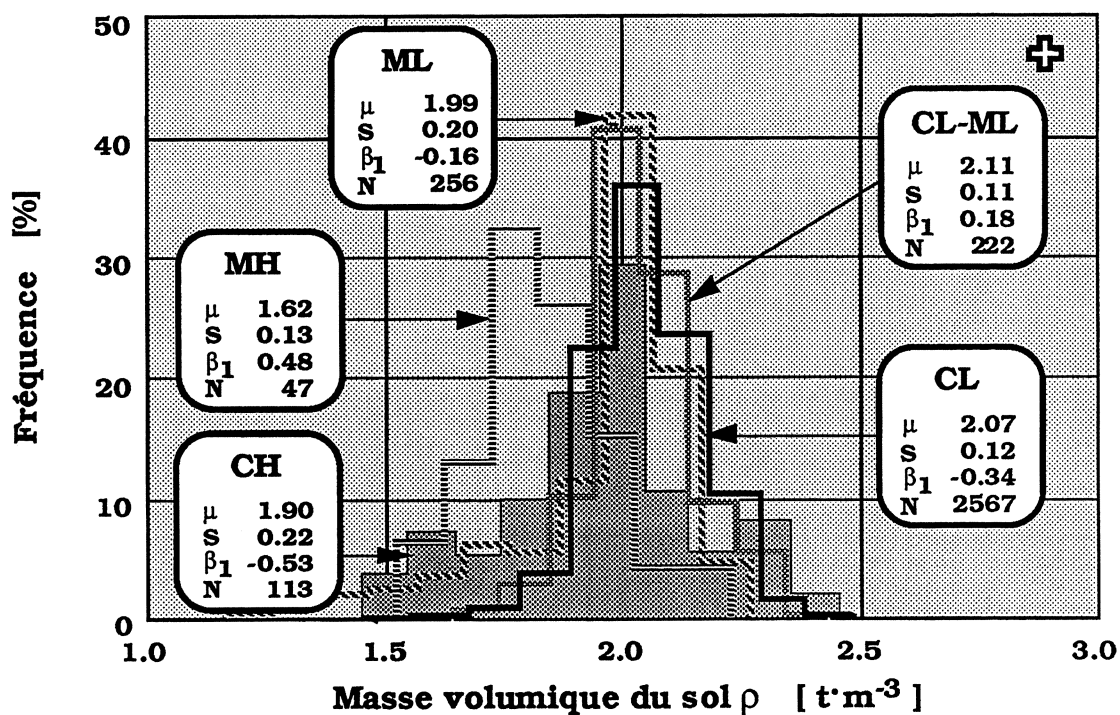


Fig 3.78 Histogramme de la masse volumique du sol ρ des classes USCS :
ML, CL-ML, CL, CH, MH

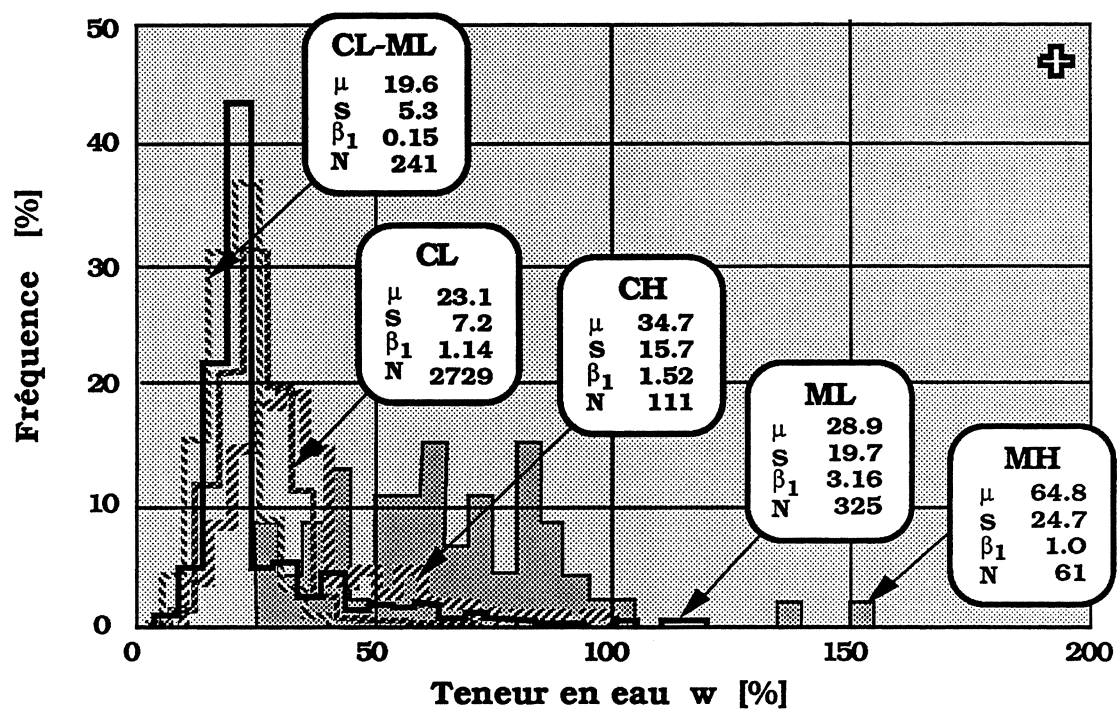


Fig 3.79 Histogramme de la teneur en eau w des classes USCS :
ML, CL-ML, CL, CH, MH

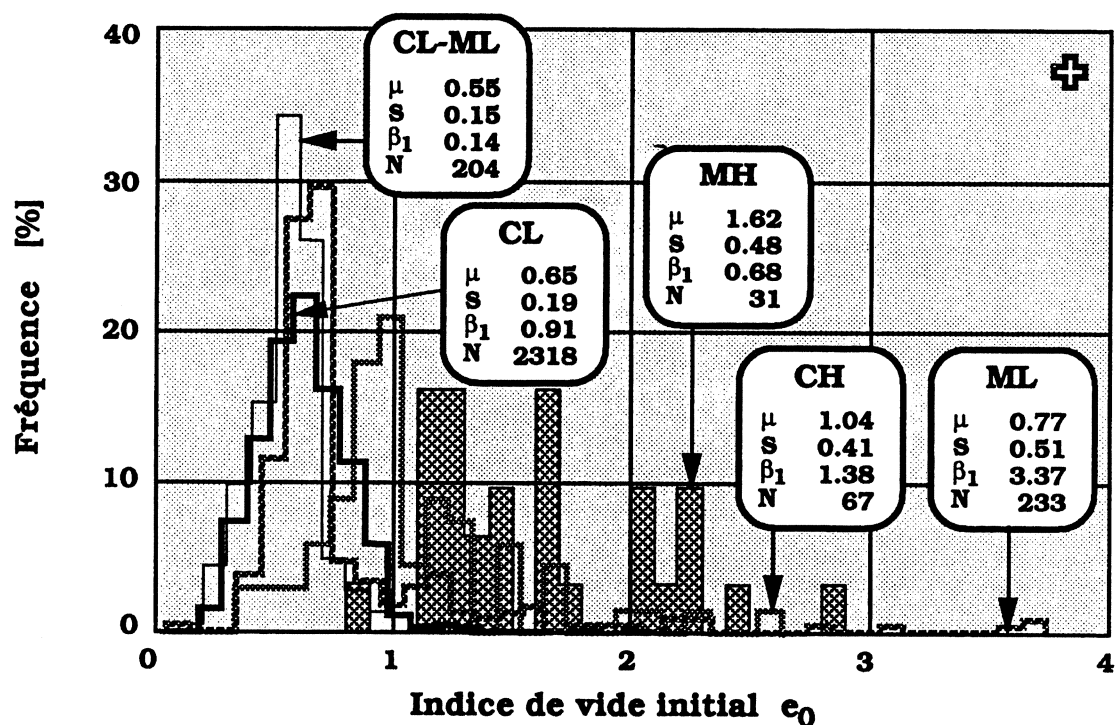


Fig 3.80 Histogramme de l'indice de vide initial e_0 des classes USCS :
ML, CL-ML, CL, CH, MH

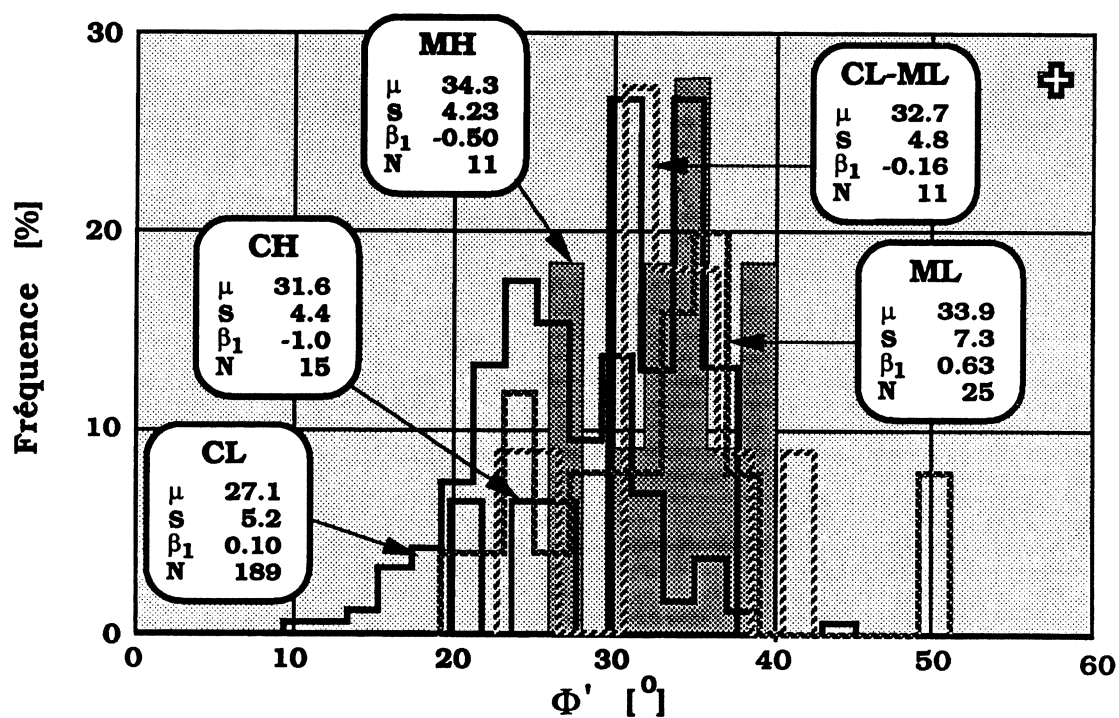


Fig 3.81 Histogramme de l'angle de frottement interne effectif Φ' des classes USCS :
ML, CL-ML, CL, CH, MH

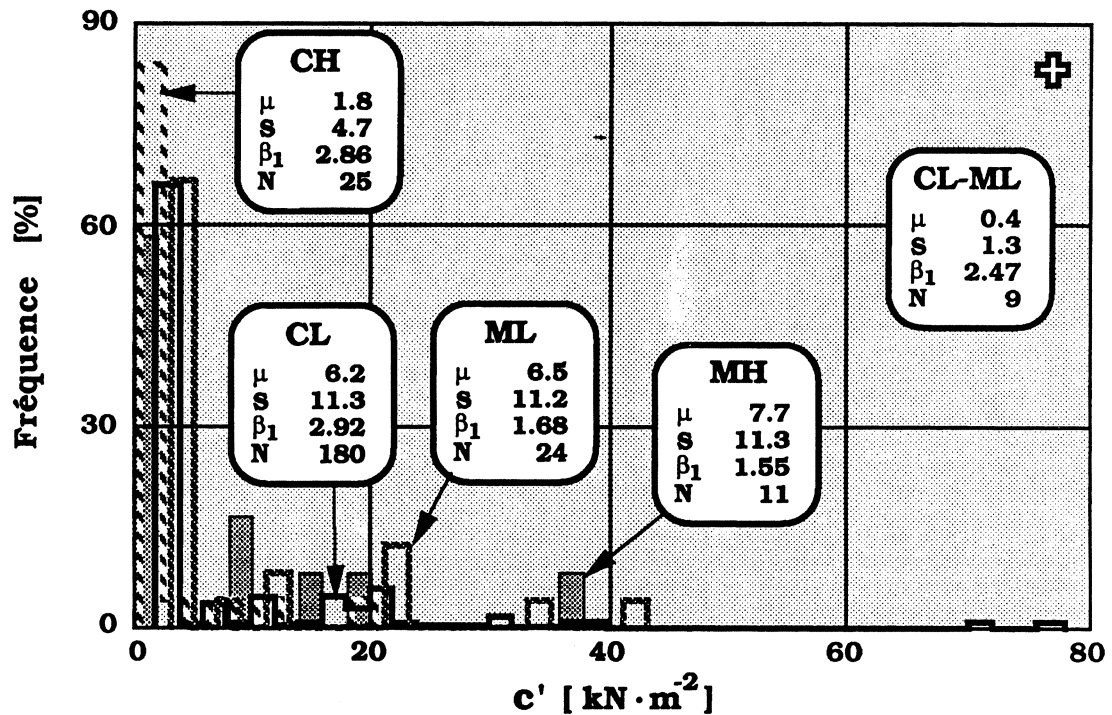


Fig 3.82 Histogramme de la cohésion effective c' des classes USCS :
ML, CL-ML, CL, CH, MH

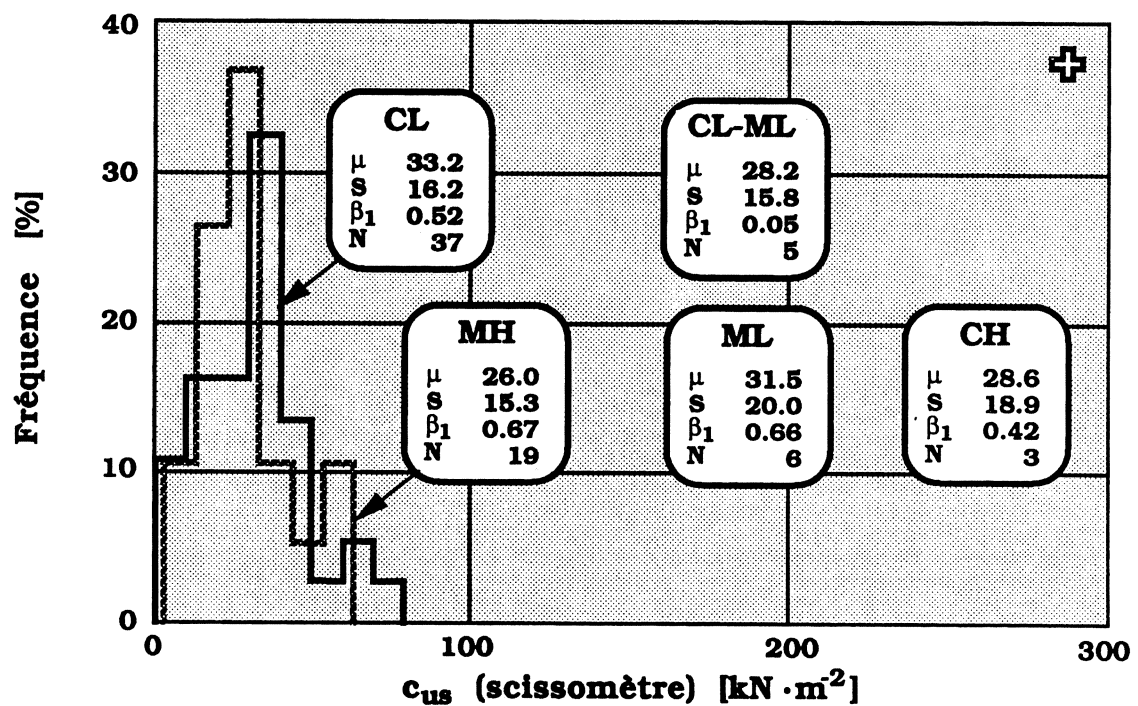


Fig 3.83 Histogramme de la cohésion apparente c_{us} (scissomètre) des classes USCS :
ML, CL-ML, CL, CH, MH

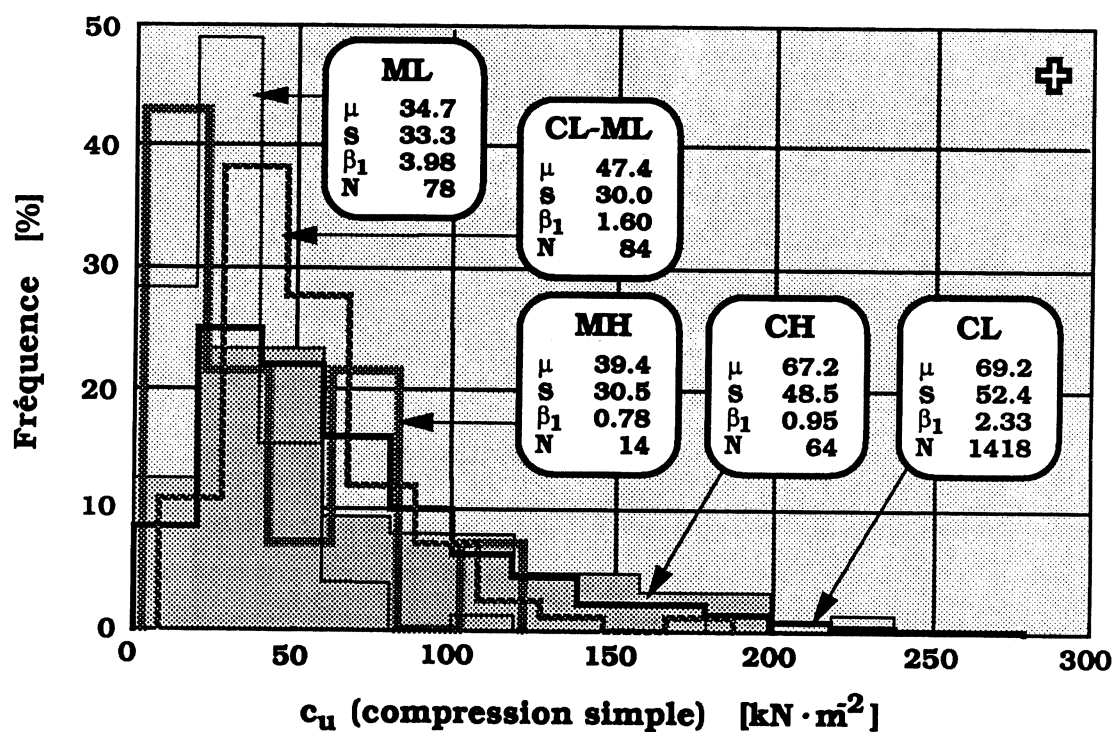


Fig 3.84 Histogramme de la cohésion apparente c_u (compression simple) des classes USCS : ML, CL-ML, CL, CH, MH

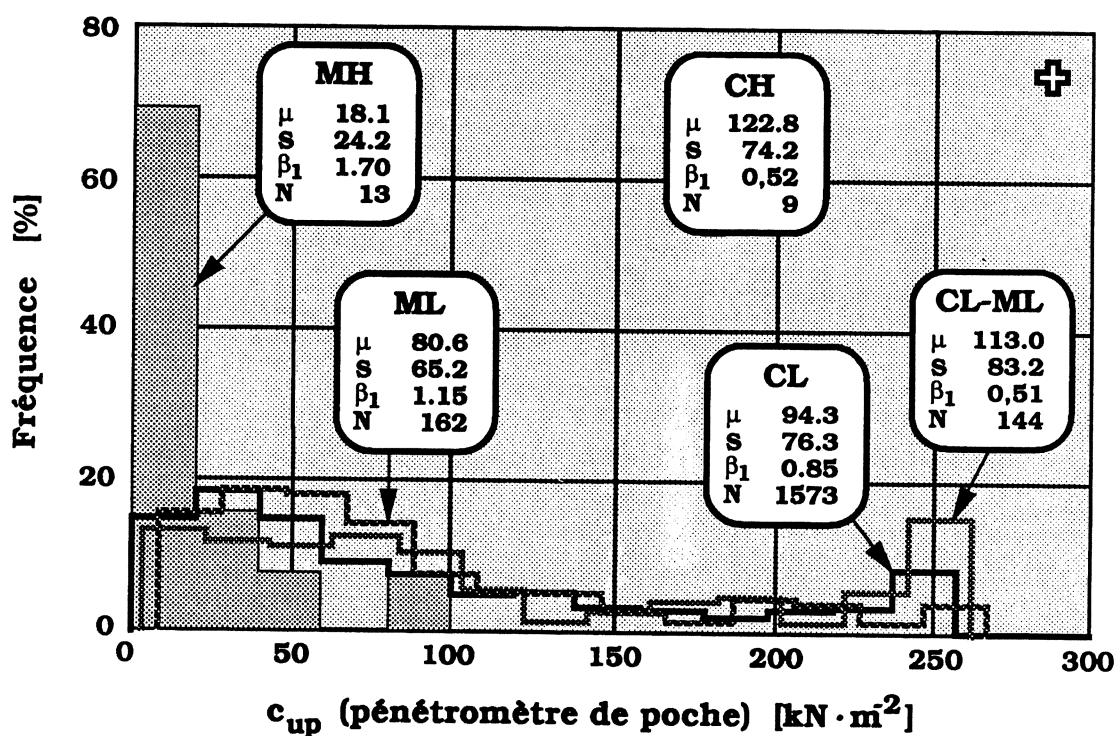


Fig 3.85 Histogramme de la cohésion apparente c_{up} (pénétromètre de poche) des classes USCS : ML, CL-ML, CL, CH, MH

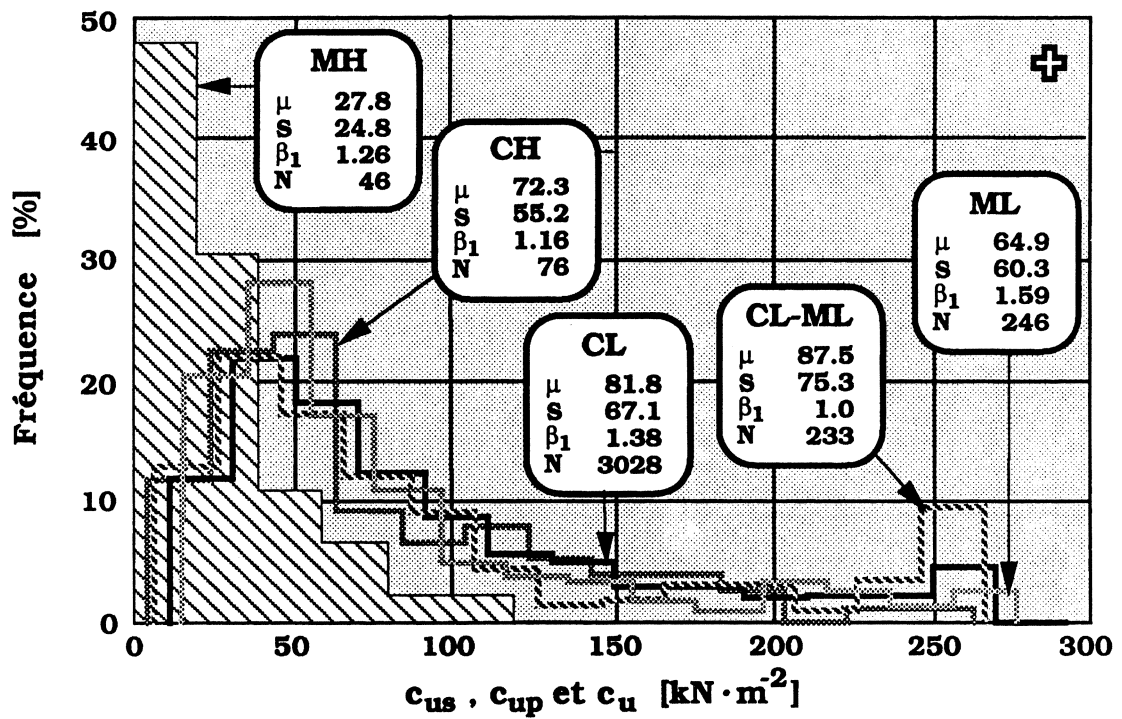


Fig 3.86 Histogramme de toutes les cohésions apparentes c_{up} , c_{us} et c_u des classes USCS : ML, CL-ML, CL, CH, MH

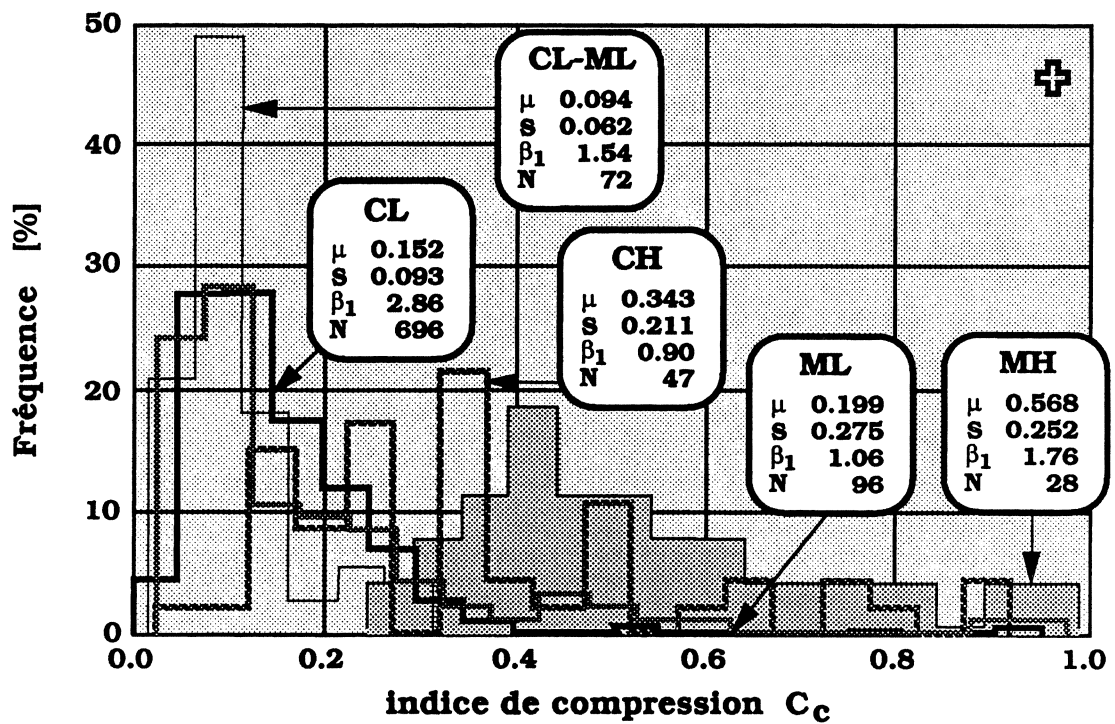


Fig 3.87 Histogramme de l'indice de compression C_c des classes USCS : ML, CL-ML, CL, CH, MH

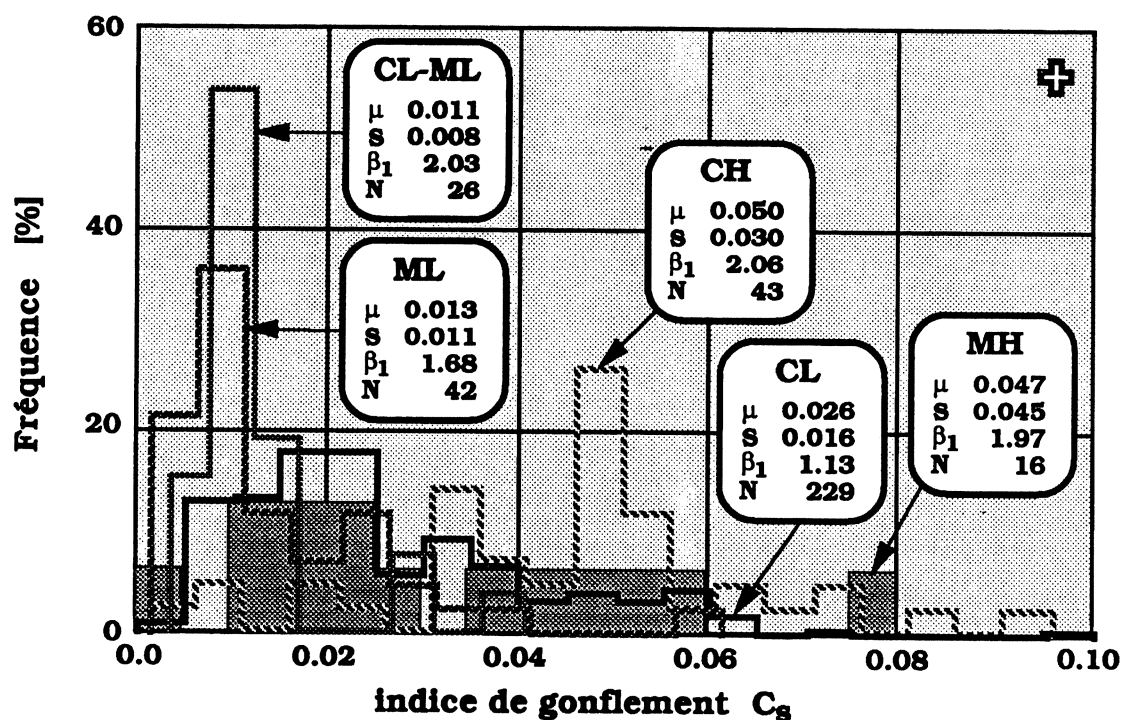


Fig 3.88 Histogramme de l'indice de gonflement C_s des classes USCS : ML, CL-ML, CL, CH, MH

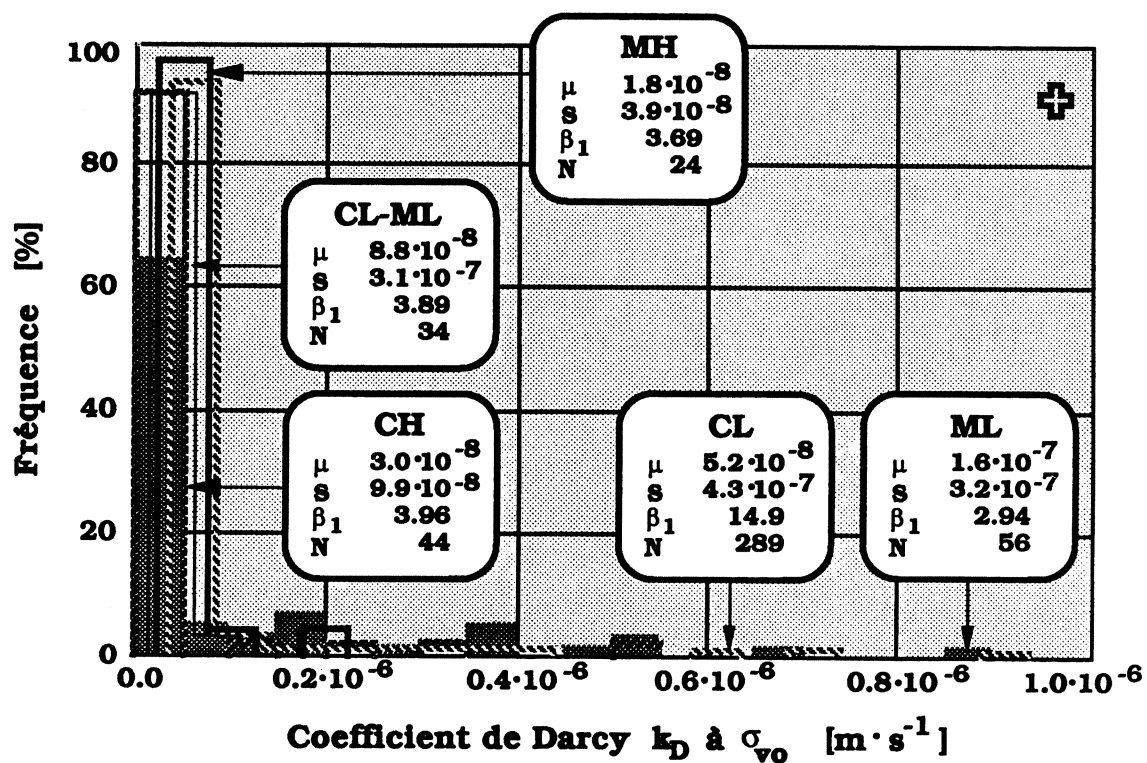


Fig 3.89 Histogramme du coefficient de perméabilité de Darçy k_D de la classe USCS : ML, CL-ML, CL, CH, MH

3.2.6 OL, OH, Pt

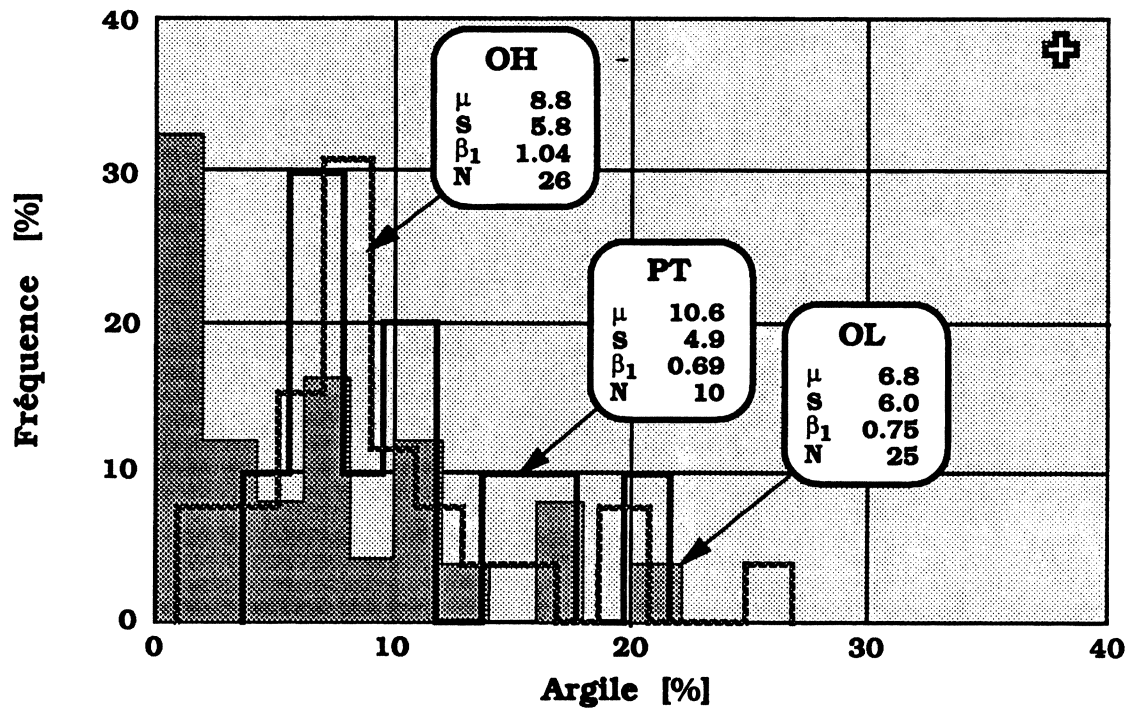


Fig 3.90 Histogramme du pourcentage pondéral de l'argile des classes USCS : OL, OH, Pt

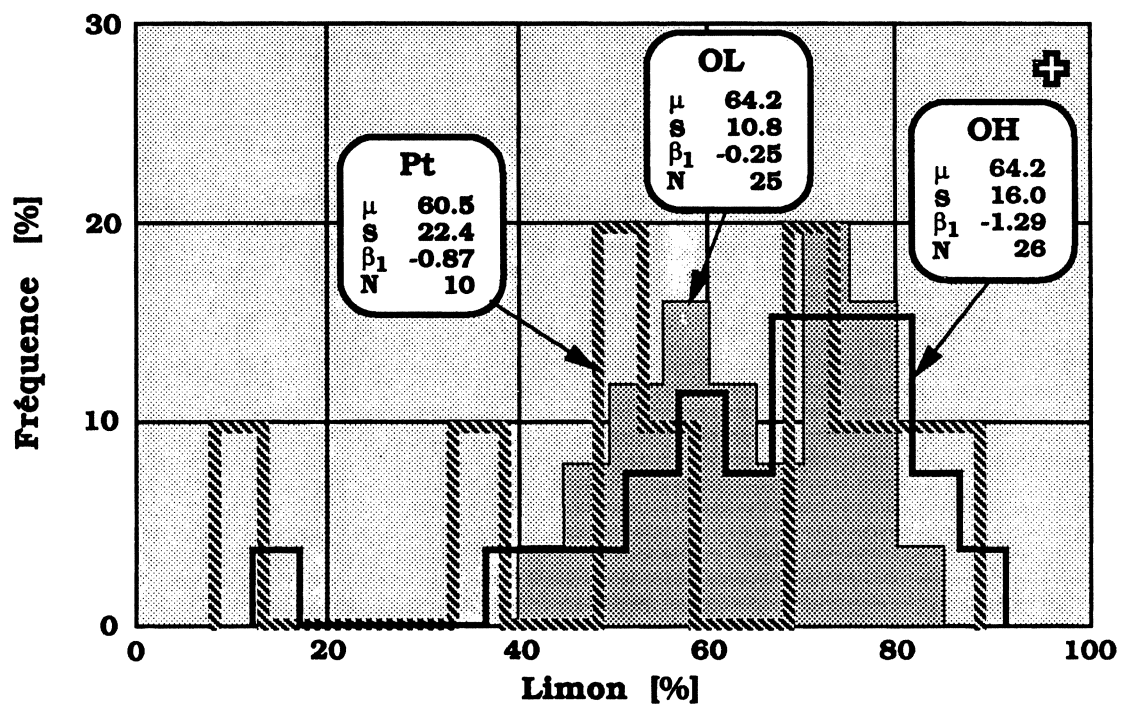


Fig 3.91 Histogramme du pourcentage pondéral du limon des classes USCS : OL, OH, Pt

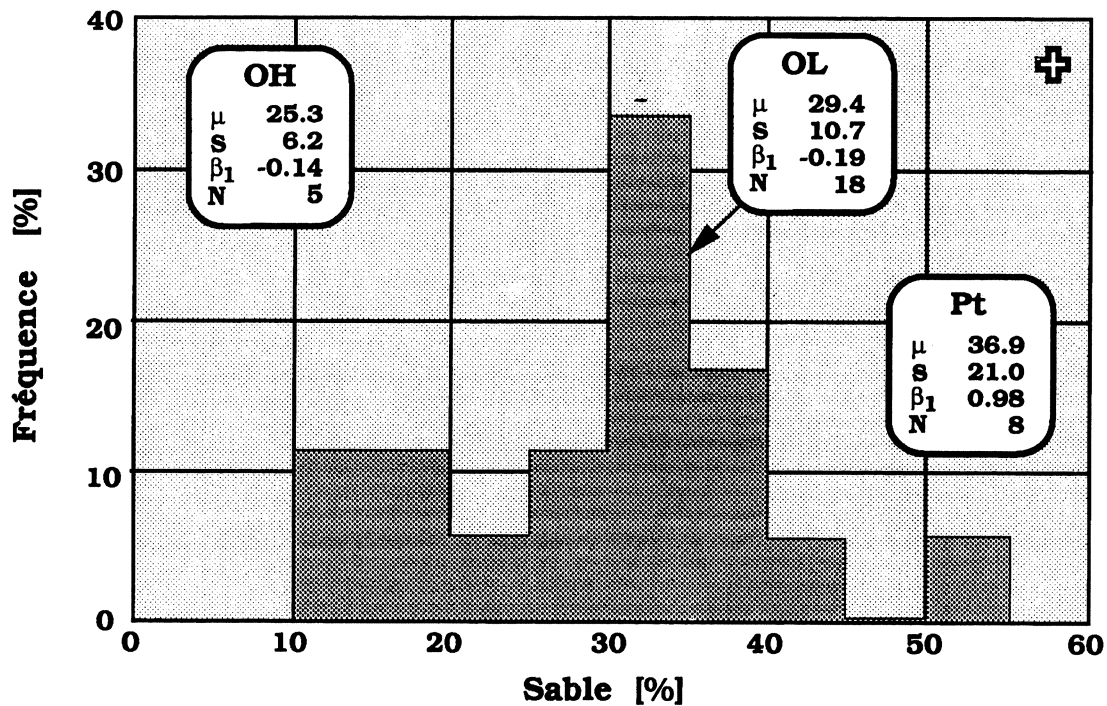


Fig 3.92 Histogramme du pourcentage pondéral du sable des classes USCS : OL, OH, Pt

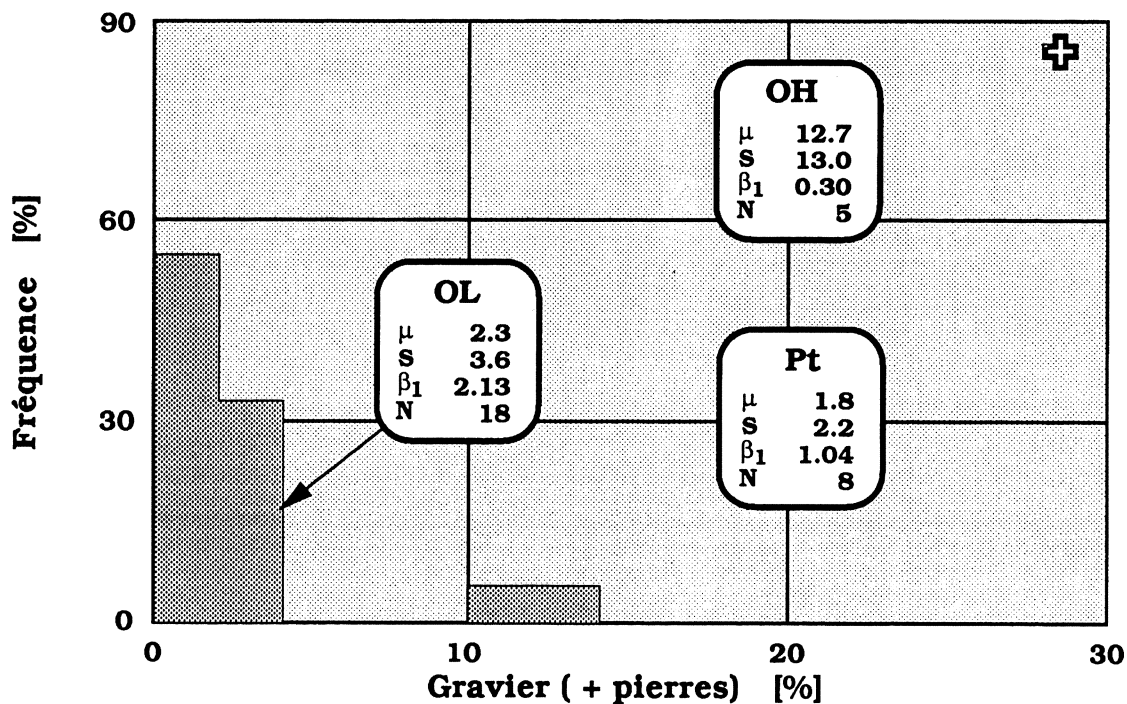
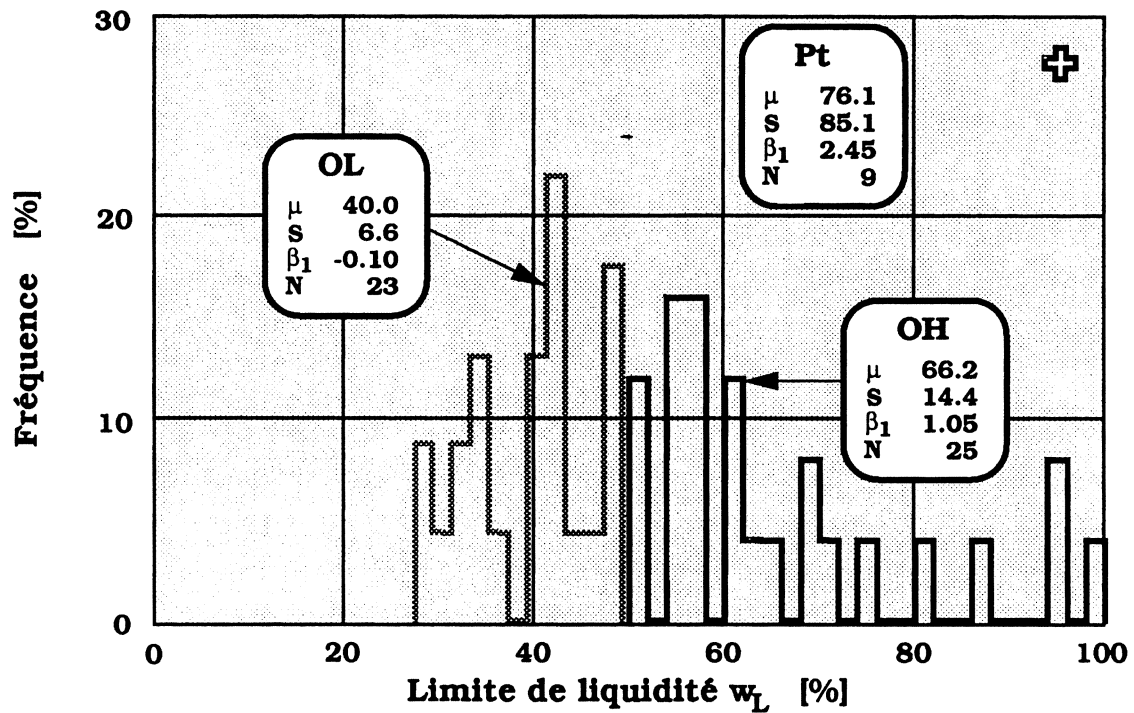
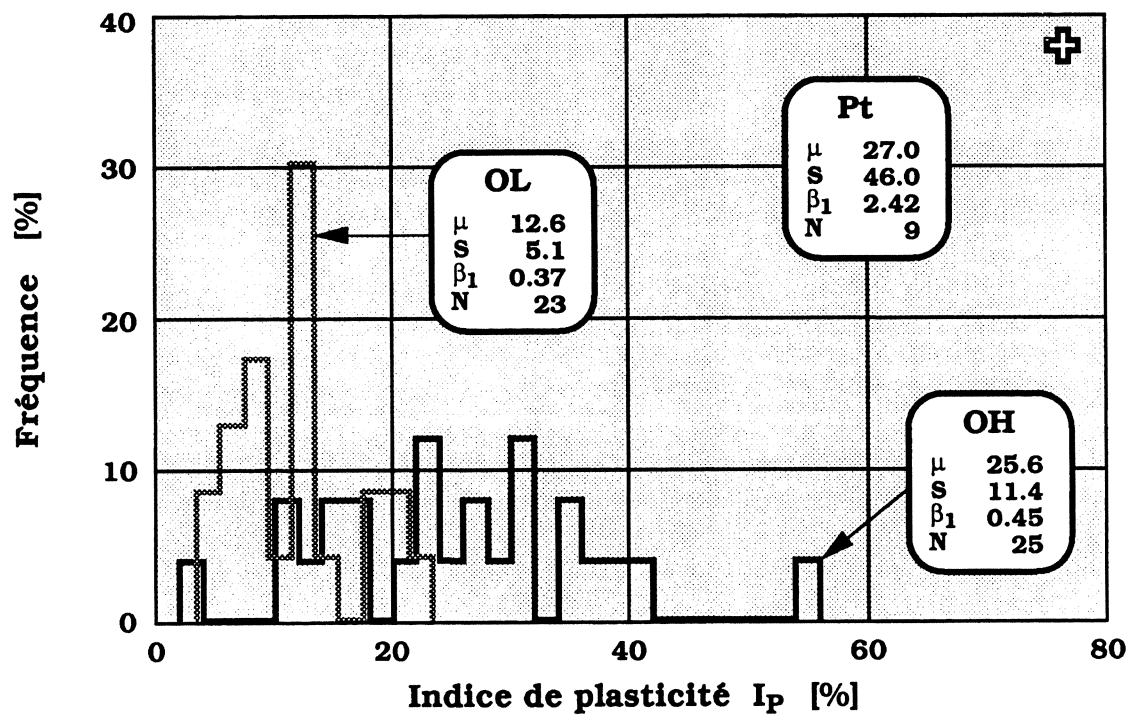


Fig 3.93 Histogramme du pourcentage pondéral du gravier des classes USCS : OL, OH, Pt

Fig 3.94 Histogramme de la limite de liquidité w_L des classes USCS : OL, OH, PtFig 3.95 Histogramme de l'indice de plasticité I_p des classes USCS : OL, OH, Pt

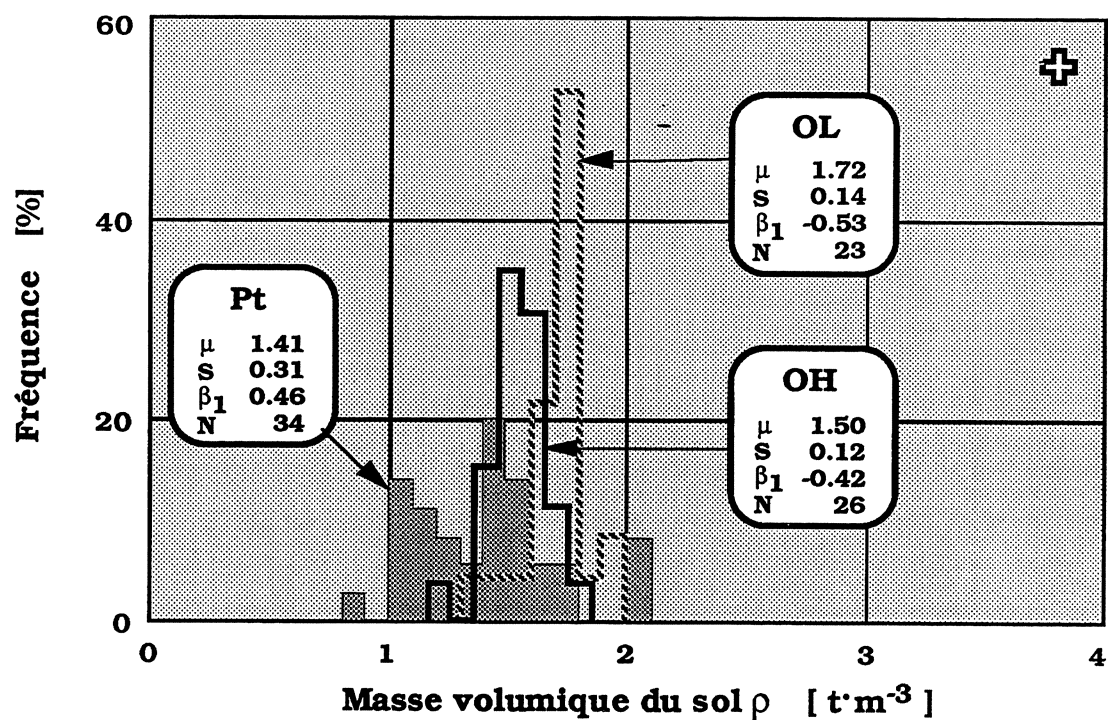


Fig 3.96 Histogramme de la masse volumique du sol ρ des classes USCS : OL, OH, Pt

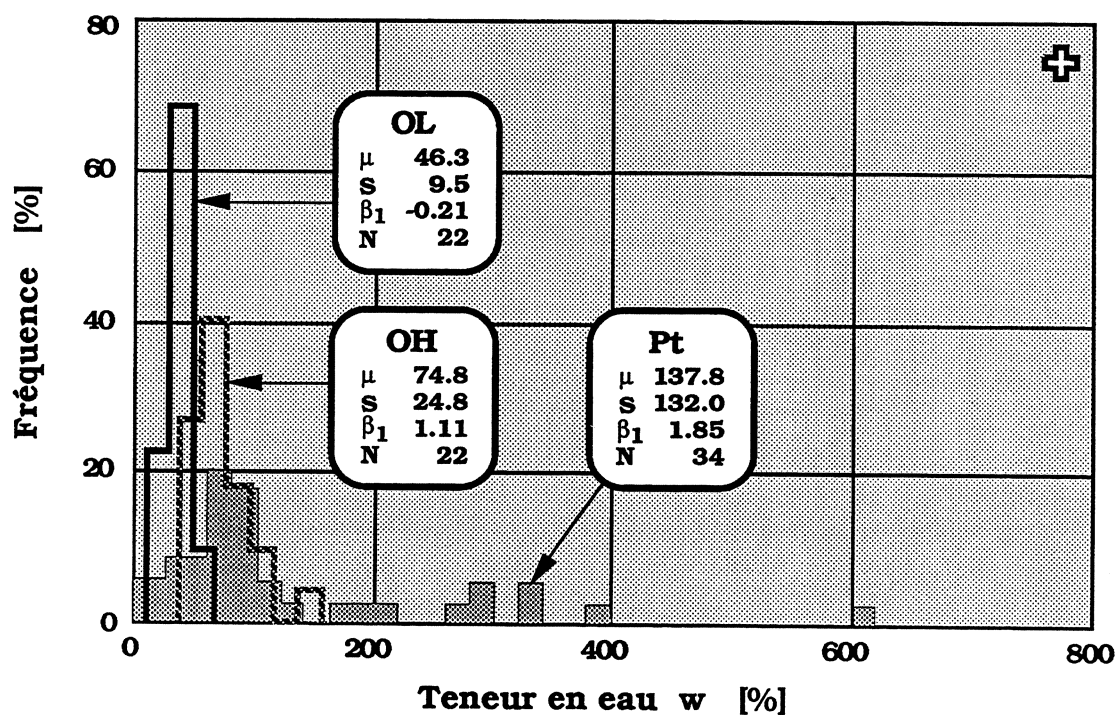


Fig 3.97 Histogramme de la teneur en eau w des classes USCS : OL, OH, Pt

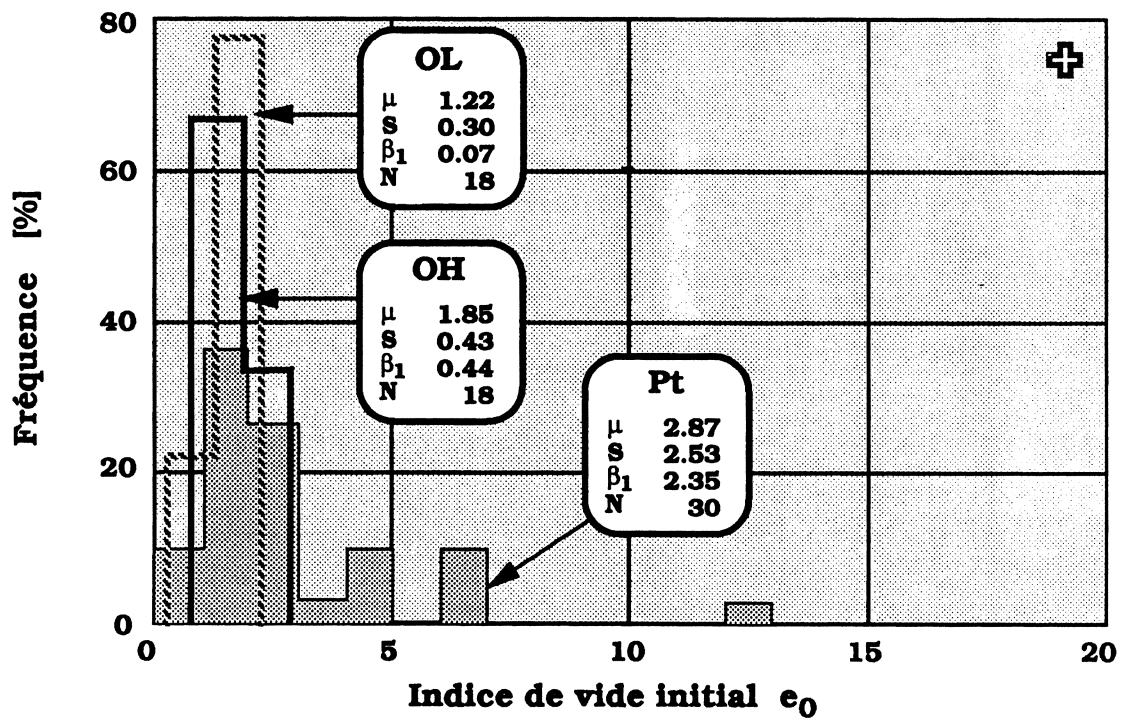


Fig 3.98 Histogramme de l'indice de vide initial e_0 des classes USCS : OL, OH, Pt

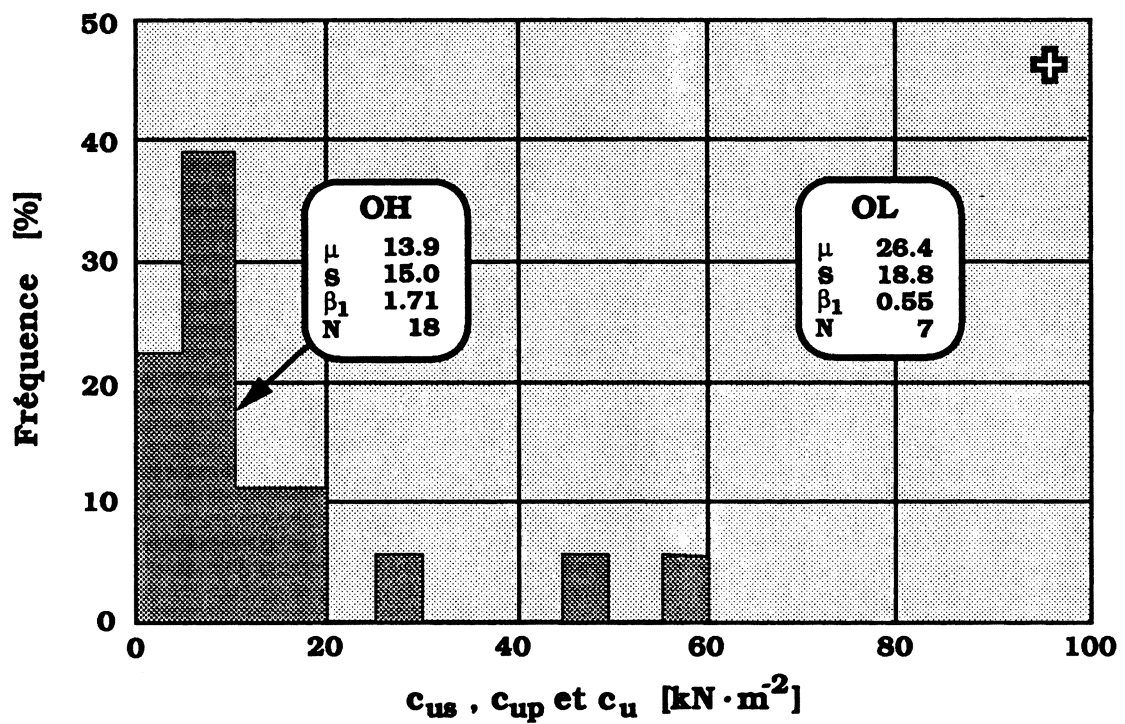
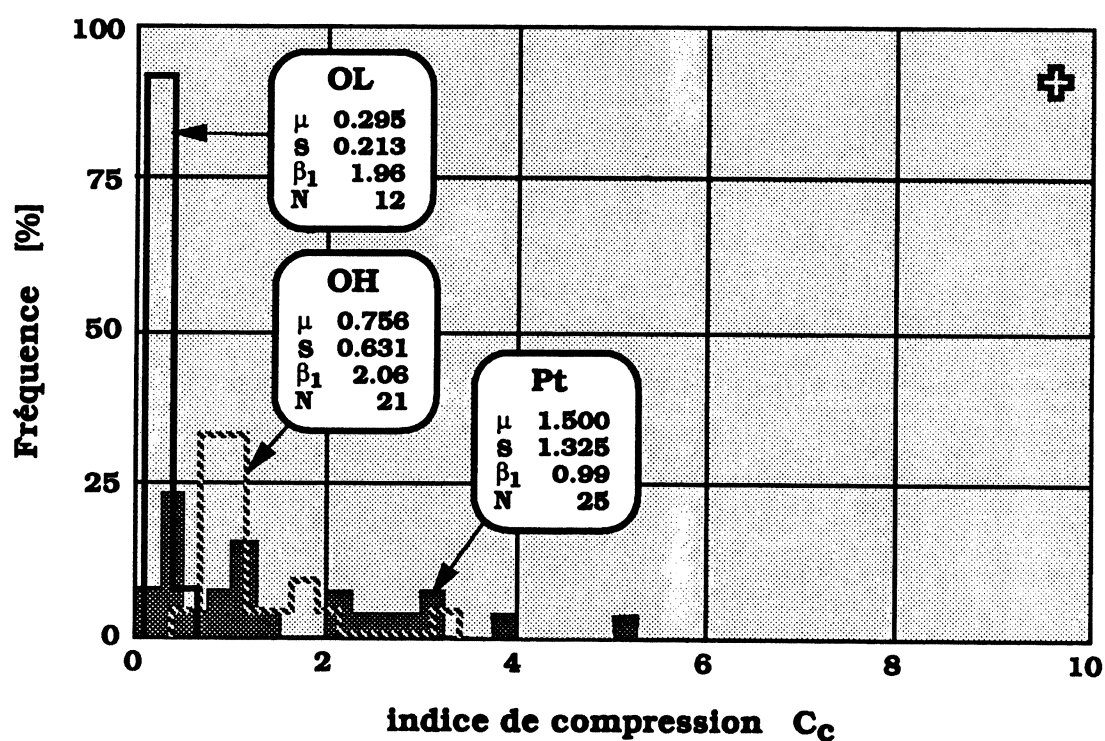
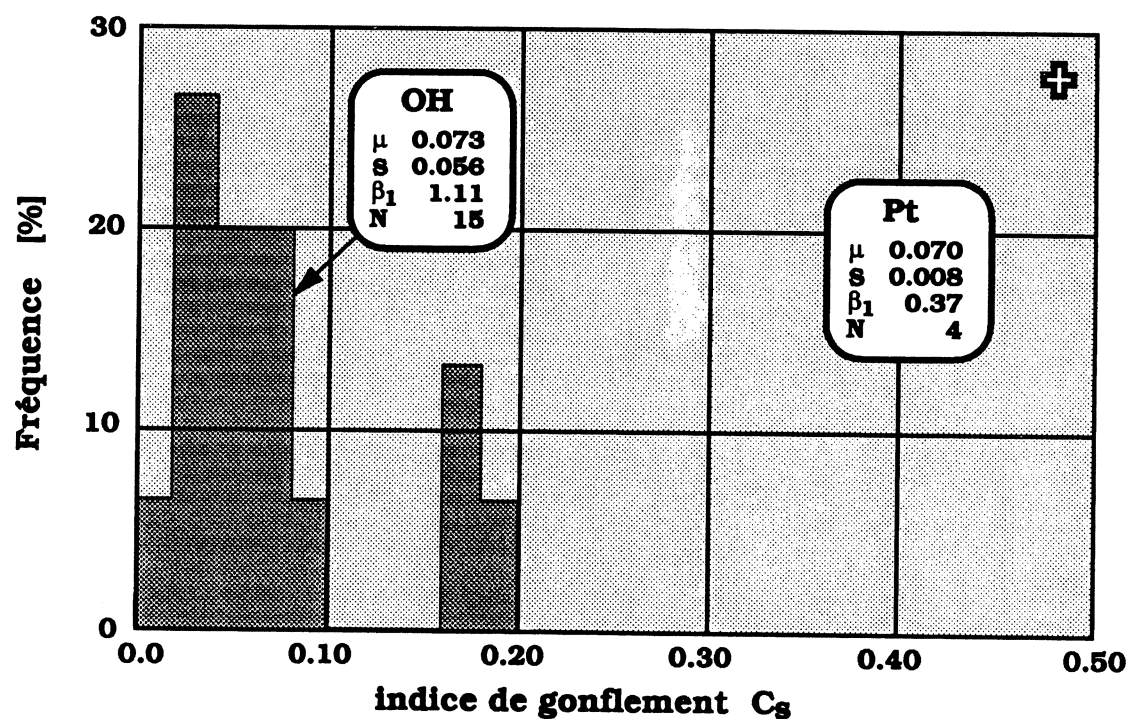


Fig 3.99 Histogramme de toutes les cohésions apparentes c_{up} , c_{us} et c_u des classes USCS : OL, OH

Fig 3.100 Histogramme de l'indice de compression C_c des classes USCS : OL, OH, PtFig 3.101 Histogramme de l'indice de gonflement C_s des classes USCS : OH, Pt

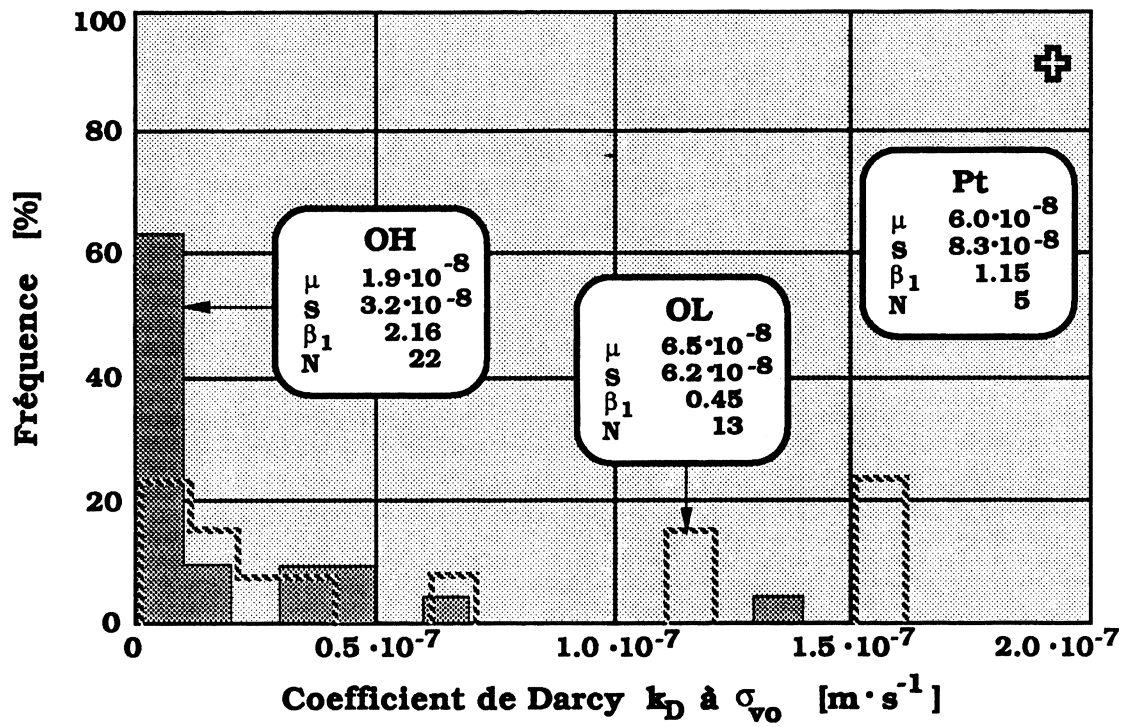


Fig 3.102 Histogramme du coefficient de perméabilité de Darcy k_D de la classe USCS :
OL, OH, Pt

3.3 Tableaux récapitulatifs

Les trois tableaux des pages suivantes (figures 3.103 : groupe des graviers, 3.104 : groupe des sables et 3.105 : groupe des sols fins) sont un résumé condensé des moyennes, écarts types et nombres de valeurs entrant dans la moyenne, de toutes les caractéristiques géotechniques, classées selon l'USCS (SN 670'008), qui ont fait l'objet des histogrammes ci-dessus.

En plus des caractéristiques faisant l'objet des histogrammes nous avons ajouté dans ces tableaux :

- une désignation géotechnique littérale,
- l'angle de frottement résiduel Φ_R dont nous possédions quelques valeurs pour des sols fins
- et le paramètre $(1+e_0)/C_c$ qui est plus directement lié aux modules de déformation du sol que ne le sont les indices de compression et de gonflement; par exemple, le module œdométrique $E_{\text{œd}}$ se détermine par la relation suivante :

$$E_{\text{œd}} = \frac{\Delta\sigma_v}{\text{Log}_{10}\left(\frac{\sigma_{v0} + \Delta\sigma_v}{\sigma_{v0}}\right)} \frac{1 + e_0}{C_c}$$

Certaines des valeurs que l'on pourra trouver dans les tableaux ci-après exigent les commentaires suivant :

- a) Pour les granulométries, la somme des % n'est pas égale à 100 car les moyennes ont été établies, pour chaque fraction du sol : argile, limon, sable et gravier, sur des nombres d'échantillons différents.
- b) Les valeurs de l'angle de frottement effectif Φ' des CH, OL et OH sont très élevées; l'examen détaillé des résultats des essais qui ont déterminé ces valeurs a montré que les échantillons étaient, en général, très sableux ce qui peut expliquer un peu ces fortes valeurs.
- c) L'indice de compression moyen C_c des CL-ML est anormalement faible; l'examen détaillé des résultats des essais qui ont déterminé cette valeur a cependant montré que les échantillons étaient, en général, très sableux ce qui peut expliquer cette faible valeur.

Les trois tableaux récapitulatifs serviront, entre autre, à l'établissement du nouveau tableau de la norme SN 670'010 : coefficients caractéristiques des sols, qui doit être révisée.

USCS	Désignation géotechnique (non conforme à SN 670 010)	Granulométrie				Consistance		Masse			Résistance				Déformation			Perméabilité
		Argile [%]	Limons [%]	Sable [%]	Gravier + pierres [%]	w _L [%]	I _p [%]	ρ [t·m ⁻³]	w [%]	e ₀ [-]	Φ' [°]	c' [kN·m ⁻²]	Φ _R ' [°]	c _u [kN·m ⁻²]	C _c [-]	C _s [-]	$\frac{1+e_0}{C_c}$	
GW	Gravier et gravier sableux propre bien gradué	0.2 ±0.4 (40)	3.0 ±1.1 (40)	21.0 ±6.9 (40)	76.0 ±7.4 (40)				5.4 ±2.5 (36)									
GP	Gravier et gravier sableux propre mal gradué	0.2 ±0.4 (102)	3.0 ±1.0 (102)	23.1 ±10.2 (102)	74.0 ±10.2 (102)			2.39 (3)	5.9 ±2.9 (87)	0.17 (3)	37.8 (1)	0 (1)						
GM	Gravier avec limon	1.0 ±0.1 (707)	8.2 ±2.5 (707)	25.4 ±7.3 (707)	65.4 ±8.1 (707)	19.2 ±5.8 (9)	4.9 ±2.6 (9)	2.36 ±0.10 (30)	6.9 ±3.0 (694)	0.19 ±0.05 (29)				166 ±101 (11)				
GC	Gravier avec argile	2.7 ±1.1 (183)	7.5 ±2.4 (183)	24.7 ±8.4 (183)	65.1 ±8.9 (183)	21.6 ±5.5 (72)	7.9 ±3.4 (72)	2.39 ±0.03 (10)	6.5 ±3.5 (142)	0.18 ±0.04 (9)				171 ±67 (10)				
GM-ML	Gravier limoneux	3.5 ±2.0 (175)	17.1 ±4.7 (175)	26.3 ±6.1 (175)	53.1 ±8.0 (175)	17.3 ±6.8 (7)	3.9 ±2.6 (7)	2.34 ±0.07 (24)	8.9 ±4.0 (169)	0.23 ±0.05 (22)	38.5 (2)	140 (2)		190 ±79 (35)				
GM-GC	Gravier limono-argileux	5.0 ±2.7 (73)	20.5 ±6.4 (73)	27.2 ±5.5 (73)	47.3 ±8.7 (73)	17.7 ±1.9 (73)	5.9 ±0.9 (73)	2.37 ±0.07 (33)	8.4 ±2.8 (66)	0.21 ±0.04 (33)				225 ±52 (25)				
GC-CL	Gravier argileux	8.3 ±4.9 (329)	24.4 ±7.1 (329)	23.4 ±4.7 (329)	43.9 ±9.6 (329)	24.9 ±5.0 (317)	11.0 ±3.0 (317)	2.30 ±0.08 (195)	11.2 ±3.6 (308)	0.29 ±0.08 (190)	31.4 ±3.6 (8)	17.5 ±49.5 (8)		175 ±75 (180)				
GC-CH	Gravier argileux de grande plasticité	6.0 ±1.8 (6)	13.5 ±3.1 (6)	35.2 ±7.0 (6)	45.3 ±4.9 (6)				7.1 (4)									
Légende :		± = écart type				() = nombre de valeurs				c _u = compression simple, pénétromètre de poche et scissomètre								

Fig. 3.103 Tableau récapitulatif des moyennes et de leur variabilité - groupe des graviers.

USCS	Désignation géotechnique (non conforme à SN 670 010)	Granulométrie				Consistance		Masse			Résistance					Déformation			Perméabilité k_D [m·s ⁻¹]
		Argile [%]	Limon [%]	Sable [%]	Gravier + pierres [%]	w _L [%]	I _p [%]	ρ [t·m ⁻³]	w [%]	e ₀ [-]	Φ' [°]	c' [kN·m ⁻²]	Φ _R ' [°]	c _u [kN·m ⁻²]	C _c [-]	C _s [-]	$\frac{1+e_0}{C_c}$		
SW	Sable et sable graveleux propre bien gradué																		
SP	Sable et sable graveleux propre mal gradué	0.1 ±0.3 (22)	2.2 ±1.9 (22)	75.8 ±18.9 (20)	22.3 ±19.1 (20)			1.94 ±0.06 (5)	13.2 ±8.1 (19)	0.68 (4)	31 (1)	0 (1)				0.074 (3)		21.0 (3)	
SM	Sable avec limon	0.9 ±2.0 (144)	9.4 ±4.6 (144)	70.7 ±17.8 (136)	19.1 ±17.7 (136)	26.6 ±13.7 (10)	5.3 ±4.7 (10)	2.03 ±0.18 (31)	10.8 ±9.3 (143)	0.60 ±0.25 (25)	34.4 ±5.0 (7)	0.0 (6)		45 ±30 (12)	0.096 ±0.044 (12)		21.1 ±14.1 (12)		
SC	Sable avec argile	3.2 ±1.8 (32)	8.2 ±2.9 (32)	59.0 ±14.6 (32)	29.6 ±14.9 (32)	25.0 (3)	8.0 (3)	2.01 (3)	12.6 ±7.3 (22)	0.72 (3)				28 (2)					
SM-ML	Sable limoneux	3.4 ±2.6 (350)	28.7 ±9.6 (350)	59.9 ±15.2 (318)	8.3 ±14.2 (318)	24.1 ±9.5 (49)	5.1 ±4.0 (49)	2.07 ±0.17 (171)	18.8 ±10.8 (341)	0.61 ±0.35 (160)	33.6 ±1.5 (5)	22.0 ±3.5 (5)		76 ±73 (175)	0.108 ±0.100 (58)	0.011 ±0.007 (34)	27.0 ±18.4 (58)	9.6·10 ⁻⁷ ±2.1·10 ⁻⁶ (42)	
SM-SC	Sable limono-argileux	5.7 ±3.4 (94)	27.5 ±7.5 (94)	45.5 ±11.8 (90)	21.7 ±14.1 (90)	18.6 ±2.9 (94)	5.5 ±0.9 (94)	2.23 ±0.18 (67)	13.7 ±9.3 (86)	0.35 ±0.22 (62)	35.3 ±4.7 (6)	5.8 ±6.7 (6)		154 ±91 (49)	0.177 ±0.311 (16)	0.026 ±0.043 (13)	21.1 ±14.1 (16)	3.8·10 ⁻⁷ ±4.6·10 ⁻⁷ (21)	
SC-CL	Sable argileux	7.6 ±4.3 (273)	32.9 ±6.4 (273)	35.8 ±9.8 (261)	23.9 ±10.2 (261)	25.4 ±4.8 (258)	11.0 ±3.3 (258)	2.23 ±0.15 (213)	14.0 ±6.5 (270)	0.37 ±0.18 (199)	33.1 ±4.7 (9)	9.1 ±14.3 (7)		156 ±80 (194)	0.165 ±0.079 (19)	0.017 ±0.018 (8)	11.6 ±6.7 (19)	3.5·10 ⁻⁷ ±4.5·10 ⁻⁷ (19)	
SC-CH	Sable argileux de grande plasticité	6.0 ±2.5 (32)	19.9 ±8.8 (32)	64.0 ±11.5 (24)	12.2 ±11.2 (24)	75.5 (3)	49.8 (3)	1.99 ±0.27 (12)	21.6 ±14.9 (22)	0.62 ±0.42 (6)	38.1 ±2.7 (5)	0 (5)		22 (3)	0.252 (2)	0.038 (2)	18.7 (2)	2.0·10 ⁻⁸ (1)	
Légende :		± = écart type				() = nombre de valeurs				c _u = compression simple, pénétromètre de poche et scissomètre									

Fig. 3.104 Tableau récapitulatif des moyennes et de leur variabilité - groupe des sables.

USCS	Désignation géotechnique (non conforme à SN 670 010)	Granulométrie				Consistance		Masse			Résistance					Déformation			Perméa- bilité
		Argile [%]	Limon [%]	Sable [%]	Gravier +pierres [%]	w _L [%]	I _p [%]	ρ [t·m ⁻³]	w [%]	e ₀ [-]	Φ' [°]	c' [kN·m ⁻²]	Φ _R ' [°]	c _u [kN·m ⁻²]	C _c [-]	C _s [-]	1 + e ₀ / C _c		
ML	Limon raide graveleux ou sableux	7.7 ±6.0 (319)	60.0 ±11.0 (319)	31.2 ±12.6 (319)	1.0 ±3.8 (319)	30.2 ±11.4 (127)	7.6 ±5.3 (127)	1.99 ±0.20 (256)	28.9 ±19.7 (325)	0.77 ±0.51 (233)	33.9 ±7.3 (25)	6.5 ±11.2 (24)		65 ±60 (246)	0.199 ±0.275 (96)	0.013 ±0.011 (42)	19.0 ±14.0 (96)	1.6·10 ⁻⁷ ±3.2·10 ⁻⁷ (56)	
CL-ML	Argile limoneuse gravel., sableuse et/ou limoneuse	10.2 ±5.7 (193)	61.3 ±11.4 (193)	26.6 ±10.8 (193)	2.0 ±4.4 (193)	21.0 ±2.3 (243)	5.8 ±0.8 (243)	2.11 ±0.11 (222)	19.6 ±5.3 (241)	0.55 ±0.15 (204)	32.7 ±4.8 (11)	0.4 ±1.3 (9)		88 ±75 (233)	0.094 ±0.062 (72)	0.011 ±0.008 (26)	21.9 ±13.4 (72)	8.8·10 ⁻⁸ ±3.1·10 ⁻⁷ (34)	
CL	Argile maigre gravel., sableuse et/ou limoneuse	21.7 ±11.0 (1920)	59.0 ±11.6 (1920)	16.0 ±9.9 (1535)	5.6 ±8.1 (1535)	31.9 ±6.6 (2692)	14.8 ±4.8 (2692)	2.07 ±0.12 (2567)	23.1 ±7.2 (2729)	0.65 ±0.19 (2318)	27.1 ±5.2 (189)	6.2 ±11.3 (180)	24.8 ±7.3 (23)	82 ±67 (3028)	0.152 ±0.093 (711)	0.026 ±0.016 (229)	14.6 ±12.2 (711)	2.9·10 ⁻⁸ ±1.3·10 ⁻⁷ (286)	
CH	Argile grasse gravel., sableuse et/ou limoneuse	22.8 ±12.9 (108)	59.5 ±11.6 (108)	21.8 ±14.3 (25)	7.3 ±9.5 (25)	59.4 ±10.8 (93)	37.5 ±9.0 (93)	1.90 ±0.22 (113)	34.7 ±15.7 (111)	1.04 ±0.41 (67)	31.6 ±4.4 (15)	3.1 ±6.1 (14)	18.4 ±6.3 (9)	72 ±55 (76)	0.343 ±0.211 (47)	0.050 ±0.030 (43)	7.1 ±4.9 (47)	3.0·10 ⁻⁸ ±9.9·10 ⁻⁸ (44)	
MH	Limon élastique graveleux ou sableux	11.2 ±8.2 (62)	61.8 ±11.2 (62)	26.8 ±13.3 (38)	2.0 ±3.1 (38)	61.5 ±13.1 (63)	23.2 ±7.5 (63)	1.62 ±0.13 (47)	64.8 ±24.7 (61)	1.62 ±0.48 (31)	34.3 ±4.3 (11)	7.7 ±11.3 (12)	19.9 ±0.1 (2)	28 ±25 (46)	0.568 ±0.252 (28)	0.047 ±0.045 (16)	4.7 ±1.9 (28)	1.8·10 ⁻⁸ ±3.9·10 ⁻⁸ (24)	
OL	Limon organique graveleux ou sableux	6.8 ±6.0 (25)	64.2 ±10.8 (25)	29.4 ±10.7 (18)	2.3 ±3.6 (18)	40.0 ±6.6 (23)	12.6 ±5.1 (23)	1.72 ±0.14 (23)	46.3 ±9.5 (22)	1.22 ±0.30 (18)	32.8 ±2.2 (4)	2.5 ±5.0 (4)		26 ±19 (7)	0.295 ±0.213 (12)		10.3 ±5.9 (12)	6.5·10 ⁻⁸ ±6.2·10 ⁻⁸ (13)	
OH	Argile organique graveleuse ou Sableuse	8.8 ±5.8 (26)	64.2 ±16.0 (26)	25.3 ±6.2 (5)	12.7 ±13.0 (5)	66.2 ±14.4 (25)	25.6 ±11.4 (25)	1.50 ±0.12 (26)	74.8 ±24.8 (22)	1.85 ±0.43 (18)	36.0 (1)	0.0 (1)		14 ±15 (18)	0.756 ±0.631 (21)	0.073 ±0.056 (15)	5.9 ±8.2 (21)	1.9·10 ⁻⁸ ±3.2·10 ⁻⁸ (22)	
Pt	Tourbe	10.6 ±4.9 (10)	60.5 ±22.4 (10)	36.9 ±21.0 (8)	1.8 ±2.2 (8)	176.1 ±85.1 (9)	27.0 ±46.0 (9)	1.41 ±0.31 (34)	137.8 ±132.0 (34)	2.87 ±2.53 (30)	20.0 (1)	10.0 (1)		13 (3)	1.500 ±1.325 (25)	0.070 (4)	4.5 ±4.7 (24)	6.0·10 ⁻⁸ ±8.3·10 ⁻⁸ (5)	
Légende :		± = écart type				() = nombre de valeurs				c _u = compression simple, pénétromètre de poche et scissomètre									

Fig. 3.105 Tableau récapitulatif des moyennes et de leur variabilité - groupe des sols fins.

4. Corrélations

4.1 Introduction

La disposition d'en moyenne 20 caractéristiques des sols par échantillon sur une population de quelque 6000 échantillons de sols provenant de toute la Suisse permet d'établir de nombreuses corrélations, toutes d'un grand intérêt.

Ces corrélations sont établies certes sur un très grand nombre de valeurs, mais ces dernières proviennent de nombreux laboratoires de géotechnique et les procédures utilisées pour les obtenir peuvent être différentes d'un laboratoire à l'autre. Elles n'ont donc pas la précision des corrélations de valeurs tirées d'essais réalisés dans un même laboratoire dans le cadre, par exemple, d'une thèse. Le grand intérêt de ces corrélations provient avant tout du très grand nombre — exceptionnel en géotechnique — de couples de valeurs qu'elles intègrent.

La plupart de ces corrélations sont des corrélations standards de la mécanique des sols. Sur chaque graphique, la croix (suisse) indique que les couples de valeurs, représentés par un symbole graphique, proviennent de l'ensemble de la Suisse.

4.2 Diagramme de plasticité

Le diagramme de plasticité est la corrélation la plus utilisée en géotechnique. Il corrèle la limite de liquidité avec l'indice de plasticité. Ce diagramme est une des bases de l'USCS.

La figure 4.1 montre cette corrélation pour les classes USCS : CL, CH, ML et MH. Une droite de régression, dénommée parfois "ligne U" est donnée pour les CL et les CH. Le diagramme de plasticité de la figure 4.2 concerne les CL-ML, OL et OH

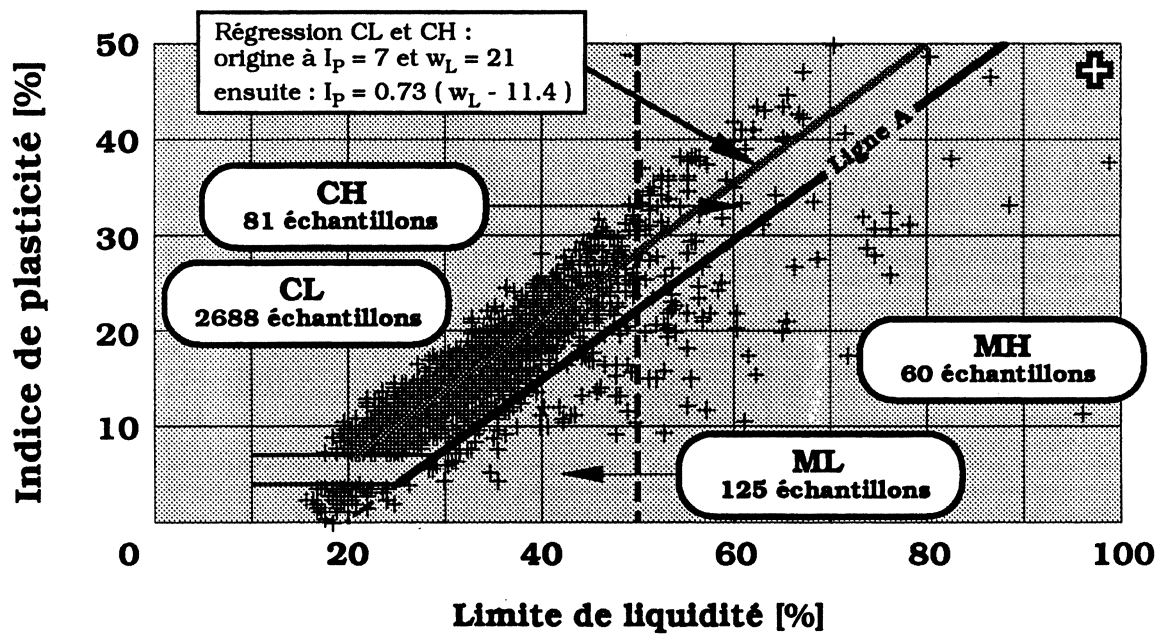


Fig. 4.1 Diagramme de plasticité pour les classes USCS : CL, CH, ML et MH

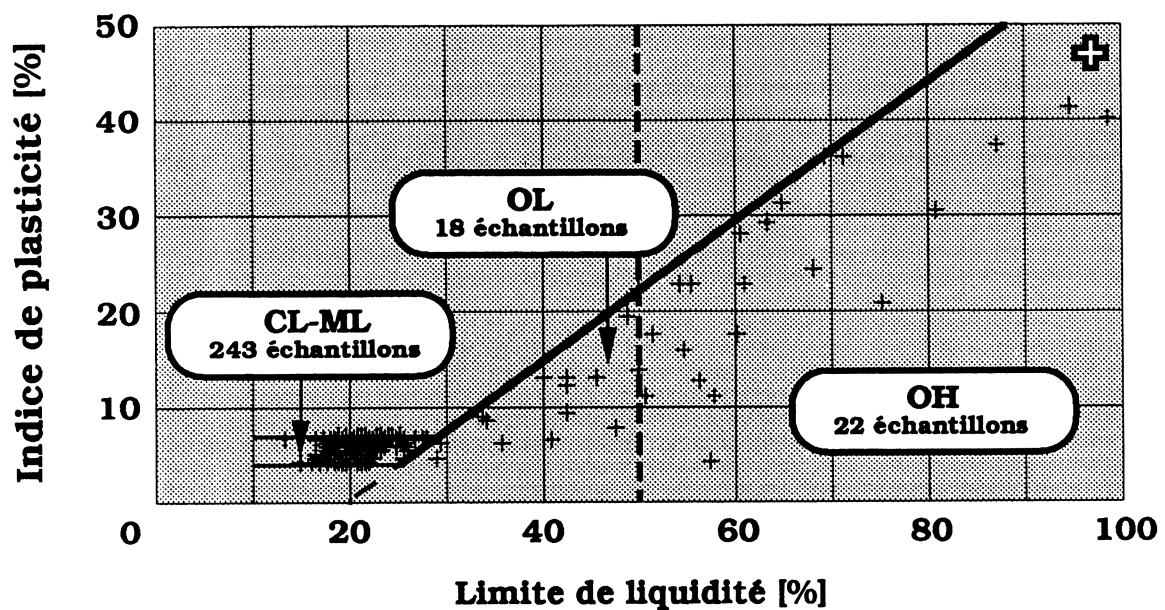


Fig. 4.2 Diagramme de plasticité pour les classes USCS : CL-ML, OL et OH

4.3 Résistance

Diverses corrélations ont été établies pour les paramètres caractérisant la résistance d'un sol. Sur chaque graphique correspondant à une corrélation, des droites de régression sont dessinées, pour chaque classe USCS et pour l'ensemble des classes, lorsque, sauf exception, la valeur absolue du coefficient de corrélation r est plus grand que 0.5.

Sur certaines de ces corrélations, nous avons superposé des corrélations que l'on peut trouver dans la littérature. Les corrélations établies sont :

- La corrélation entre l'angle de frottement effectif Φ' et l'indice de plasticité I_p (fig. 4.3). La corrélation de Gibson [3] correspond mieux aux sols suisses que celle de Terzaghi et Peck [4] ou du NAVDOCKS [5].
- La corrélation entre l'angle de frottement effectif Φ' et le pourcentage d'argile (fig. 4.4).
- La corrélation entre la cohésion apparente obtenue par le pénétromètre de poche c_{up} et l'indice de liquidité I_L ($I_L = (w - w_p)/I_p$) (fig. 4.5).
- La corrélation entre la cohésion apparente obtenue par un essai de compression simple c_u et l'indice de liquidité I_L (fig. 4.6). La corrélation de Skempton et Northey [6] convient pas trop mal aux sols suisses.
- La corrélation entre la cohésion apparente obtenue par le pénétromètre de poche c_{up} et l'indice de consistance I_C ($I_C = (w_L - w)/I_p$) (fig. 4.7).
- La corrélation entre la cohésion apparente obtenue par un essai de compression simple c_u et l'indice de consistance I_C (fig. 4.8).
- La corrélation entre la cohésion apparente obtenue par le pénétromètre de poche c_{up} et la contrainte verticale initiale en place σ_{v0}' (fig. 4.9).
- La corrélation entre la cohésion apparente obtenue par un scissomètre c_{us} et la contrainte verticale initiale en place σ_{v0}' (fig. 4.10).
- La corrélation entre la cohésion apparente obtenue par un essai de compression simple c_u et la contrainte verticale initiale en place σ_{v0}' (fig. 4.11).
- La corrélation entre la cohésion apparente obtenue par un essai de compression simple c_u et celle obtenue par le pénétromètre de poche c_{up} (fig. 4.12).
- La corrélation entre la cohésion apparente obtenue par un essai de compression simple c_u et celle obtenue par le scissomètre c_{us} (fig. 4.13) qui ne comprend que peu de valeurs.

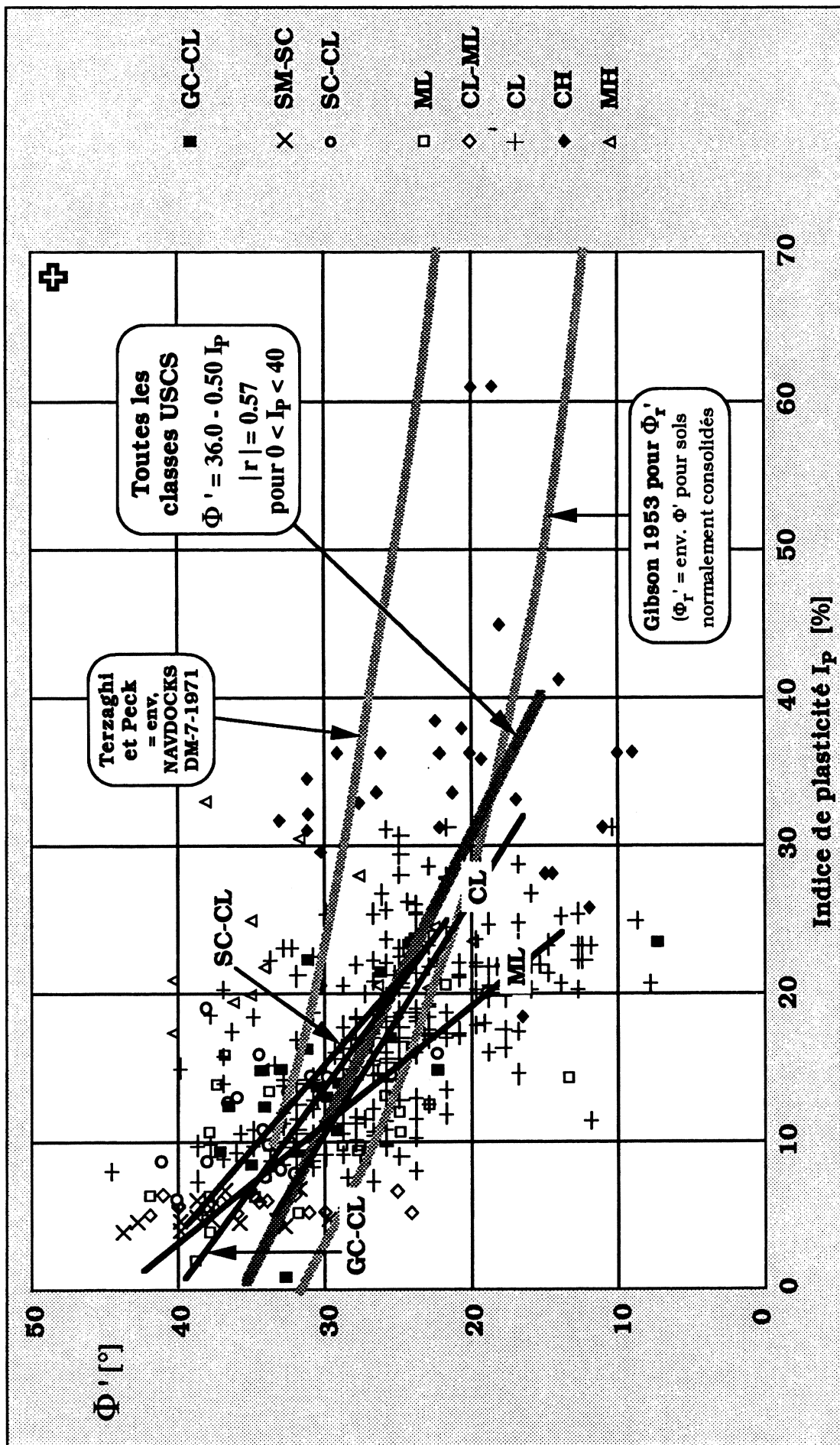


Fig. 4.3 Corrélation entre l'angle de frottement effectif Φ' et l'indice de plasticité I_p .
 Les droites sont des droites de régression exactes avec des coefficients de corrélation $r > 0.5$.

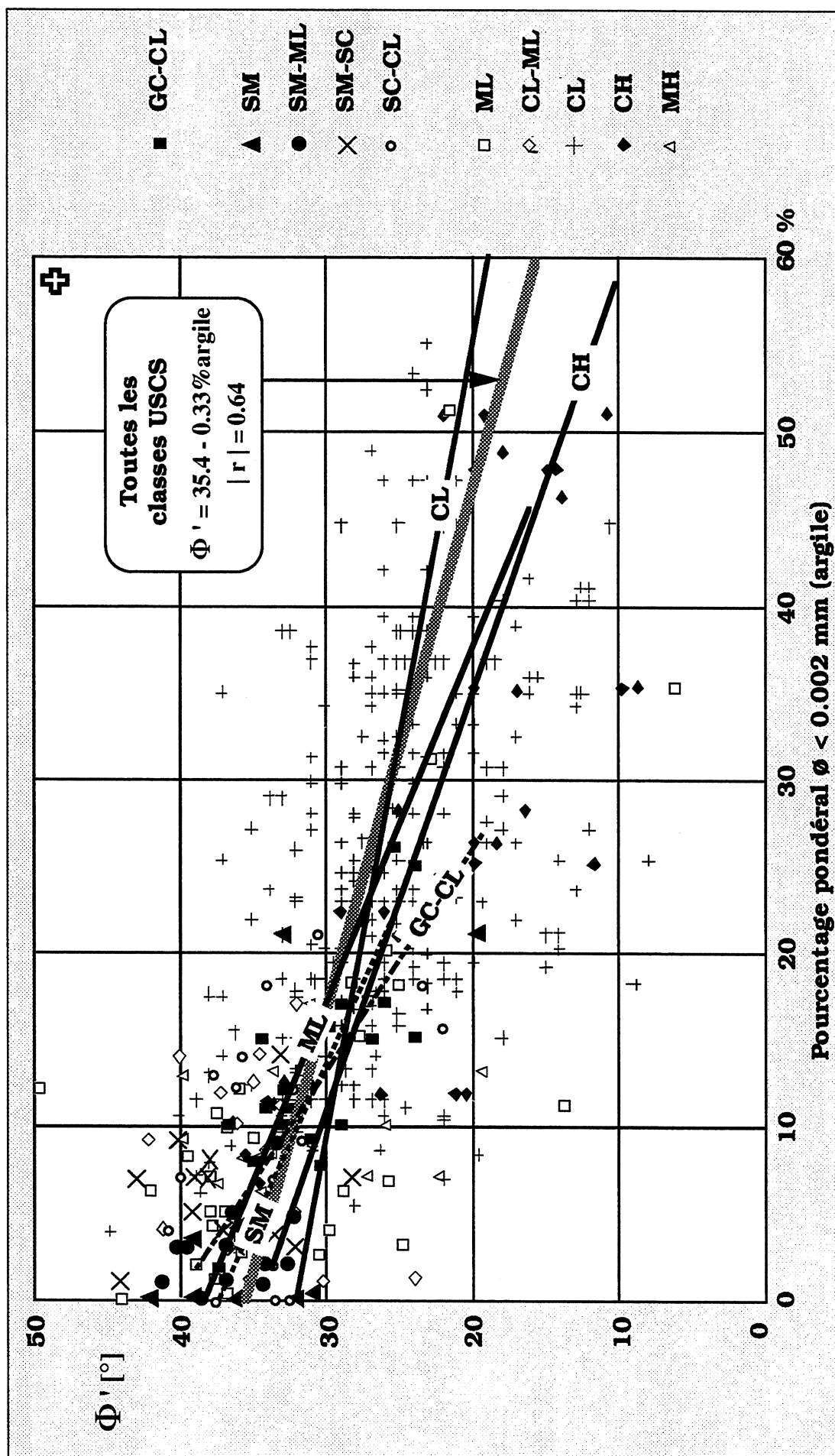


Fig. 4.4 Corrélation entre l'angle de frottement effectif Φ' et le pourcentage pondéral des grains < 0.002 mm (argile).
Les droites sont des droites de régression exactes avec des coefficients de corrélation $r > 0.5$.

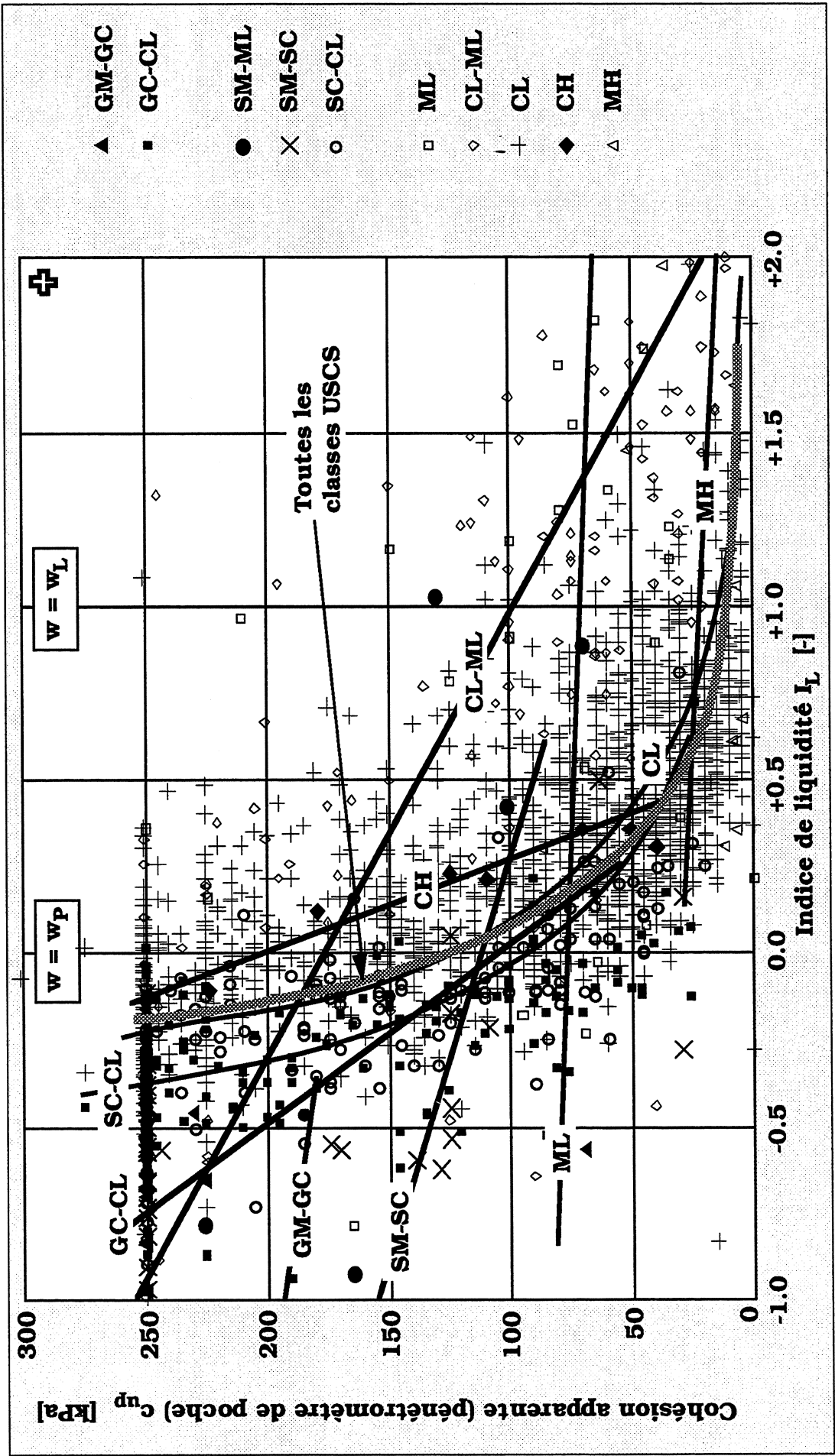


Fig. 4.5 Corrélation entre la cohésion apparente obtenue au pénétromètre de poche c_{up} et l'indice de liquidité I_L . Les droites sont des droites de régression exactes alors que les courbes sont des approximations. Les valeurs à 250 kPa (les valeurs limites du pénétromètre de poche) ne sont pas prises en compte dans les régressions.

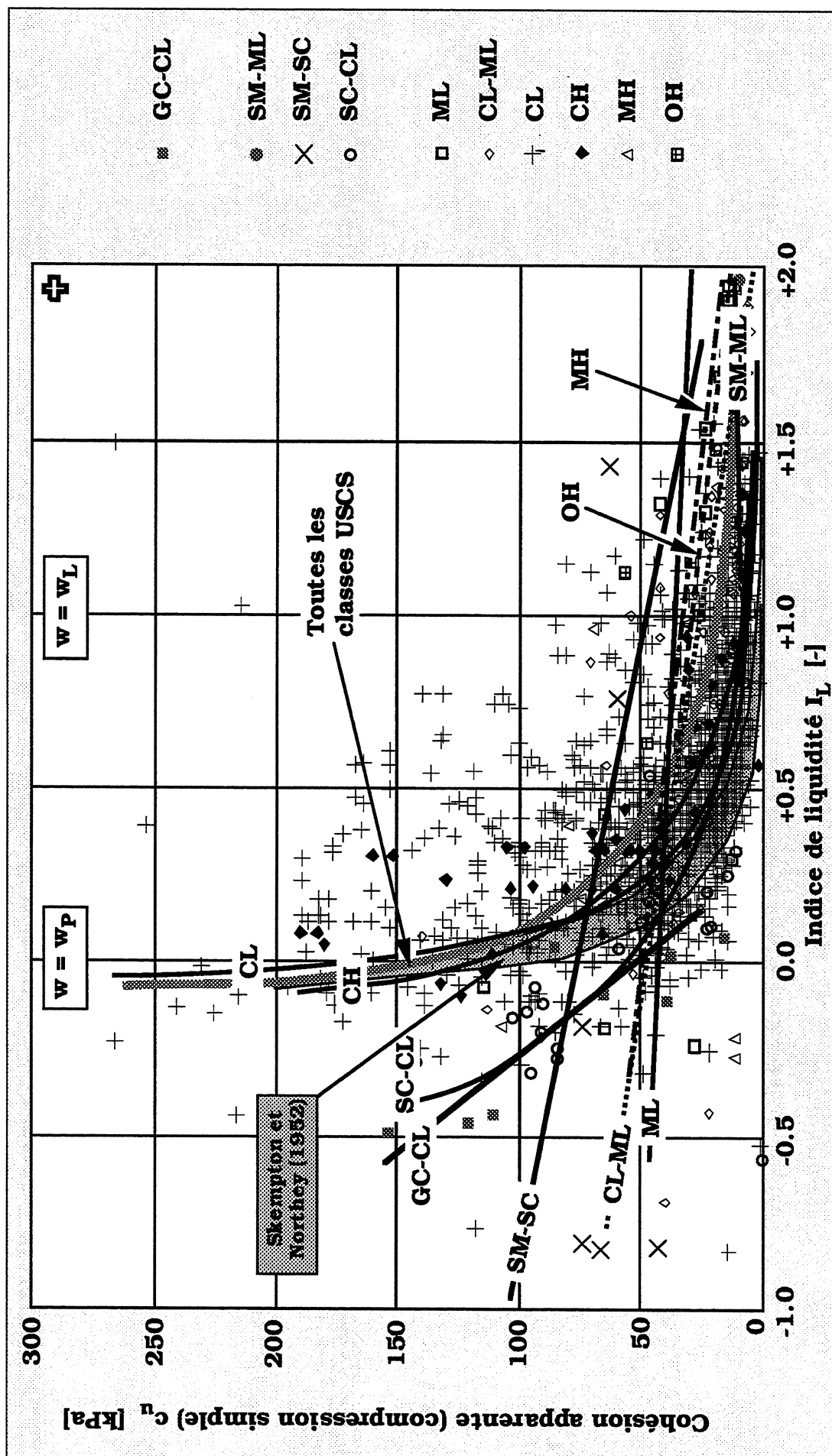


Fig. 4.6 Corrélation entre la cohésion apparente obtenue par compression simple c_u et l'indice de liquidité I_L .
Les droites sont des droites de régression exactes alors que les courbes sont des approximations.

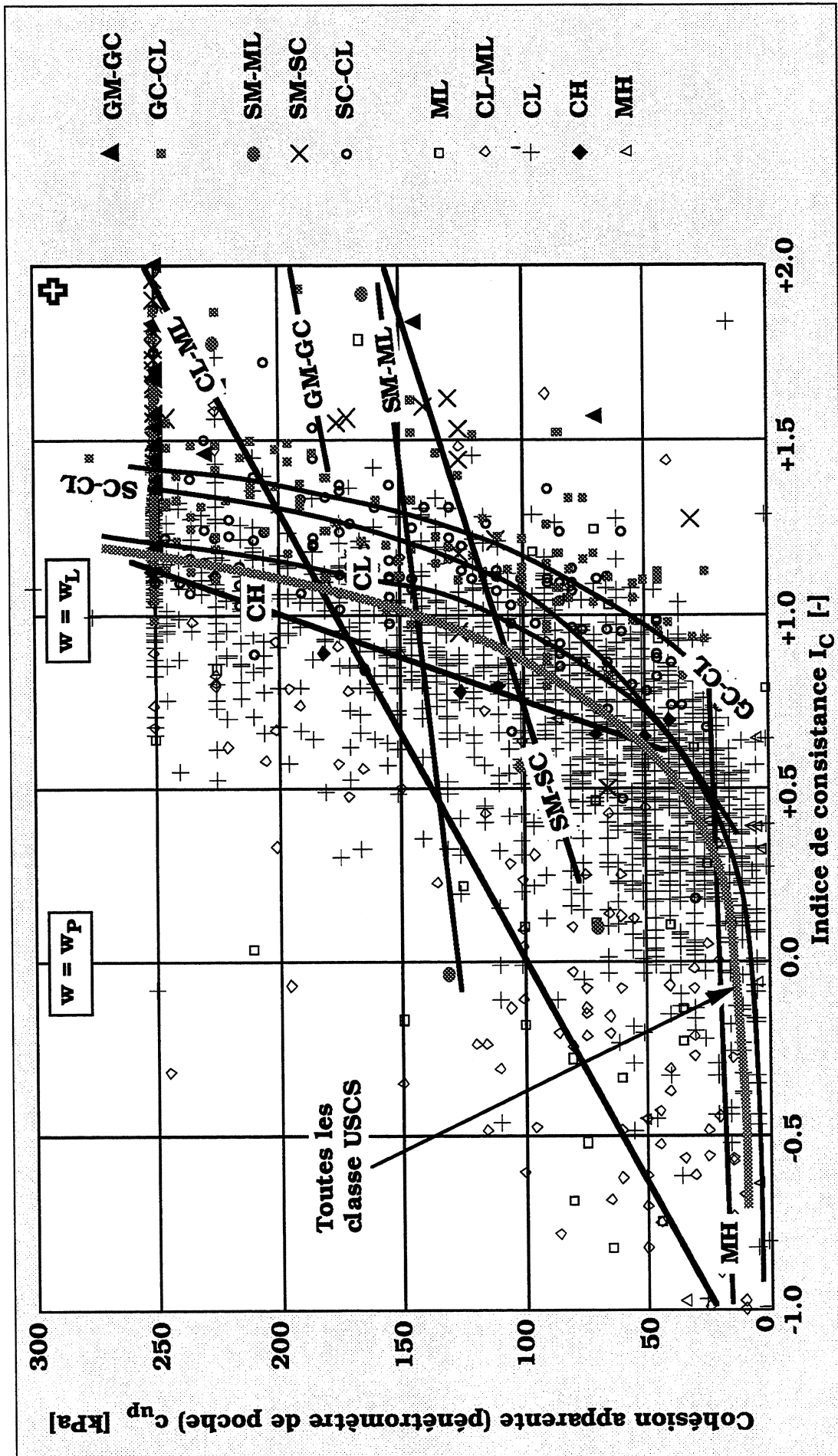


Fig. 4.7 Corrélation entre la cohésion apparente obtenue au pénétromètre de poche c_{up} et l'indice de consistance I_C . Les droites sont des droites de régression exactes alors que les courbes sont des approximations. Les valeurs à 250 kPa (les valeurs limites du pénétromètre de poche) ne sont pas prises en compte dans les régressions.

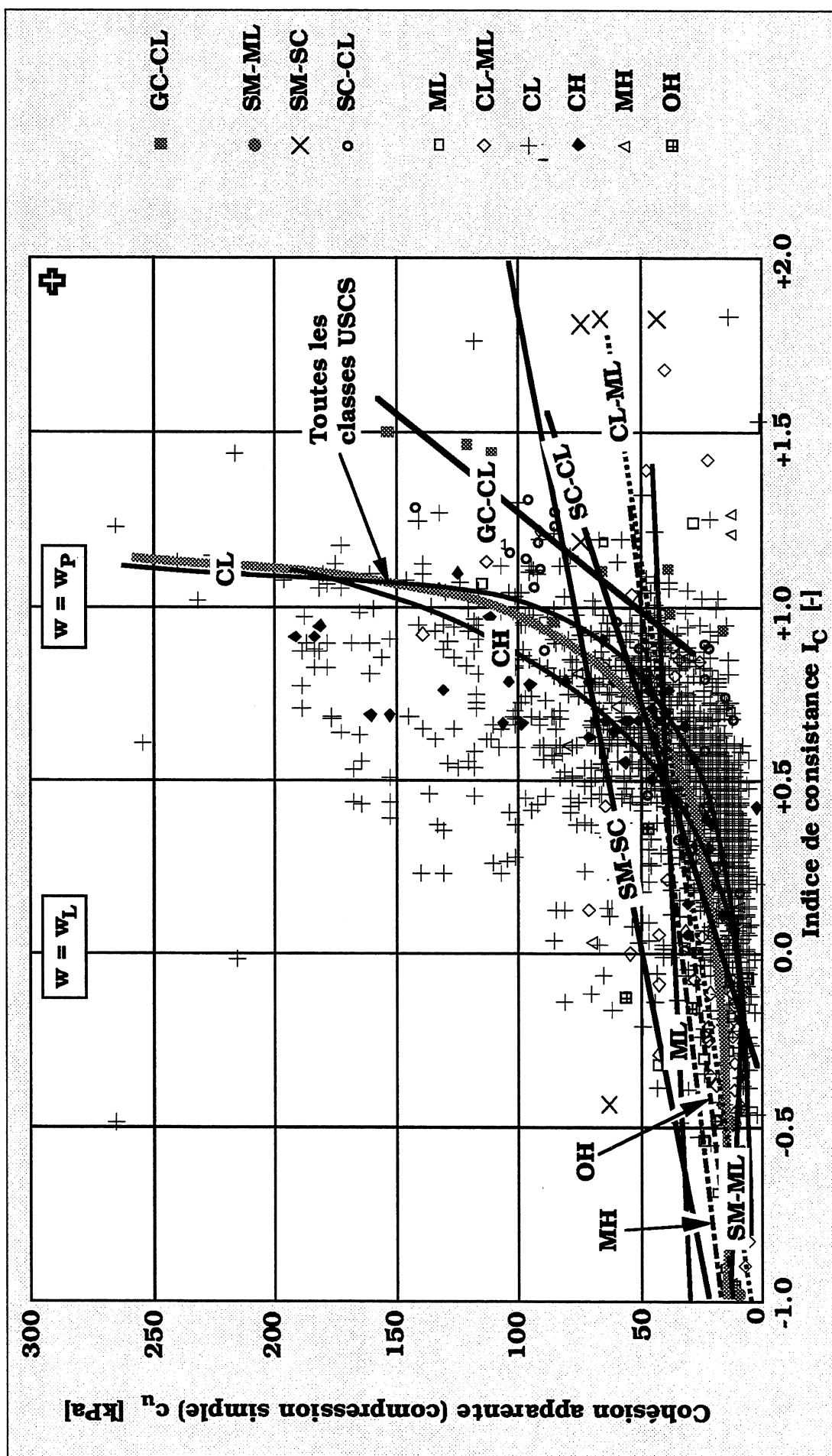


Fig. 4.8 Corrélation entre la cohésion apparente obtenue par compression simple c_u et l'indice de consistance I_c .
Les droites sont des droites de régression exactes alors que les courbes sont des approximations.

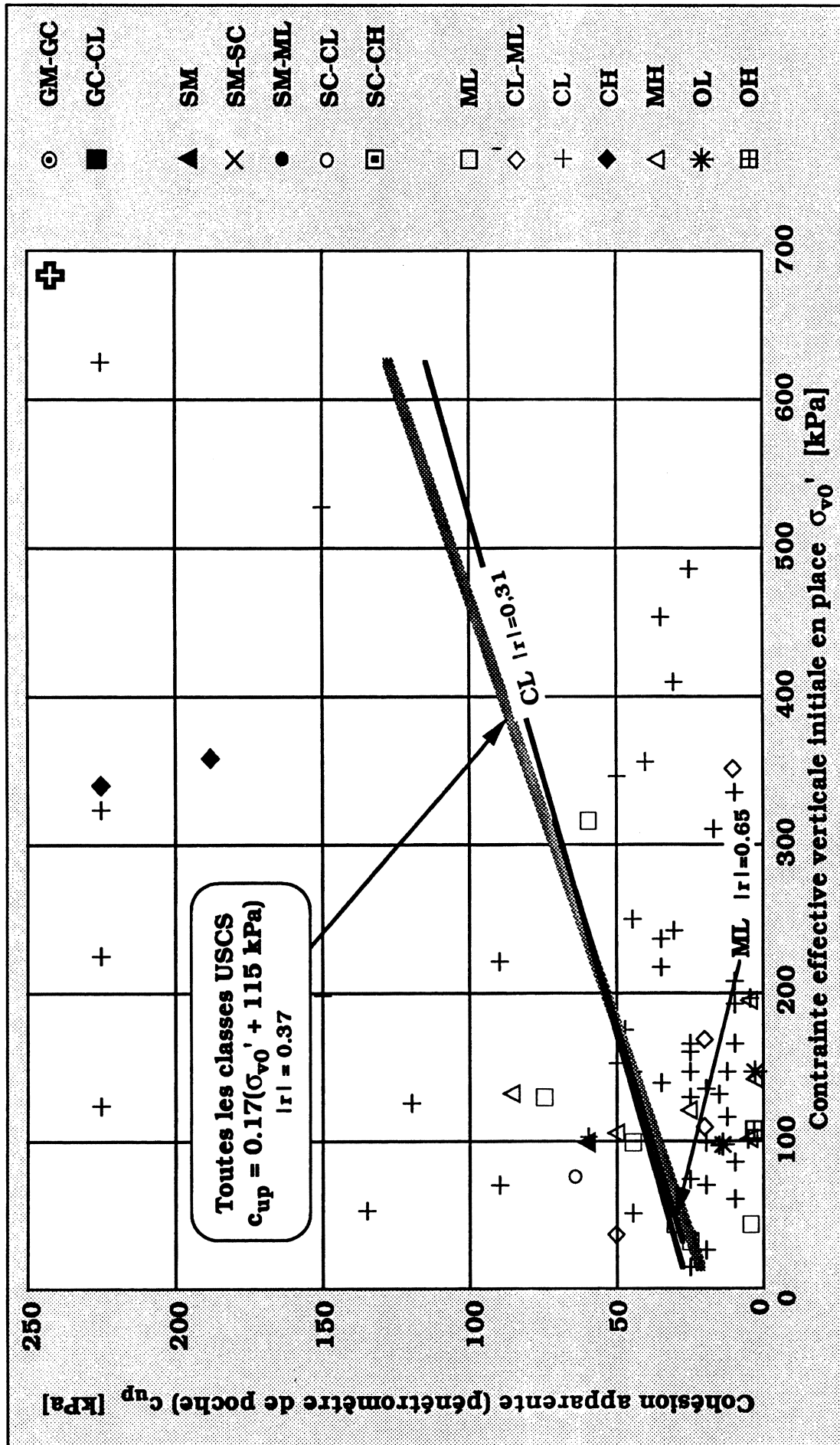


Fig. 4.9 Corrélation entre la cohésion apparente obtenue au pénétromètre de poche c_{up} et la contrainte effective verticale initiale en place σ_{v0}' .

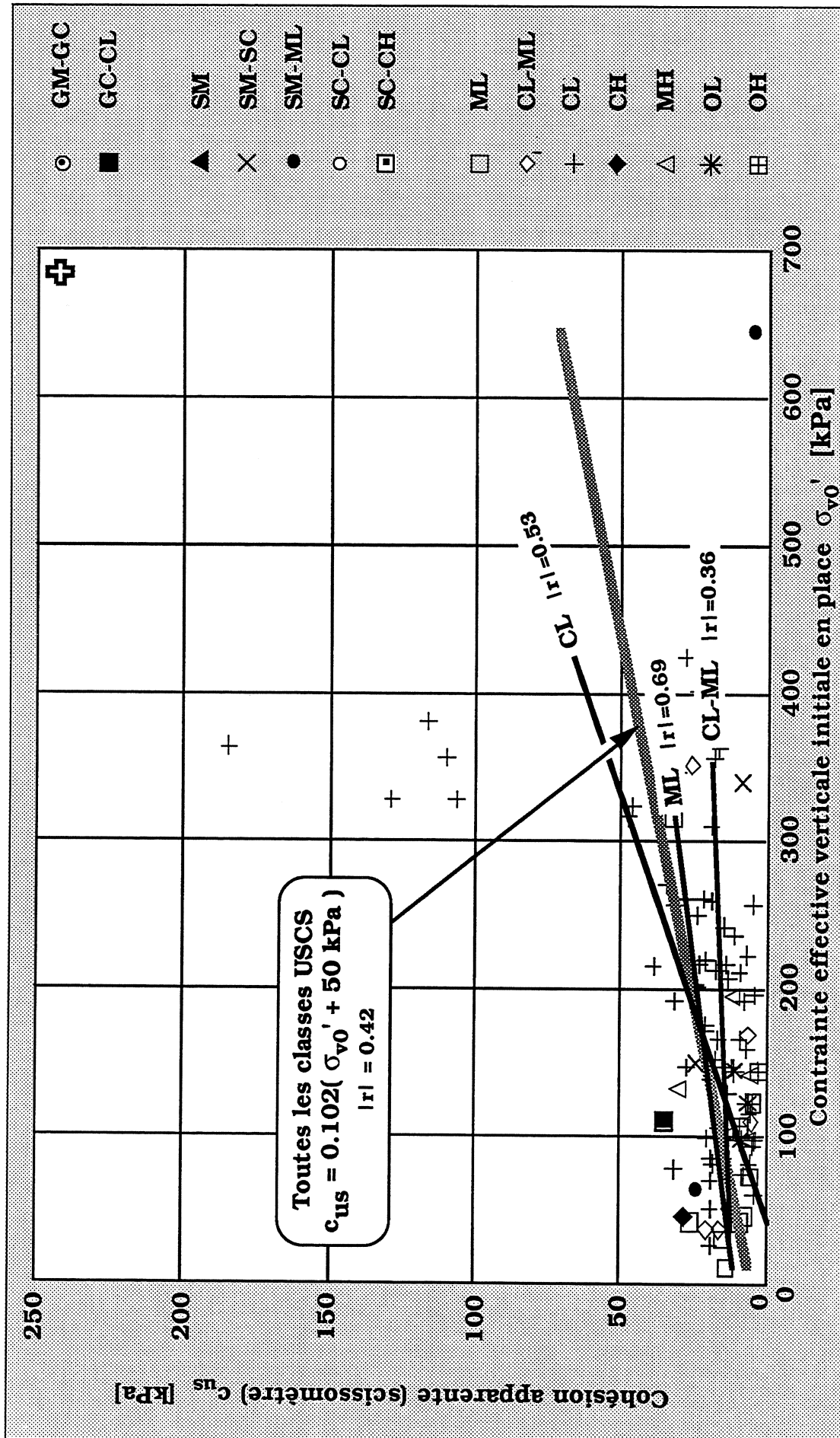


Fig. 4.10 Corrélation entre la cohésion apparente obtenue au scissomètre c_{us} et la contrainte effective verticale initiale en place σ_{v0}' .

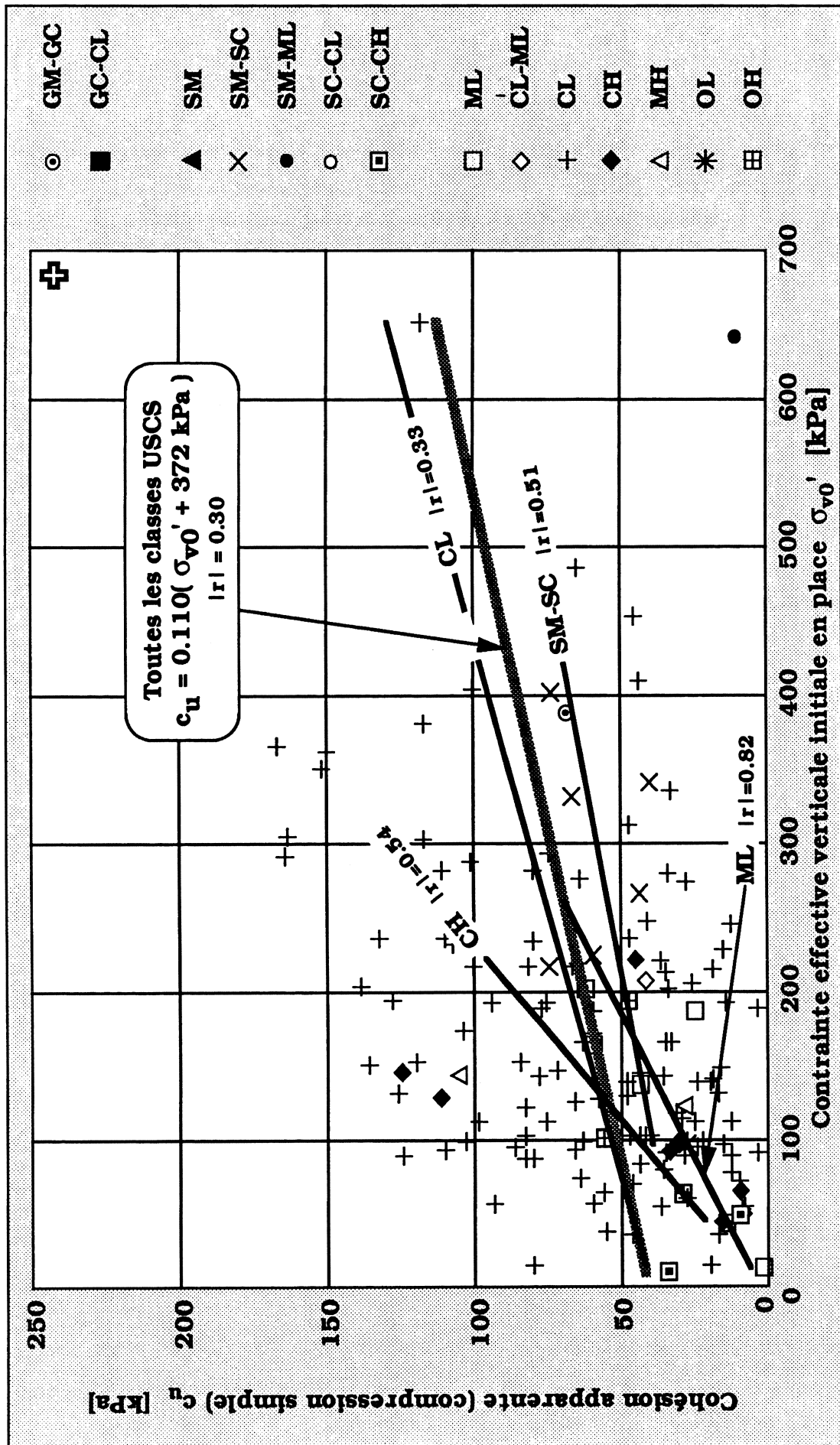


Fig. 4.11 Corrélation entre la cohésion apparente obtenue par compression simple c_u et la contrainte effective verticale initiale en place σ_{v0}' .

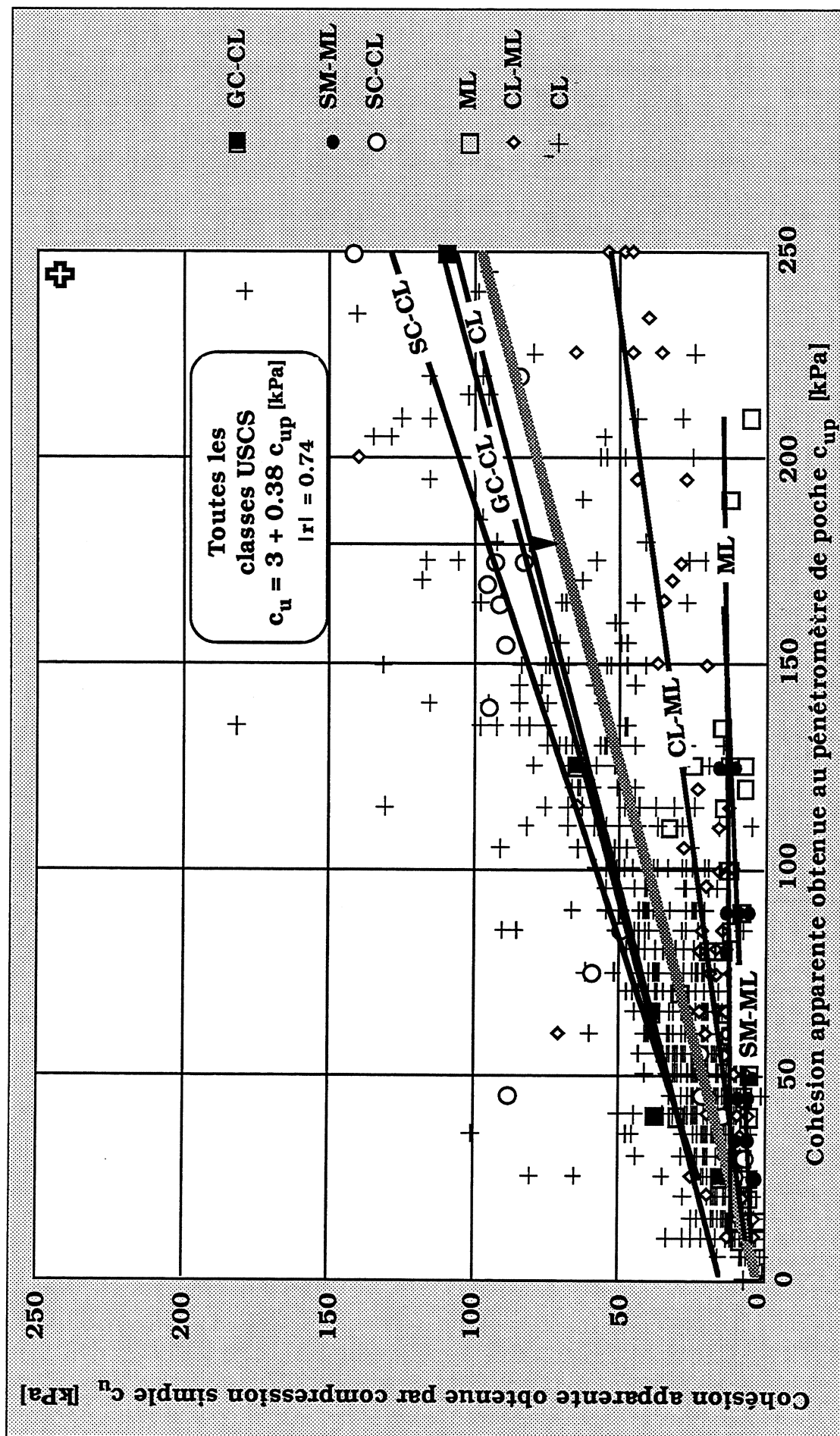


Fig. 4.12 Corrélation entre la cohésion apparente obtenue par compression simple c_u et celle obtenue au pénétromètre de poche c_{up}
 Les droites sont des droites de régression exactes avec des coefficients de corrélation $r > 0.5$.

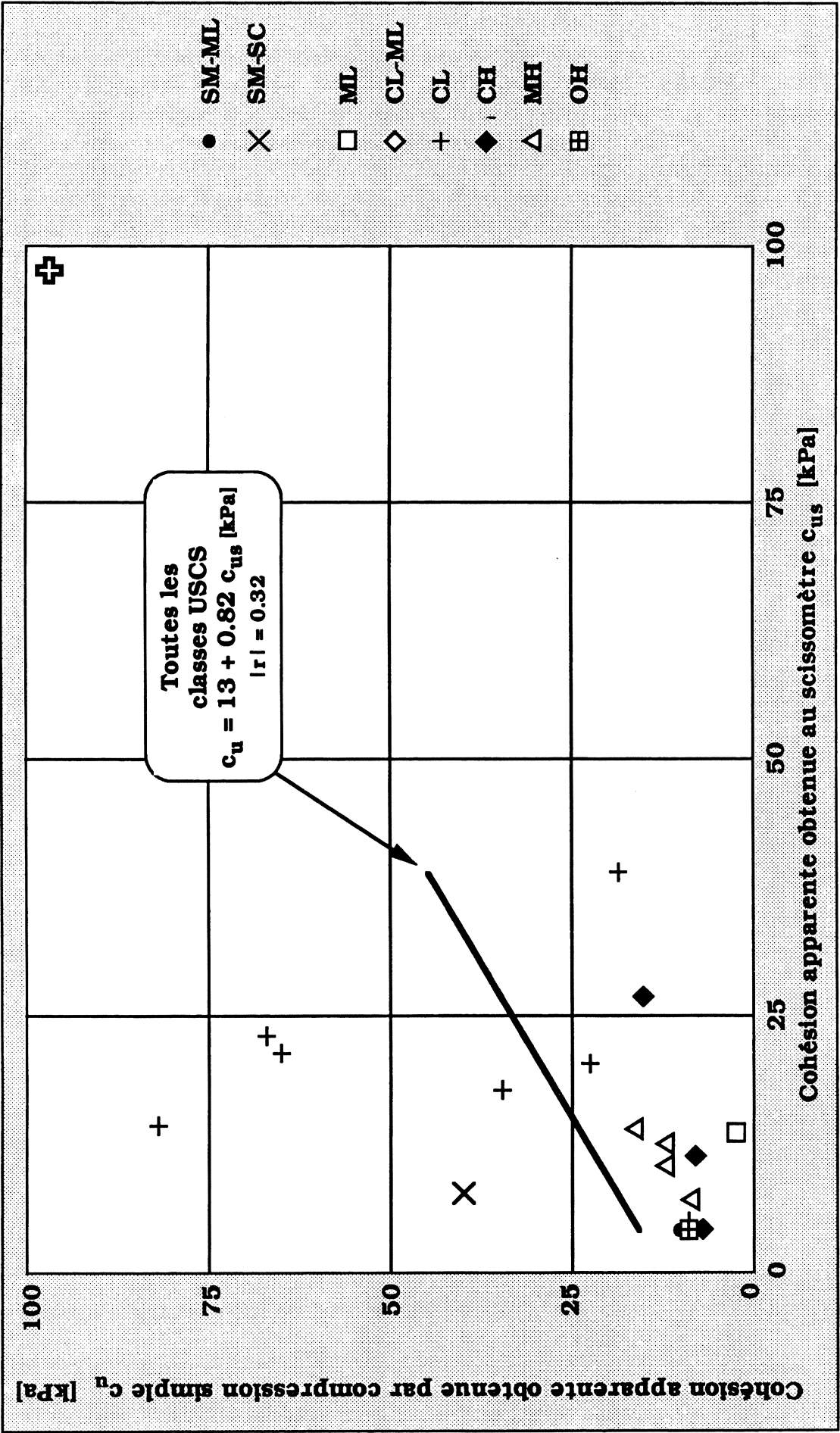


Fig. 4.13 Corrélation entre la cohésion apparente obtenue par compression simple c_u et celle obtenue au scissomètre c_{us}

4.4 Déformation

Diverses corrélations ont été établies pour les paramètres caractérisant la déformation d'un sol. Sur chaque graphique correspondant à une corrélation, des droites de régression sont dessinées pour chaque classe USCS et pour l'ensemble des classes, lorsque, sauf exception, la valeur absolue du coefficient de corrélation r est plus grand que 0.5.

Les corrélations établies sont :

- La corrélation entre l'**indice de compression** C_c et la **limite de liquidité** w_L (fig 4.14).
- La corrélation entre l'**indice de gonflement** C_s et la **limite de liquidité** w_L (fig. 4.15).
- La corrélation entre $(1+e_0)/C_c$ et la **masse volumique sèche** ρ_d (fig. 4.16).
- La corrélation entre $(1+e_0)/C_s$ et la **masse volumique sèche** ρ_d (fig 4.17).
- La corrélation entre l'**indice de compression** C_s et l'**indice de gonflement** C_c (fig. 4.18).

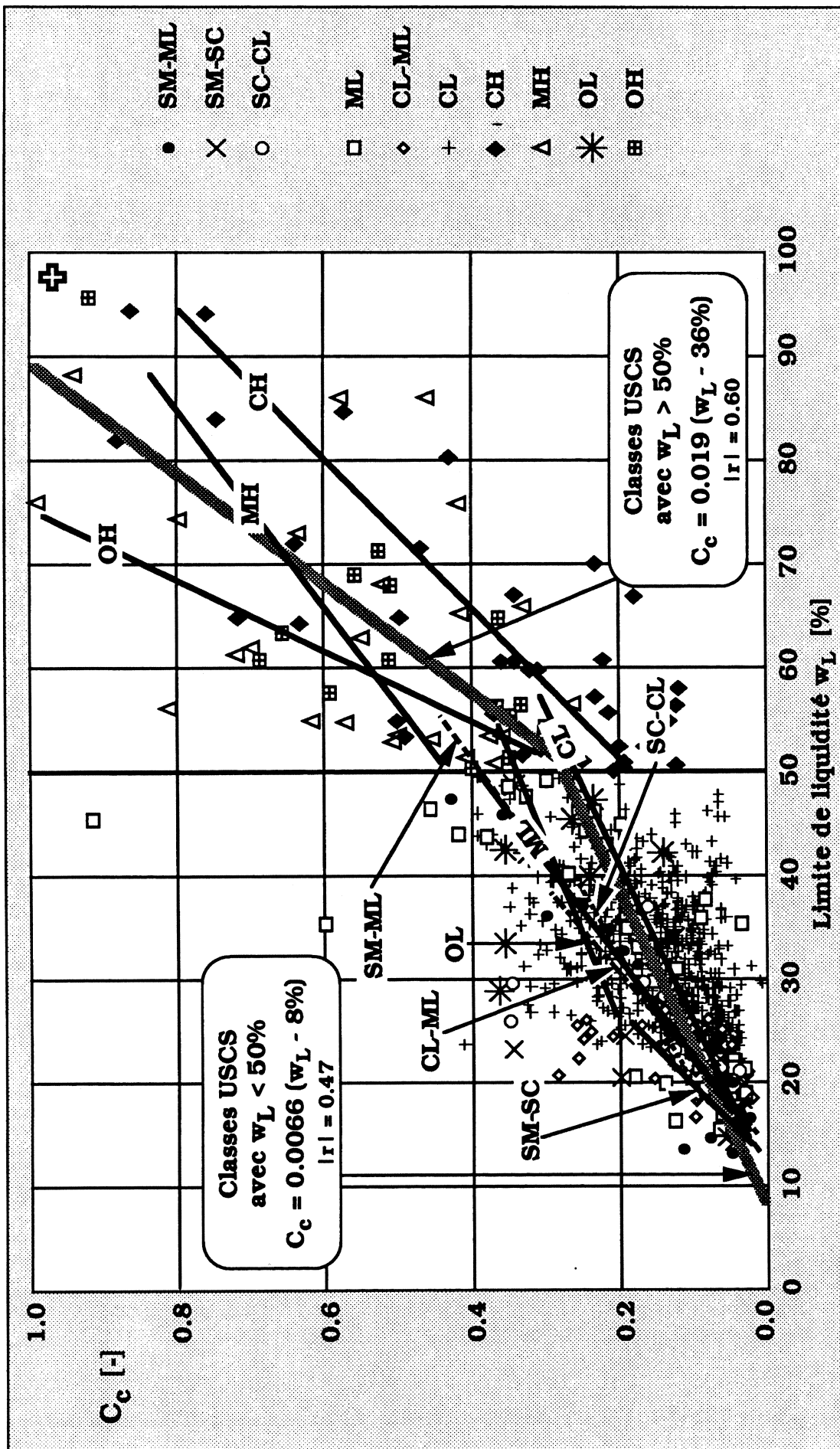


Fig. 4.14 Corrélation entre l'indice de compression C_c et la limite de liquidité w_L .

Les droites sont des droites de régression exactes avec des coefficients de corrélation $r > 0.5$.

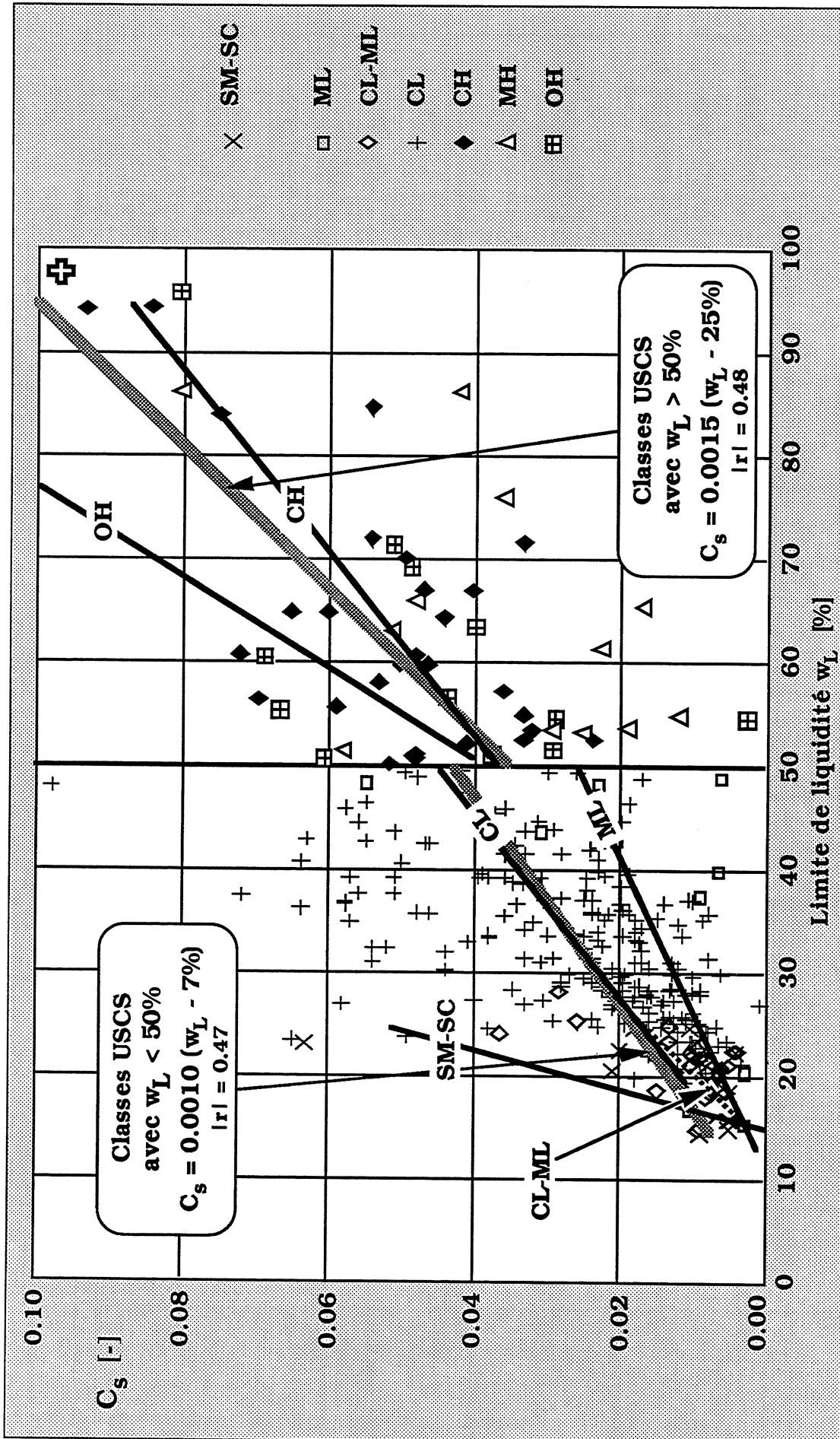


Fig. 4.15 Corrélation entre l'indice de gonflement C_s et la limite de liquidité w_L .

Les droites sont des droites de régression exactes avec des coefficients de corrélation $r > 0.5$.

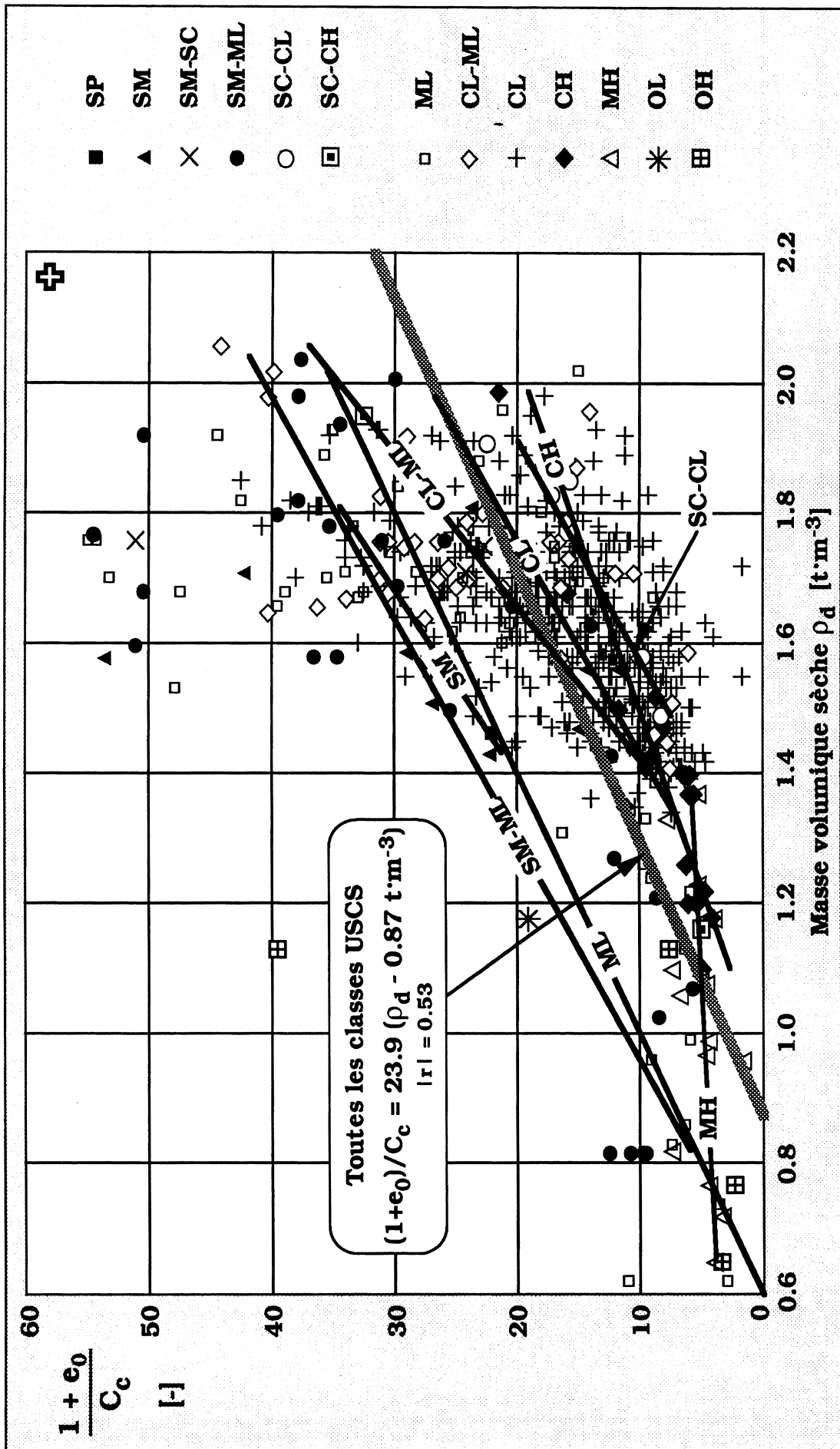


Fig. 4.16 Corrélation entre $(1 + e_0) / C_c$ et la masse volumique sèche ρ_d .

Les droites sont des droites de régression exactes avec des coefficients de corrélation $r > 0.5$.

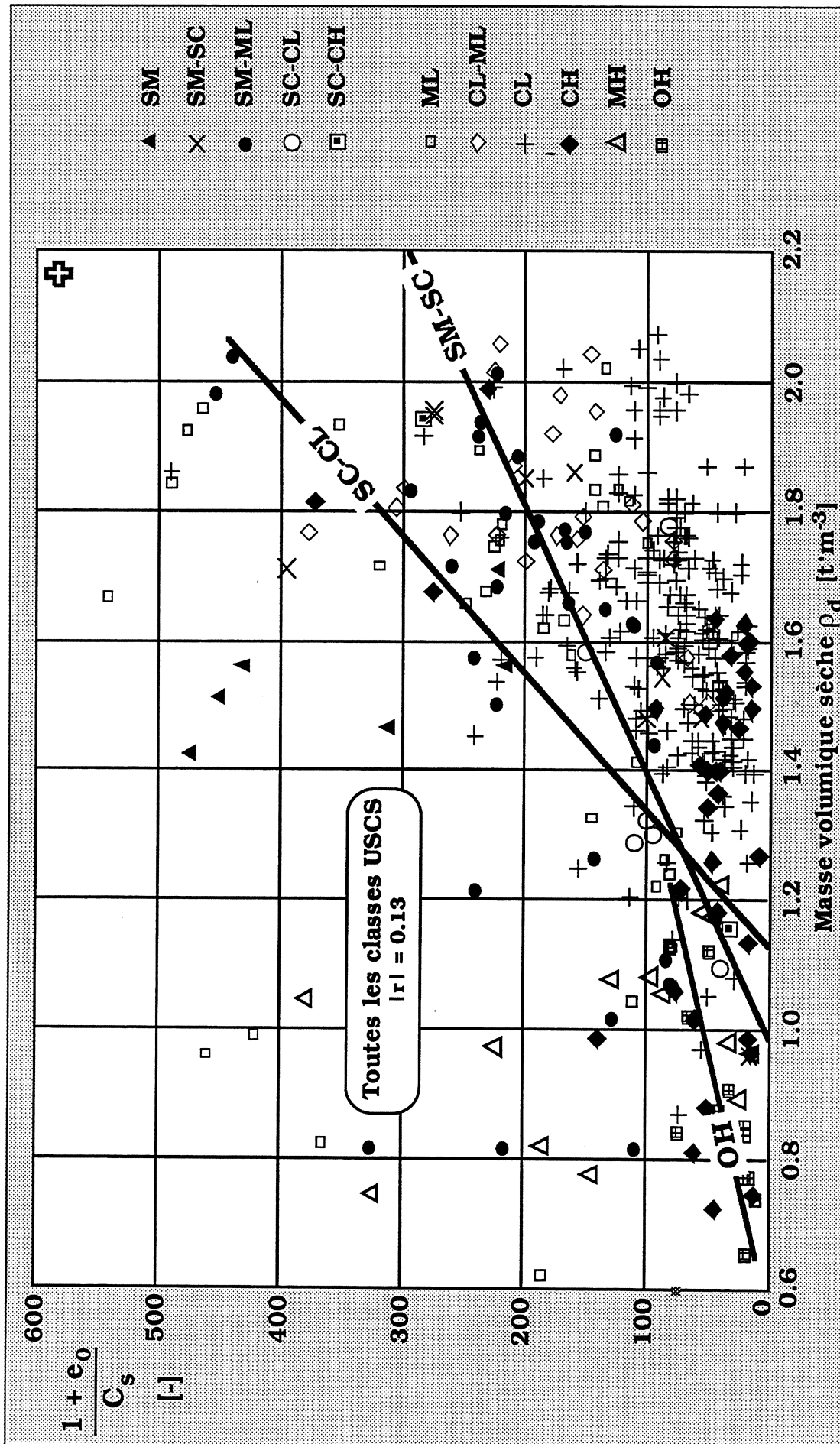


Fig. 4.17 Corrélation entre $(1 + e_0) / C_s$ et la masse volumique sèche ρ_d .
Les droites sont des droites de régression exactes avec des coefficients de corrélation $r > 0.5$.

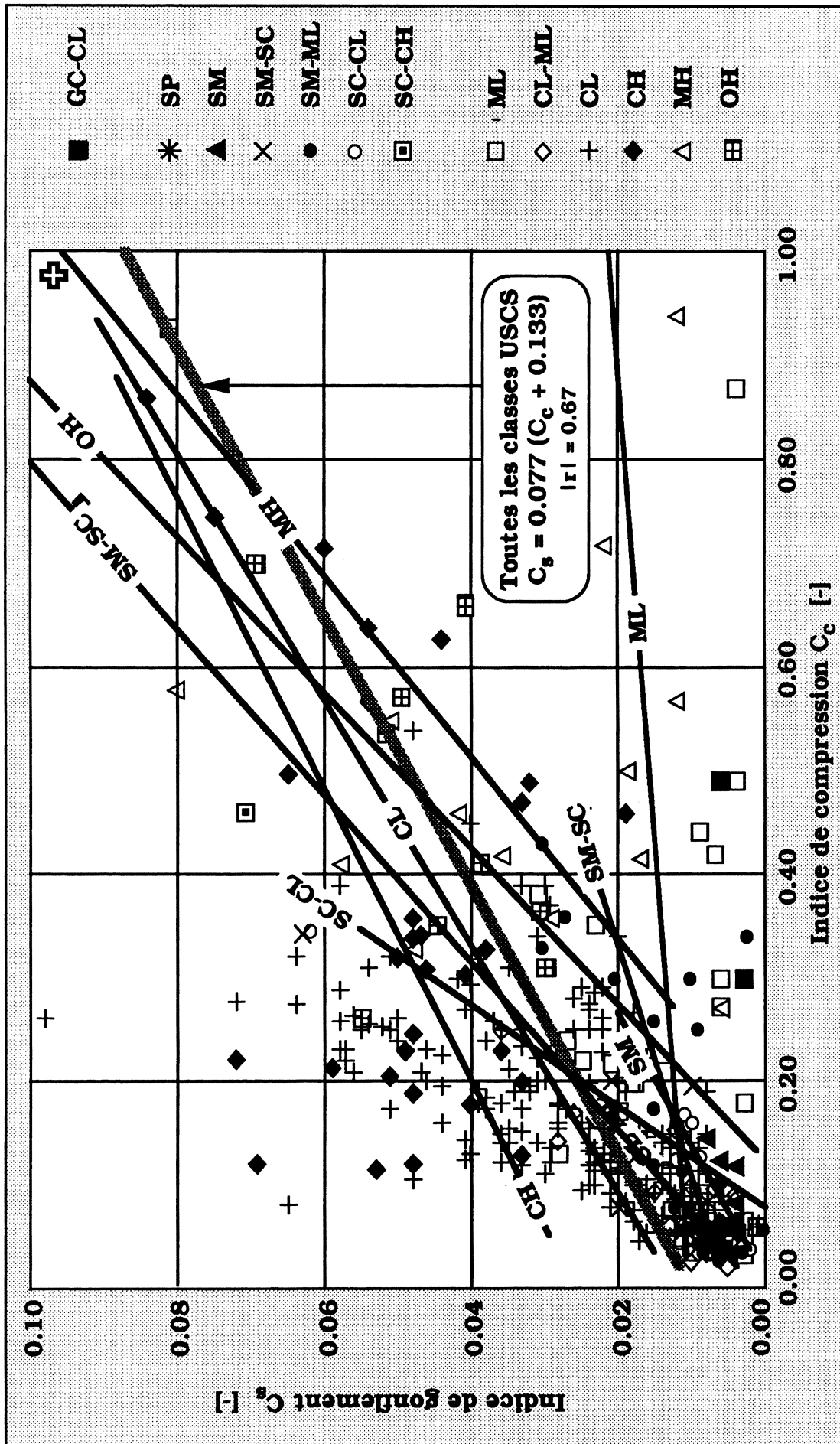


Fig. 4.18 Corrélation entre l'indice de gonflement C_s et l'indice de compression C_c .
 Les droites sont des droites de régression exactes avec des coefficients de corrélation $r > 0.5$.

4.5 Perméabilité

Une seule corrélation a été établie pour la perméabilité (fig. 4.19). C'est la corrélation classique entre le **coefficient de perméabilité k_D** et le **diamètre à 10 % des grains d_{10}** . Seules les droites de régression des SM-SC, SC-CL et OL ont des coefficients de régression plus grand que 0.5 et sont dessinées.

La droite de régression de Allen Hazen [7] pour les sols fins et celles de Slichter [8] pour différents indices de vide e sont superposées au graphique. La droite de Allen Hazen correspond assez bien aux droites de régression des SM-SC, SC-CL et OL. Pour les autres classes, la corrélation est trop mauvaise pour établir une relation entre les formules classiques de calcul du coefficient de perméabilité en fonction de d_{10} et les couples de valeurs reproduites sur le graphique.

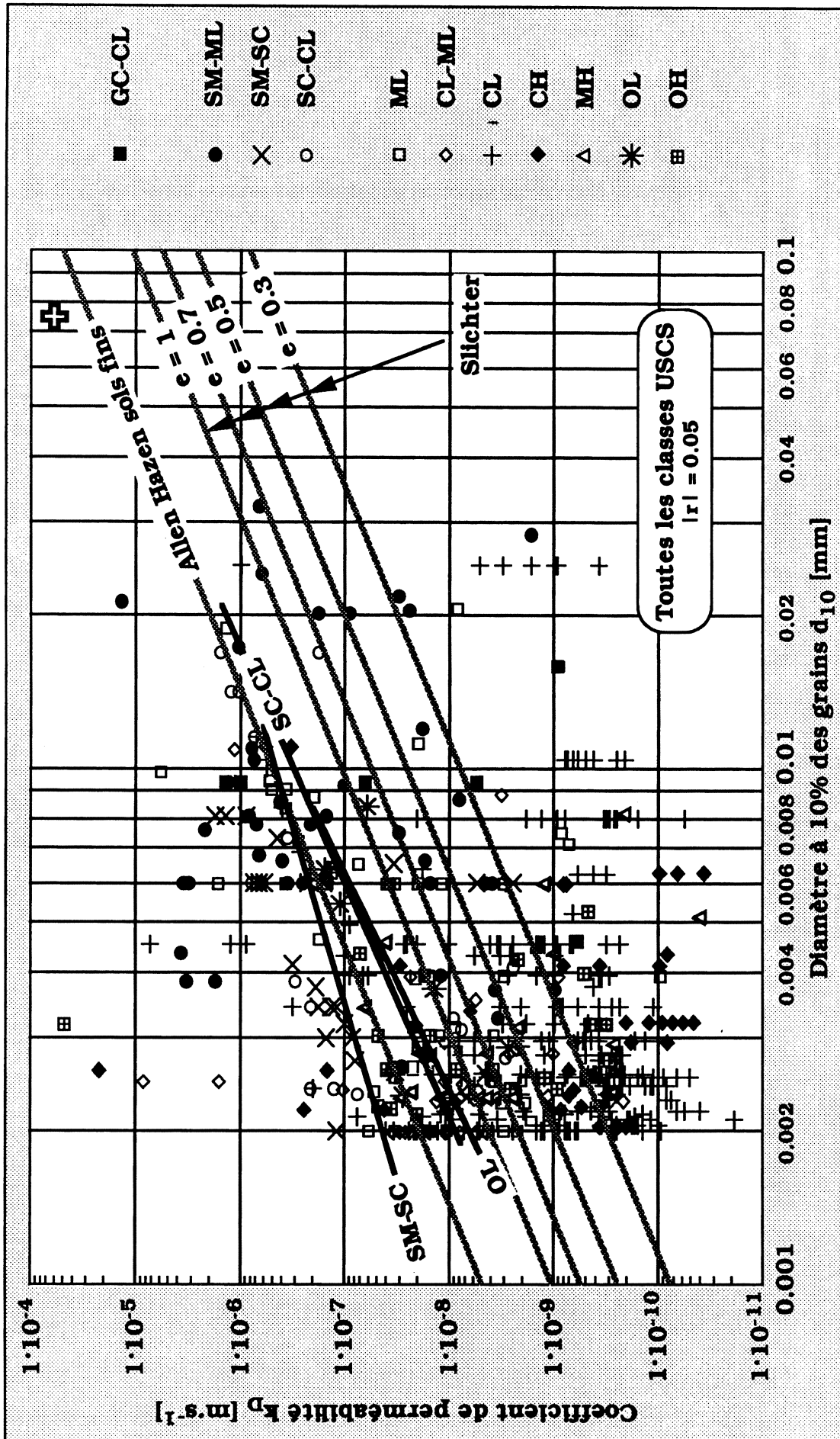


Fig. 4.19 Corrélation entre le coefficient de perméabilité k_D [m.s⁻¹] et le diamètre à 10% des grains d_{10} [mm].

Les droites sont des droites de régression exactes avec des coefficients de corrélation $r > 0.5$.

5. Correction et extension de l'USCS

5.1 Quelques classifications des sols

Le plus vieux système de classification des sols est probablement la classification AASHTO (American Association of State Highways and Transportation Officials) qui a été introduite en 1929 et révisée plusieurs fois par la suite [9]. C'est un système basé plutôt sur le mode d'utilisation du sol et, en particulier, sur son utilisation dans le domaine routier. Dans ce système le sol est divisé en trois classes selon sa granulométrie et les deux premières (fins) divisées en sous-classes en fonction de leur granulométrie, de leur plasticité et d'un indice de groupe défini par une formule. En Suisse, ce système n'a pas été très souvent utilisé et il ne l'est plus du tout aujourd'hui. Il est par contre encore utilisé aux USA.

Le système USCS (Unified Soil Classification System - on devrait plutôt parler de l'USCS) a été, à l'origine, développé par A. Casagrande [10] pour la construction d'aéroports militaires lors de la deuxième guerre mondiale. Il a été ensuite modifié en 1952 par A. Casagrande, le "US Bureau of Reclamation" et le "US Army corps of Engineers" pour le rendre applicable à tous les autres types de constructions [11]. C'est, aujourd'hui, le système qui est de loin le plus appliqué dans le monde. Il est basé sur la granulométrie du sol et, pour les sols fins, sur leur plasticité. Il est notamment décrit par la norme ASTM D 2487 [12].

En Suisse, il a été officiellement introduit en 1959 par la norme SN 670'008: classification des sols, méthode de laboratoire selon USCS.

En Allemagne et en Autriche il n'est que peu utilisé car c'est surtout le système, un peu semblable, défini par la norme DIN 18'196 qui est employé. En France, il est employé mais il existe, dans la construction routière, une autre classification définie par [13]. Enfin, en Italie c'est, à notre connaissance, le seul système utilisé.

5.2 L'USCS en Suisse

Lors de la rédaction de la norme suisse SN 670'008 l'USCS a été un peu malheureusement modifié; il ne correspond ainsi pas exactement au système international. Ces modifications sont dues à la difficulté de l'époque à mettre d'accord tous les milieux suisses ayant un rapport avec la géotechnique : géologues, entrepreneurs, ingénieurs de toute catégorie.

Les figures 5.1 à 5.5 comparent le système USCS "suisse" avec celui défini en 1952 et aujourd'hui normalisé par ASTM D 2487. Ces cinq figures montrent qu'une assez grande confusion existe entre la classification suisse et la classification standard. Elle est particulièrement importante pour les sols avec des fins compris entre 12 et 55 %. Les principales divergences sont :

- La limite entre les sols fins et les sols grossiers : 0.06 mm en Suisse et 0.074 mm selon ASTM (tamis Tyller No 200; les américains continuent à utiliser les tamis Tyller non standards alors qu'ils ont approuvé depuis longtemps la norme ISO 565-1972 sur les tamis).
- La limite entre les sables et les graviers : 2 mm en Suisse (selon SN 670'005) et 4.75 mm selon ASTM (tamis Tyller No 4).
- Pour les sols grossiers, les classes définies par le pourcentage pondéral des grains < 0.06 mm (0.074 selon ASTM) : ≤ 5 , 5 à 15, $> 15\%$ en Suisse, et ≤ 5 , 5 à 12 et $> 12\%$ selon ASTM. Cette différence dans les pourcentages limites corrige un peu celle des diamètres utilisés pour la limite des sols fins.
- Le mode de détermination de la lettre du fin (M, C) pour les sols à gros grains et à grains moyens (GM, GM-GC) : $I_p < 4$, $4 < I_p < 7$, $7 < I_p < 12$ et $I_p > 12$ en Suisse, et selon le diagramme de plasticité pour l'ASTM.

- La définition précise des sols organiques qui n'existe pas dans la norme SN 670'008 (une méthode de reconnaissance approximative des sols organiques existe cependant dans la norme SN 670'005 : Classification des sols, méthode de chantier)
- La classification des sols fins organiques (diagrammes de plasticité).
- La symbolisation des sols grossiers.

USCS suisse (SN 670'008)		USCS ASTM D2487	
symbole	critères	symbole	critères
GW	$\% \phi < 0.06 \text{ mm} \leq 5$ $\% (\phi \geq 2 \text{ mm}) > \% (\phi .06 \text{ à } 2 \text{ mm}) \text{ A}$ $C_u \geq 4 \text{ et } 1 \leq C_c \leq 3$	GW	$(\% \phi > 0.074 \text{ mm}) > 50$ $\% (\phi \geq 4.75 \text{ mm}) > 50$ $\% \phi < 0.074 \text{ mm} \leq 5$ $C_u \geq 4 \text{ et } 1 \leq C_c \leq 3$
GP	$\% \phi < 0.06 \text{ mm} \leq 5$ $\% (\phi \geq 2 \text{ mm}) > \% (\phi .06 \text{ à } 2 \text{ mm}) \text{ A}$ $C_u < 4 \text{ et/ou } 1 > C_c > 3$	GP	$(\% \phi > 0.074 \text{ mm}) > 50$ $\% (\phi \geq 4.75 \text{ mm}) > 50$ $\% \phi < 0.074 \text{ mm} \leq 5$ $C_u < 4 \text{ et/ou } 1 > C_c > 3$
GM	$5 < \% \phi < 0.06 \text{ mm} < 15$ $\% (\phi \geq 2 \text{ mm}) > \% (\phi .06 \text{ à } 2 \text{ mm}) \text{ A}$ $\% (\phi .002 \text{ à } 0.06 \text{ mm}) > \% (< \phi .002)$	GM	$\% \phi > 0.074 \text{ mm} > 50$ $\% (\phi \geq 4.75 \text{ mm}) > 50$ $\% \phi < 0.074 \text{ mm} > 12$ fin = ML ou MH ($I_p > 4\%$ pour ML)
GC	$5 < \% \phi < 0.06 \text{ mm} < 15$ $\% (\phi \geq 2 \text{ mm}) > \% (\phi .06 \text{ à } 2 \text{ mm}) \text{ A}$ $\% (\phi .002 \text{ à } 0.06 \text{ mm}) < \% (< \phi .002)$	GC	$(\% \phi > 0.074 \text{ mm}) > 50$ $\% (\phi \geq 4.75 \text{ mm}) > 50$ $\% \phi < 0.074 \text{ mm} > 12$ fin = CL ou CH ($I_p > 7\%$)
GM-ML	$\% \phi < 0.06 \text{ mm} > 15$ $\% (\phi \geq 2 \text{ mm}) > \% (\phi .06 \text{ à } 2 \text{ mm}) \text{ A}$ $I_p < 4\%$	n'existe pas	env. GM selon ASTM
GM-GC	$\% \phi < 0.06 \text{ mm} > 15$ $\% (\phi \geq 2 \text{ mm}) > \% (\phi .06 \text{ à } 2 \text{ mm}) \text{ A}$ $4\% < I_p < 7\%$	GC-GM	$(\% \phi > 0.074 \text{ mm}) > 50$ $\% (\phi \geq 4.75 \text{ mm}) > 50$ $\% \phi < 0.074 \text{ mm} > 12$ fin = CL-ML
GC-CL	$\% \phi < 0.06 \text{ mm} > 15$ $\% (\phi \geq 2 \text{ mm}) > \% (\phi .06 \text{ à } 2 \text{ mm}) \text{ A}$ $7\% < I_p < 22\%$	n'existe pas	env. GC selon ASTM
GC-CH	$\% \phi < 0.06 \text{ mm} > 15$ $\% (\phi \geq 2 \text{ mm}) > \% (\phi .06 \text{ à } 2 \text{ mm}) \text{ A}$ $I_p > 22\%$	n'existe pas	env. GC selon ASTM
n'existe pas	env. GM selon SN 670'008	GW-GM	$(\% \phi > 0.074 \text{ mm}) > 50$ $\% (\phi \geq 4.75 \text{ mm}) > 50$ $5 < \% \phi < 0.074 \text{ mm} < 12$ $C_u \geq 4 \text{ et } 1 \leq C_c \leq 3$ Fin = ML ou MH
n'existe pas	env. GM selon SN 670'008	GP-GM	$(\% \phi > 0.074 \text{ mm}) > 50$ $\% (\phi \geq 4.75 \text{ mm}) > 50$ $5 < \% \phi < 0.074 \text{ mm} < 12$ $C_u < 4 \text{ et/ou } 1 > C_c > 3$ Fin = ML ou MH
n'existe pas	env. GC selon SN 670'008	GW-GC	$(\% \phi > 0.074 \text{ mm}) > 50$ $\% (\phi \geq 4.75 \text{ mm}) > 50$ $5 < \% \phi < 0.074 \text{ mm} < 12$ $C_u \geq 4 \text{ et } 1 \leq C_c \leq 3$ Fin = CL, CH ou CL-ML
n'existe pas	env. GC selon SN 670'008	GP-GC	$(\% \phi > 0.074 \text{ mm}) > 50$ $\% (\phi \geq 4.75 \text{ mm}) > 50$ $5 < \% \phi < 0.074 \text{ mm} < 12$ $C_u < 4 \text{ et/ou } 1 > C_c > 3$ Fin = CL, CH ou CL-ML

A Mal précisé dans SN 670'008

Fig. 5.1 Gravier : comparaison entre l'USCS suisse et celui défini par la norme ASTM D 2487.

USCS suisse (SN 670'008)		USCS ASTM D2487	
symbole	critères	symbole	critères
SW	$\% \phi < 0.06 \text{ mm} \leq 5$ $\% (\phi \geq 2 \text{ mm}) < \% (\phi .06 \text{ à } 2 \text{ mm})$ A $C_u \geq 6$ et $1 \leq C_c \leq 3$	SW	$(\% \phi > 0.074 \text{ mm}) > 50$ $\% (\phi \geq 4.75 \text{ mm}) < 50$ $\% \phi < 0.074 \text{ mm} \leq 5$ $C_u \geq 6$ et $1 \leq C_c \leq 3$
SP	$\% \phi < 0.06 \text{ mm} \leq 5$ $\% (\phi \geq 2 \text{ mm}) < \% (\phi .06 \text{ à } 2 \text{ mm})$ A $C_u < 6$ et/ou $1 > C_c > 3$	SP	$(\% \phi > 0.074 \text{ mm}) > 50$ $\% (\phi \geq 4.75 \text{ mm}) < 50$ $\% \phi < 0.074 \text{ mm} \leq 5$ $C_u < 6$ et/ou $1 > C_c > 3$
SM	$5 < \% \phi < 0.06 \text{ mm} < 15$ $\% (\phi \geq 2 \text{ mm}) < \% (\phi .06 \text{ à } 2 \text{ mm})$ A $\% (\phi .002 \text{ à } 0.06 \text{ mm}) > \% (< \phi .002)$	SM	$(\% \phi > 0.074 \text{ mm}) > 50$ $\% (\phi \geq 4.75 \text{ mm}) < 50$ $\% \phi < 0.074 \text{ mm} > 12$ fin = ML ou MH ($I_p < 4\%$ pour ML)
SC	$5 < \% \phi < 0.06 \text{ mm} < 15$ $\% (\phi \geq 2 \text{ mm}) < \% (\phi .06 \text{ à } 2 \text{ mm})$ A $\% (\phi .002 \text{ à } 0.06 \text{ mm}) < \% (< \phi .002)$	SC	$(\% \phi > 0.074 \text{ mm}) > 50$ $\% (\phi \geq 4.75 \text{ mm}) < 50$ $\% \phi < 0.074 \text{ mm} > 12$ fin = CL ou CH ($I_p > 7\%$)
SM-ML	$\% \phi < 0.06 \text{ mm} > 15$ $\% (\phi \geq 2 \text{ mm}) < \% (\phi .06 \text{ à } 2 \text{ mm})$ A $I_p < 4\%$	n'existe pas	env. SM selon ASTM
SM-SC	$\% \phi < 0.06 \text{ mm} > 15$ $\% (\phi \geq 2 \text{ mm}) < \% (\phi .06 \text{ à } 2 \text{ mm})$ A $4\% < I_p < 7\%$	SC-SM	$(\% \phi > 0.074 \text{ mm}) > 50$ $\% (\phi \geq 4.75 \text{ mm}) < 50$ $\% \phi < 0.074 \text{ mm} > 12$ fin = CL-ML
SC-CL	$\% \phi < 0.06 \text{ mm} > 15$ $\% (\phi \geq 2 \text{ mm}) < \% (\phi .06 \text{ à } 2 \text{ mm})$ A $7\% < I_p < 22\%$	n'existe pas	env. SC selon ASTM
SC-CH	$\% \phi < 0.06 \text{ mm} > 15$ $\% (\phi \geq 2 \text{ mm}) < \% (\phi .06 \text{ à } 2 \text{ mm})$ A $I_p > 22\%$	n'existe pas	env. SC selon ASTM
n'existe pas	env. SM selon SN 670'008	SW-SM	$(\% \phi > 0.074 \text{ mm}) > 50$ $\% (\phi \geq 4.75 \text{ mm}) < 50$ $5 < \% \phi < 0.074 \text{ mm} < 12$ $C_u \geq 4$ et $1 \leq C_c \leq 3$ Fin = ML ou MH
n'existe pas	env. SM selon SN 670'008	SP-SM	$(\% \phi > 0.074 \text{ mm}) > 50$ $\% (\phi \geq 4.75 \text{ mm}) < 50$ $5 < \% \phi < 0.074 \text{ mm} < 12$ $C_u < 4$ et/ou $1 > C_c > 3$ Fin = ML ou MH
n'existe pas	env. SC selon SN 670'008	SW-SC	$(\% \phi > 0.074 \text{ mm}) > 50$ $\% (\phi \geq 4.75 \text{ mm}) < 50$ $5 < \% \phi < 0.074 \text{ mm} < 12$ $C_u \geq 4$ et $1 \leq C_c \leq 3$ Fin = CL, CH ou CL-ML
n'existe pas	env. SC selon SN 670'008	SP-SC	$(\% \phi > 0.074 \text{ mm}) > 50$ $\% (\phi \geq 4.75 \text{ mm}) < 50$ $5 < \% \phi < 0.074 \text{ mm} < 12$ $C_u < 4$ et/ou $1 > C_c > 3$ Fin = CL, CH ou CL-ML

A Mal précisé dans SN 670'008

Fig. 5.2 Sable : comparaison entre l'USCS suisse et celui défini par la norme ASTM D 2487.

USCS suisse (SN 670'008)		USCS ASTM D2487	
symbole	critères	symbole	critères
ML	$\% \phi < 0.06 \text{ mm} > 50$ selon diagr. plasticité SN 670'008 D	ML	$\% \phi < 0.074 \text{ mm} > 50$ selon diagr. plasticité ASTM2487 D
CL-ML	$\% \phi < 0.06 \text{ mm} > 50$ selon diagr. plasticité SN 670'008 D	CL-ML	$\% \phi < 0.074 \text{ mm} > 50$ selon diagr. plasticité ASTM2487 D
CL	$\% \phi < 0.06 \text{ mm} > 50$ selon diagr. plasticité SN 670'008 D	CL	$\% \phi < 0.074 \text{ mm} > 50$ selon diagr. plasticité ASTM2487 D
CH	$\% \phi < 0.06 \text{ mm} > 50$ selon diagr. plasticité SN 670'008 D	CH	$\% \phi < 0.074 \text{ mm} > 50$ selon diagr. plasticité ASTM2487 D
MH	$\% \phi < 0.06 \text{ mm} > 50$ selon diagr. plasticité SN 670'008 D	MH	$\% \phi < 0.074 \text{ mm} > 50$ selon diagr. plasticité ASTM2487 D
OL	$\% \phi < 0.06 \text{ mm} > 50$ selon diagr. plasticité SN 670'008 D avec matière organique B	OL	$\% \phi < 0.074 \text{ mm} > 50$ selon diagr. plasticité ASTM2487 D avec matière organique C
OH	$\% \phi < 0.06 \text{ mm} > 50$ selon diagr. plasticité SN 670'008 D avec matière organique B	OH	$\% \phi < 0.074 \text{ mm} > 50$ selon diagr. plasticité ASTM2487 D avec matière organique C

- B Teneur en matière organique non spécifiée
 C w_L après séchage à $105^\circ \text{ C} < 0.75 w_L$ sans séchage
 D Le diagramme de plasticité de ASTM D2487 est différent de celui de SN 670'008, ceci uniquement pour les OL et OH

Fig. 5.3 Sols fins : comparaison entre l'USCS suisse et celui défini par la norme ASTM D 2487.

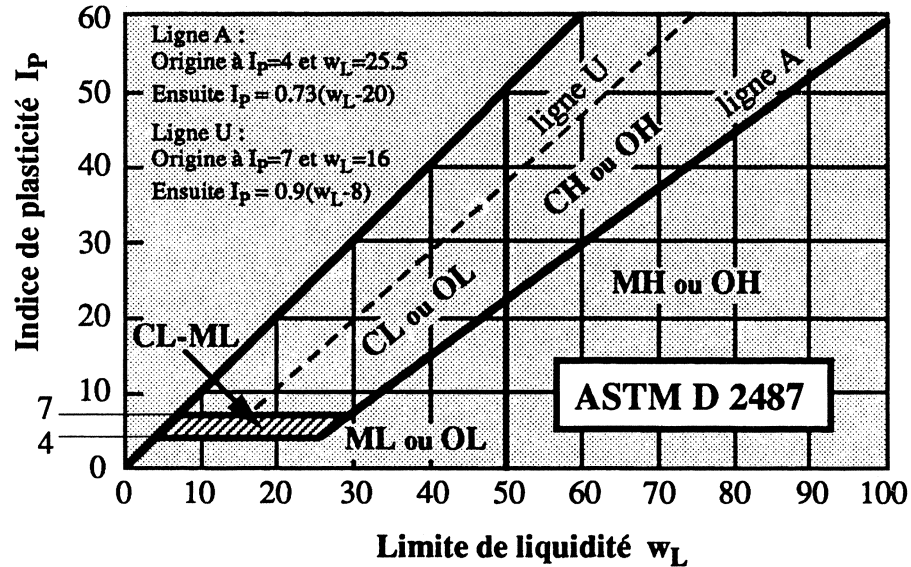


Fig. 5.4 Sols fins : diagramme de plasticité de la norme ASTM D 2487.

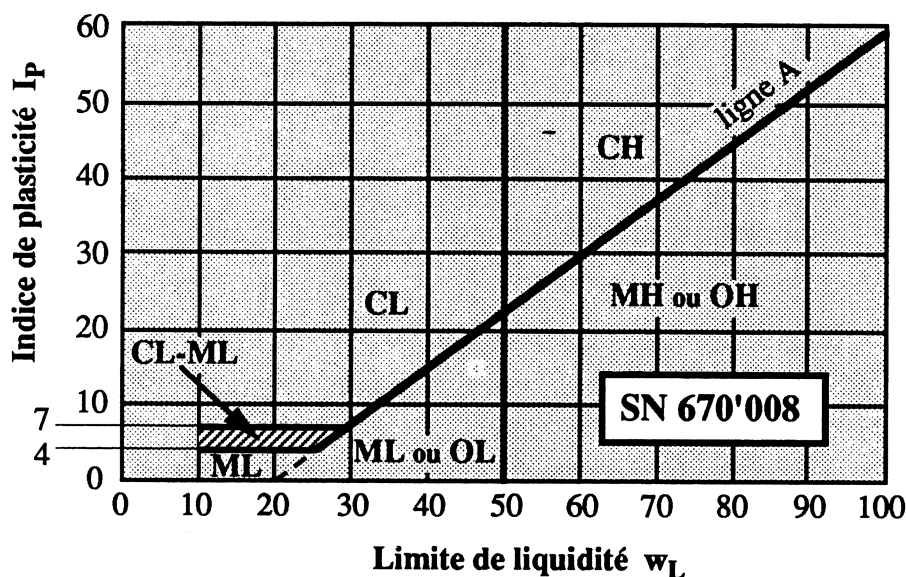


Fig. 5.5 Sols fins : diagramme de plasticité de la norme SN 670'008.

Faut-il alors corriger la norme SN 670'008 en l'adaptant exactement à la norme ASTM D 2487 ? Le problème est complexe.

Aujourd'hui, dans le milieu des géotechniciens suisses, la confusion actuelle ne présente d'inconvénients que lorsque des documents géotechniques ont une portée internationale, par exemple dans les publications scientifiques. La Suisse est cependant en train de s'ouvrir à l'Europe et elle doit absolument s'adapter à la normalisation européenne mais, en ce qui concerne la classification des sols, aucune norme n'existe encore en Europe! Cette norme est prévue et c'est la partie 2 du sous-comité 7 (SC7 : géotechnique) rattaché au comité technique 250 (TC250 :Eurocodes) du Comité Européenne de Normalisation (CEN) qui doit s'en occuper; elle n'a cependant pas encore commencé son travail.

Si les ingénieurs suisses se mettaient à appliquer l'USCS selon ASTM D 2487, il en découlerait de nombreux problèmes. Il y a cependant de très fortes chances que les européens adopte l'USCS défini par la norme ASTM D 2487 car cette norme est utilisée aujourd'hui dans le monde entier.

La figure 5.6 montre comment il faudrait passer de la l'USCS suisse (SN 670'008) à l'USCS selon ASTM D 2487. Les correspondances entre les classes de sols ne peuvent cependant être très précises; pour plusieurs d'entre elles, elle sont même très approximatives.

Nous allons nonobstant, dans les lignes qui suivent, faire une proposition de modification de l'USCS suisse. A notre avis, elle ne devrait pas être introduite tout de suite par la révision de la norme SN 670'008; il faut attendre la proposition que le CEN va prochainement (2 à 3 ans) faire en la matière.

SN 670'008	ASTM D 2487	SN 670'008	ASTM D 2487
GW	GW	Sable = idem gravier	
GP	GP	ML	ML
GM	GW-GM ou GP-GM	CL-ML	CL-ML
GC	GW-GC ou GP-GC	CL	CL ou évent. OL
GM-GC	GC-GM	CH	CH ou évent. OH
GM-ML	GM	MH	MH
GC-CL	GC	OL	OL
GC-CH	GC	OH	OH

Fig. 5.6 Correspondance approximative entre les classes de l'USCS suisse et celles de l'USCS selon ASTM D 2487.

5.3 Extension de l'USCS

La classification USCS n'est de loin pas parfaite; la plus grande critique que l'on puisse faire à son égard est, pour les sols des régions ayant subi les grandes glaciations, le beaucoup trop important volume de sols classés sous le symbole CL. La statistique qui fait l'objet de ce rapport montre, en effet, que 45% des échantillons analysés en Suisse sont des CL. En outre elle ne fait pas intervenir la notion de surconsolidation des sols fins qui est importante pour l'ingénieur.

Dans les lignes qui suivent nous allons proposer un USCS modifié par rapport à celui décrit par la norme SN 670'008. Il pourrait le remplacer mais, à notre avis, plutôt servir de base de travail et de discussion lors des procédures de rédaction et d'approbation de l'éventuelle norme CEN de classification des sols.

Pour les **sols grossiers** cette classification modifiée reprend le principe de l'USCS selon ASTM D 2487 avec comme différences :

- La limite entre les sols grossiers et fin est fixée à 0.060 mm (0.074 dans ASTM D 2487). Pour corriger un peu cette différence de diamètres, les classes définies par le pourcentage pondéral des grains < 0.060 mm sont, comme auparavant de ≤5, 5 à 15, et >15% (≤5, 5 à 12, et >12% dans ASTM D 2487).
- La limite entre les sables et les graviers est 2 mm (4.75 dans ASTM D 2487).

La figure 5.7 définit exactement la classification proposée pour les graviers et la figure 5.8 pour les sables.

Pour les **sols fins** (fig. 5.9 et 5.10) :

- Elle divise les sols à basse limite de liquidité en deux zones, à savoir, une zone comprise entre $w_L = 0$ et $w_L \leq 30$ et une autre comprise entre $w_L = 30$ et $w_L = 50$. Aux symboles de l'USCS on ajoute un indice 1 pour la première zone et un indice 2 pour la seconde. Cette limite de 30% divise bien l'ensemble des sols à basse limite de liquidité : 57% entre 0 et 30 et 43% entre 30 et 50. La norme DIN 18'196 divise aussi les sols à basse limite de liquidité en deux zones avec cependant une limite entre ces dernières fixée à 35%; avec cette limite la répartition des sols suisses est de 76% entre 0 et 30 et 24% entre 30 et 50.
- Elle définit ce qu'on entend par sol organique et permet, comme dans ASTM D 2487, à des sols organiques de se trouver au-dessus de la ligne A. Un sol est organique si sa li-

mite de liquidité après séchage pendant 24 heures à l'étuve à 105° C, est plus petite que 0.75 fois sa limite sans passage à l'étuve.

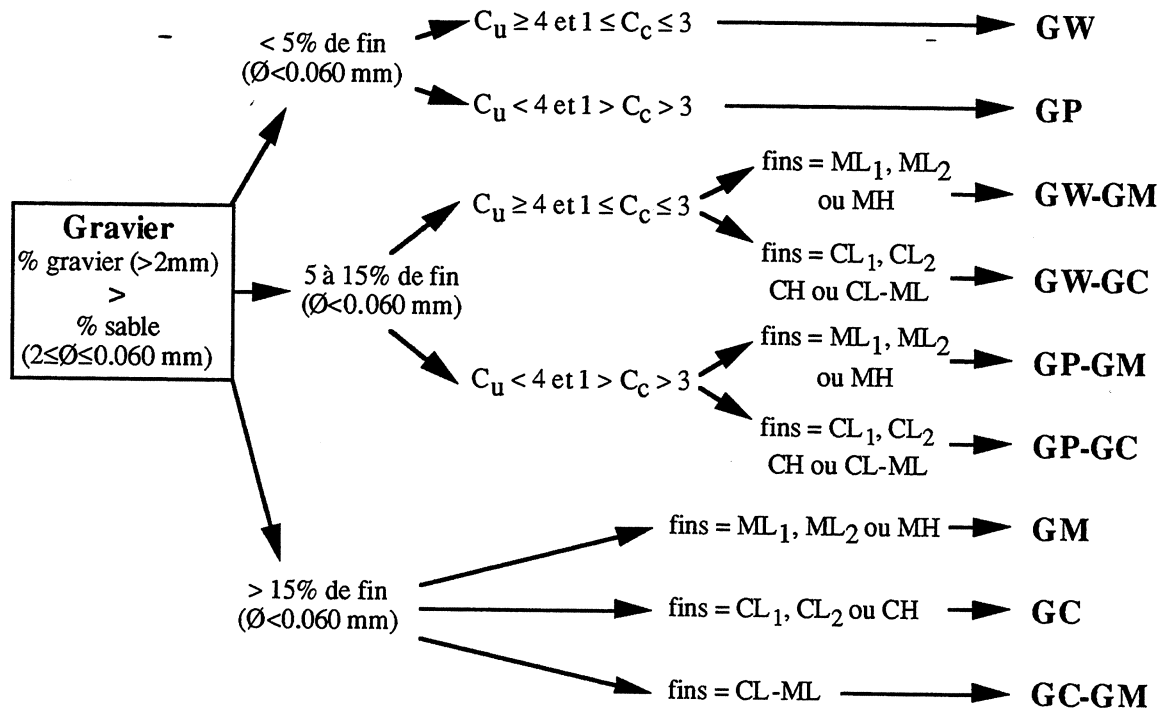


Fig. 5.7 Proposition de classification des graviers

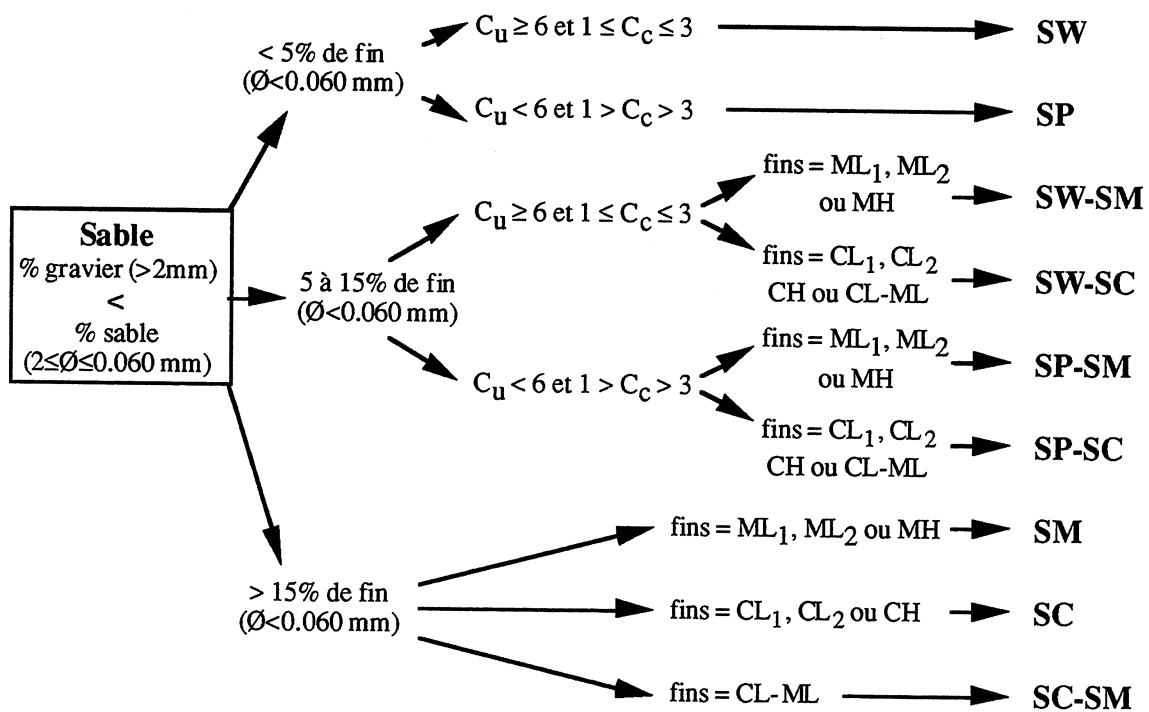


Fig. 5.8 Proposition de classification des sables

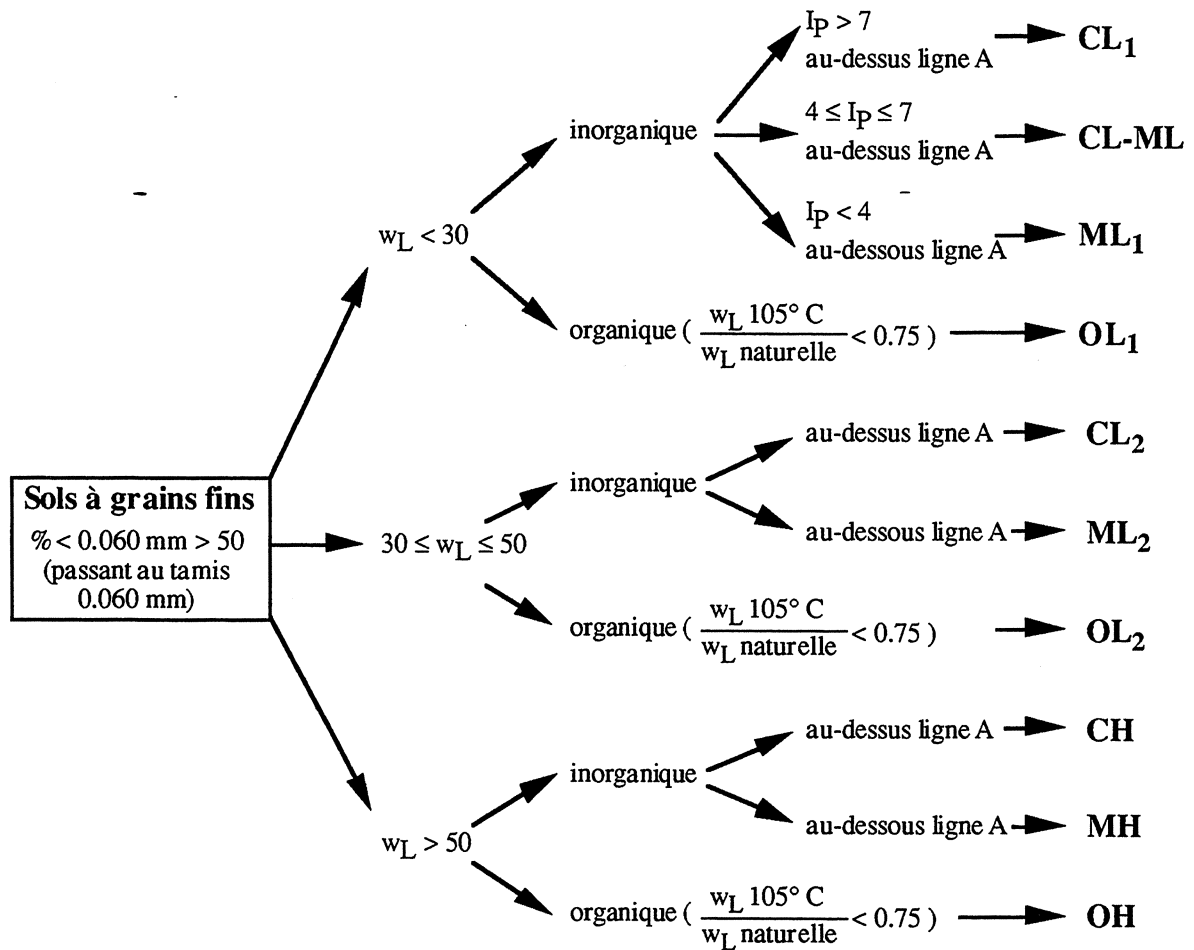


Fig. 5.9 Proposition de classification des sols fins : schéma.

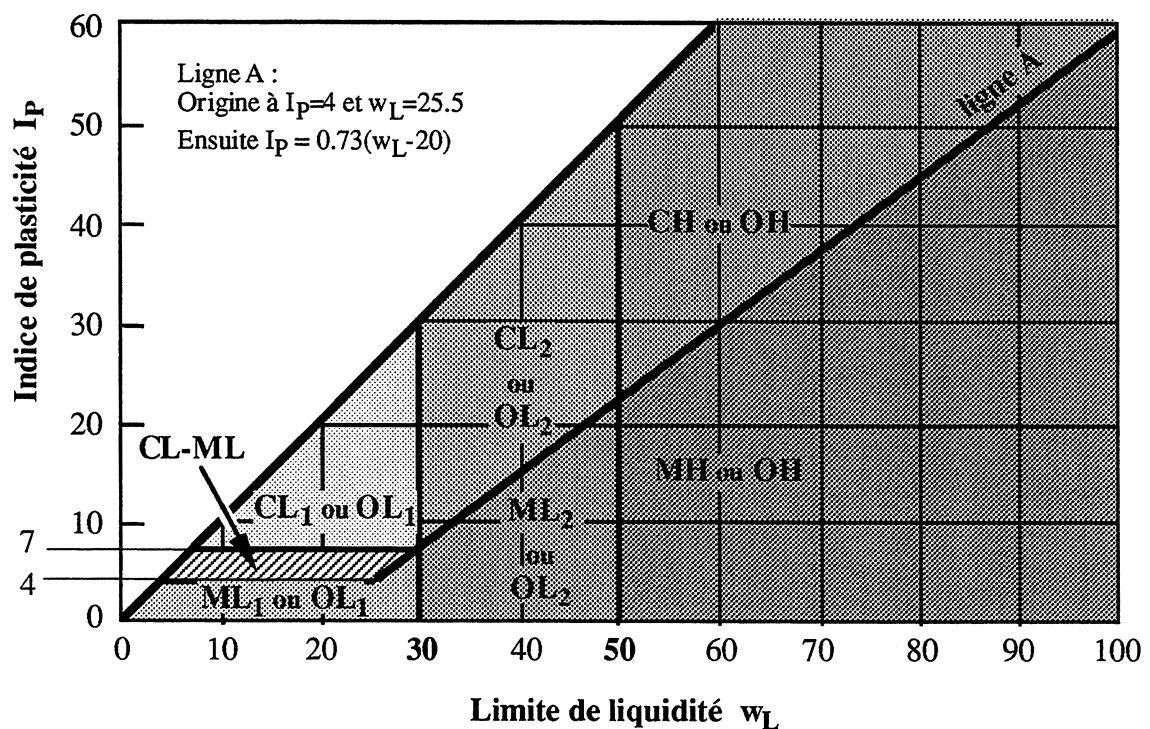


Fig. 5.10 Proposition de classification des sols fins : diagramme de plasticité.

USCS	Désignation géotechnique (non conforme à SN 670 010)	Granulométrie				Consistance		Masse			Résistance				Déformation			Perméabilité k_D [m·s ⁻¹]
		Argile [%]	Limon [%]	Sable [%]	Gravier + pierres [%]	w _L [%]	I _p [%]	ρ [t·m ⁻³]	w [%]	e ₀ [-]	Φ' [°]	c' [kN·m ⁻²]	Φ' _R ' [°]	c _u [kN·m ⁻²]	C _c [-]	C _s [-]	$\frac{1+e_0}{C_c}$	
ML	Limon raide graveleux ou sableux	7.7 ±6.0 (319)	60.0 ±11.0 (319)	31.2 ±12.6 (319)	1.0 ±3.8 (319)	30.2 ±11.4 (127)	7.6 ±5.3 (127)	1.99 ±0.20 (256)	28.9 ±19.7 (325)	0.77 ±0.51 (233)	33.9 ±7.3 (25)	6.5 ±11.2 (24)		65 ±60 (246)	0.199 ±0.275 (96)	0.013 ±0.011 (42)	19.0 ±14.0 (96)	1.6·10 ⁻⁷ ±3.2·10 ⁻⁷ (56)
ML ₁	Limon raide graveleux ou sableux	6.6 ±3.7 (52)	59.3 ±11.8 (52)	33.2 ±11.0 (44)	1.0 ±4.3 (44)	20.0 ±3.3 (64)	3.1 ±1.2 (64)	2.07 ±0.11 (56)	21.7 ±5.0 (62)	0.60 ±0.15 (52)	35.0 (1)	0.0 (1)		65 ±67 (45)	0.094 ±0.046 (20)	0.005 ±0.004 (3)	21.4 ±13.3 (20)	2.0·10 ⁻⁷ ±2.8·10 ⁻⁷ (9)
ML ₂	Limon graveleux ou sableux	12.5 ±9.3 (55)	61.8 ±13.5 (55)	21.4 ±12.0 (42)	3.0 ±6.0 (42)	40.3 ±6.1 (63)	12.3 ±4.2 (63)	1.74 ±0.18 (47)	51.8 ±25.6 (60)	1.26 ±0.53 (40)	28.8 ±5.2 (10)	11.7 ±11.0 (10)		54 ±63 (21)	0.292 ±0.185 (26)	0.022 ±0.016 (7)	10.41 ±10.66 (26)	1.5·10 ⁻⁷ ±2.6·10 ⁻⁷ (16)
CL	Argile maigre gravel., sableuse et/ou limoneuse	21.7 ±11.0 (1920)	59.0 ±11.6 (1920)	16.0 ±9.9 (1535)	5.6 ±8.1 (1535)	31.9 ±6.6 (2692)	14.8 ±4.8 (2692)	2.07 ±0.12 (2567)	23.1 ±7.2 (2729)	0.65 ±0.19 (2318)	27.1 ±5.2 (189)	6.2 ±11.3 (180)	24.8 ±7.3 (23)	82 ±67 (3028)	0.152 ±0.093 (711)	0.026 ±0.016 (229)	14.6 ±12.2 (711)	2.9·10 ⁻⁸ ±1.3·10 ⁻⁷ (286)
CL ₁	Limon argileux graveleux, sableux et/ou limoneux	16.3 ±6.9 (827)	60.4 ±13.1 (827)	18.6 ±10.0 (708)	6.4 ±8.7 (708)	25.8 ±2.6 (1166)	10.7 ±2.1 (1165)	2.13 ±0.10 (1065)	19.6 ±5.4 (1142)	0.55 ±0.14 (996)	30.7 ±4.1 (67)	4.2 ±8.0 (67)	26.5 (1)	94 ±73 (897)	0.112 ±0.062 (274)	0.018 ±0.011 (93)	18.8 ±16.9 (274)	2.7·10 ⁻⁸ ±1.3·10 ⁻⁷ (100)
CL ₂	Argile maigre gravel., sableuse et/ou limoneuse	26.0 ±11.6 (1095)	57.9 ±10.3 (1095)	13.8 ±9.3 (827)	4.8 ±7.4 (827)	36.6 ±4.8 (1537)	18.0 ±4.0 (1537)	2.03 ±0.11 (1543)	25.5 ±7.4 (1628)	0.72 ±0.20 (1360)	25.0 ±5.1 (109)	8.1 ±13.3 (107)	24.7 ±7.4 (22)	84 ±66 (1194)	0.178 ±0.100 (437)	0.031 ±0.016 (142)	11.9 ±6.7 (437)	2.9·10 ⁻⁸ ±1.2·10 ⁻⁷ (188)
OL	Limon organique graveleux ou sableux	6.8 ±6.0 (25)	64.2 ±10.8 (25)	29.4 ±10.7 (18)	2.3 ±3.6 (18)	40.0 ±6.6 (23)	12.6 ±5.1 (23)	1.72 ±0.14 (23)	46.3 ±9.5 (22)	1.22 ±0.30 (18)	32.8 ±2.2 (4)	2.5 ±5.0 (4)		26 ±19 (7)	0.295 ±0.213 (12)		10.3 ±5.9 (12)	6.5·10 ⁻⁸ ±6.2·10 ⁻⁸ (13)
OL ₁	Limon raide organique graveleux ou sableux	8.0 (2)	56.0 (2)	39.0 (1)	0.0 (2)	29.0 (2)	5.4 (2)	1.72 (2)	49.4 (2)	1.42 (2)	35.0 (1)	10.0 (1)			0.366 (1)		7.3 (1)	1.0·10 ⁻⁸ (1)
OL ₂	Limon organique graveleux ou sableux	8.5 ±5.8 (18)	64.4 ±12.2 (18)	29.4 ±10.7 (18)	2.3 ±3.5 (18)	41.0 ±4.8 (21)	13.3 ±4.8 (21)	1.72 ±0.15 (21)	49.0 ±14.2 (23)	1.30 ±0.42 (19)	32.0 (3)	0.0 (3)		22 ±22 (7)	0.316 ±0.219 (13)	0.076 (2)	10.1 ±5.8 (13)	7.8·10 ⁻⁸ ±8.1·10 ⁻⁸ (12)
Légende :		± = écart type				() = nombre de valeurs (voir remarque dans texte)				c _u = compression simple, pénétromètre de poche et scissomètre								

Fig. 5.11 Tableau des moyennes et de leur variabilité - Division en deux des sols fins à basse limite de liquidité.

La figure 5.11 donne les caractéristiques des sols de ces nouvelles classes de sols fins : ML_1 , ML_2 , CL_1 , CL_2 , OL_1 , et OL_2 , et les compare avec celles des anciennes : ML , CL , OL .

Dans cette figure, la somme du nombre des valeurs de chaque sous-classe 1 et 2 ne correspond pas au nombre des valeurs de la classe correspondante. Il faut, en effet, connaître la valeur de la limite de liquidité pour effectuer la division en deux sous-classes et cette valeur n'est pas connue pour tous les échantillons des classes correspondantes.

On constate sur cette figure que, pour les valeurs caractérisant la déformabilité (indice de vide e_0 , indice de compression C_c et indice de gonflement C_s) et la résistance (angle de frottement effectif Φ' et cohésion c'), la différence entre les deux sous-classes est importante. Il en est de même pour la masse volumique ρ et la teneur en eau w . Cette différence est surtout significative pour les CL où le nombre important des valeurs détermine des moyennes et des écart-types plausibles. Cela montre que la division en deux des sols fins à basse limite de liquidité est judicieuse pour l'ingénieur.

Les rapports entre les valeurs des c_u ne sont pas significatifs car ces valeurs couvrent des sols consolidés et surconsolidés sans que l'on puisse les différencier.

Enfin, on remarquera que les perméabilités ne sont presque aucunement influencées par la division en deux sous-classes.

L'indication du **degré de consolidation** est très importante, ceci de notre point de vue et aussi de celui de plusieurs des personnes ayant répondu au questionnaire qui est discuté au chapitre 6. En effet, le comportement mécanique d'un sol, sur le plan des déformations comme sur celui de sa résistance limite, dépend étroitement de son mode de consolidation : sous-consolidé, normalement consolidé ou surconsolidé, ainsi que de l'importance de son degré de sous ou de surconsolidation.

Le paramètre qui décrit sans ambiguïté le degré de consolidation d'un sol est l'OCR (OverConsolidation Ratio). Il est défini par la relation suivante :

$$OCR = \frac{\sigma'_m}{\sigma'_0}$$

avec :

σ'_m = contrainte (en général verticale) maximum effective de toute l'histoire de l'élément de sols considéré

σ'_0 = contrainte effective actuelle de l'élément de sols considéré.

Si la contrainte régnant actuellement dans un élément de sol peut être évaluée avec une bonne précision, il n'en est pas de même pour la contrainte maximum de toute l'histoire du sol. C'est pour cela que le degré de consolidation est évalué sur la base d'autres paramètres caractéristiques du sol comme la cohésion apparente, obtenue par un pénétromètre de poche, un scissomètre ou un essai de compression simple, ou encore par sa masse volumique qui eux-mêmes déterminent la consistance du sol.

Un essai œdométrique permet aussi de déterminer l'OCR. C'est même la meilleure méthode à condition d'utiliser la procédure CRS (Constant Rate of Strain) et non pas la procédure standard qui est malheureusement encore trop souvent utilisée.

Pour caractériser le degré de consolidation dans l'USCS, nous proposons, s'il est connu, d'ajouter un indice **u** (under — l'anglais est utilisé pour avoir une uniformité avec l'USCS proprement dit —) pour un sol sous-consolidé, un indice **n** pour un sol normalement consolidé et un indice **o** (over) pour un sol surconsolidé.

Par exemple un limon argileux avec $w_L = 20\%$ et $I_p = 10\%$ se désignerait par **CL_{1n}** s'il est normalement consolidé et par **CL_{1o}** s'il est surconsolidé. Quant à un gravier limono-argileux GC-GM son symbole serait **GC-GM_o** s'il est surconsolidé.

La norme ASTM D 2487 permet encore de désigner, par une description littérale, un sol en fonction de son pourcentage massique de gravier et de sable et de limon. Cette désignation s'appelle "**Nom de groupe**". Elle est très intéressante et pourrait être introduite dans l'éventuelle et future révision des normes SN 670'008 et 670'010 car elle est plus précise que celles figurant dans la norme SN 670 005 et dans le tableau de la norme SN 670'010 et permet notamment de mieux définir la notion d'uniformité ou de non uniformité de la granulométrie. Les figures 5.12 à 5.15 définissent ces différents noms de groupe.

Les figures 5.14 et 5.15, relatives aux sols fins, tiennent compte de la division en deux proposée pour les sols à basse limite de liquidité.

GW	< 15% sable	Gravier bien gradué
	≥ 15% sable	Gravier sableux bien gradué
GP	< 15% sable	Gravier mal gradué
	≥ 15% sable	Gravier sableux mal gradué
GW-GM	< 15% sable	Gravier bien gradué avec limon
	≥ 15% sable	Gravier bien gradué avec limon et sable
GW-GC	< 15% sable	Gravier bien gradué avec argile (ou argile limoneuse)
	≥ 15% sable	Gravier bien gradué avec argile et sable (ou argile limon. et sable)
GP-GM	< 15% sable	Gravier mal gradué avec limon
	≥ 15% sable	Gravier mal gradué avec sable et limon
GP-GC	< 15% sable	Gravier mal gradué avec argile (ou argile limoneuse)
	≥ 15% sable	Gravier mal gradué avec argile et sable (ou argile limon. et sable)
GM	< 15% sable	Gravier limoneux
	≥ 15% sable	Gravier limoneux avec sable
GC	< 15% sable	Gravier argileux
	≥ 15% sable	Gravier argileux avec sable
GM-GC	< 15% sable	Gravier limono-argileux
	≥ 15% sable	Gravier limono-argileux avec sable

Fig. 5.12 Description fine des graviers.

SW	< 15% gravier	Sable bien gradué
	≥ 15% gravier	Sable graveleux bien gradué
SP	< 15% gravier	Sable mal gradué
	≥ 15% gravier	Sable graveleux mal gradué
SW-SM	< 15% gravier	Sable bien gradué avec limon
	≥ 15% gravier	Sable bien gradué avec limon et gravier
SW-SC	< 15% gravier	Sable bien gradué avec argile (ou argile limoneuse)
	≥ 15% gravier	Sable bien gradué avec argile et gravier (ou argile limon. et grav.)
SP-SM	< 15% gravier	Sable mal gradué avec limon
	≥ 15% gravier	Sable mal gradué avec gravier et limon
SP-SC	< 15% gravier	Sable mal gradué avec argile (ou argile limoneuse)
	≥ 15% gravier	Sable mal gradué avec argile et gravier (ou argile limon. et grav.)
SM	< 15% gravier	Sable limoneux
	≥ 15% gravier	Sable limoneux avec gravier
GC	< 15% gravier	Sable argileux
	≥ 15% gravier	Sable argileux avec gravier
GM-GC	< 15% gravier	Sable limono-argileux
	≥ 15% gravier	Sable limono-argileux avec gravier

Fig. 5.13 Description fine des sables.

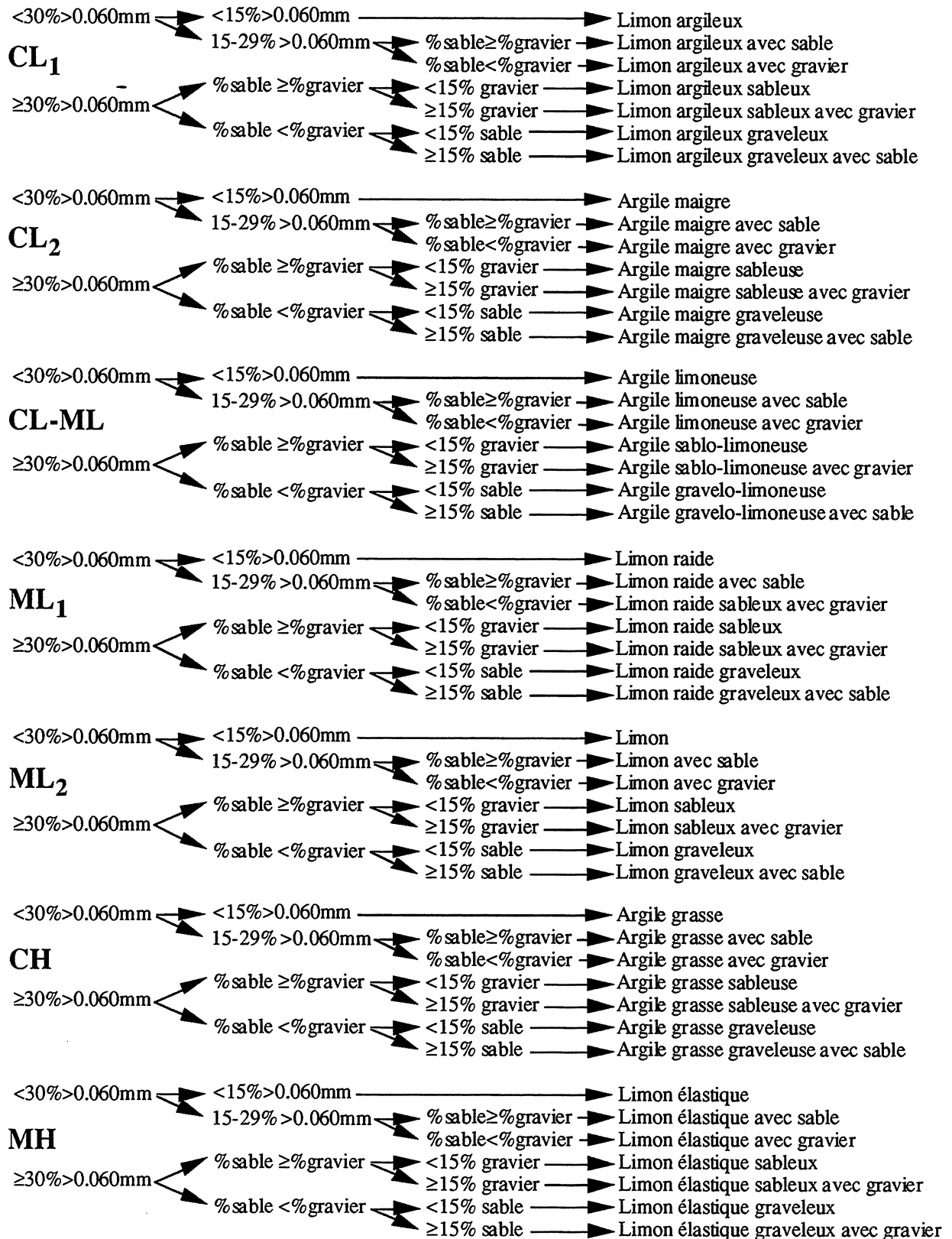


Fig. 5.14 Description fine des sols fins inorganiques.

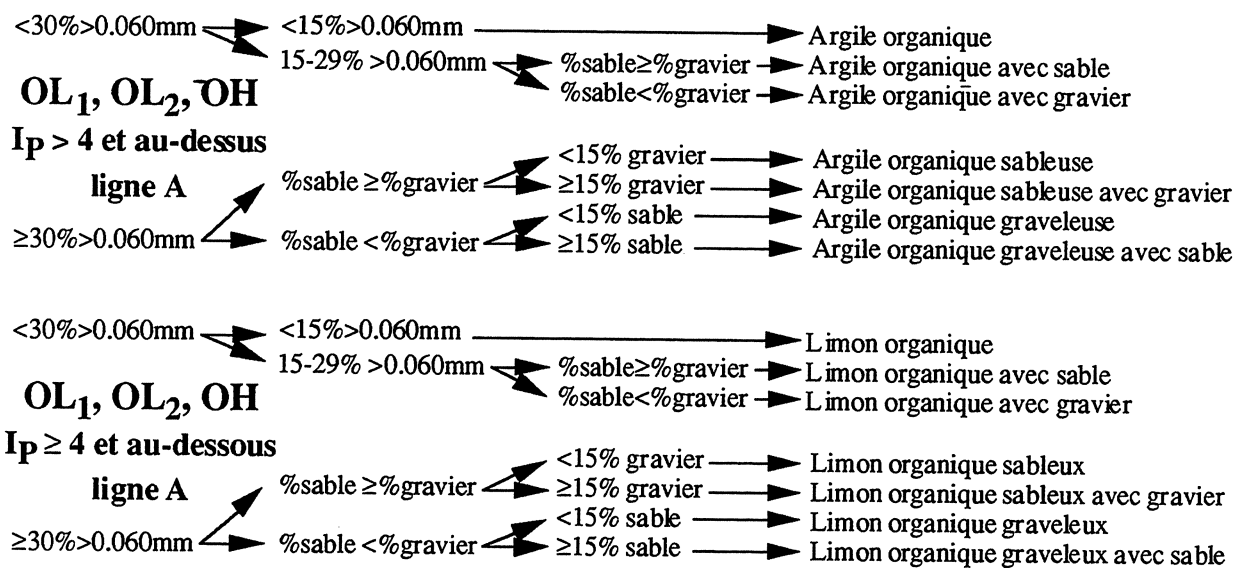


Fig. 5.15 Description fine des sols fins organiques.

6. Classification géologique

6.1 Raisons

Une bonne classification devrait être simple et permettre le classement précis des sols dans tous les domaines où ils interviennent. Ces deux conditions sont, bien entendu, contradictoires et une bonne classification est, avant tout, une classification qui est utilisée dans un large milieu.

Les sols peuvent être classés selon différents critères. Dans le domaine du génie civil ils peuvent être classés selon leur mode de formation géologique, selon leur utilisation, selon leurs caractéristiques mécaniques ou encore selon des critères plus larges englobant l'ensemble de la géotechnique appliquée au génie civil.

Il peut donc y avoir une ou des classifications géologiques et des classifications purement géotechniques et ces deux types de classification des sols peuvent avantageusement se compléter. Le chapitre 5 a traité de la classification géotechnique et nous allons maintenant faire une proposition pour une classification géologique standard des sols suisses.

La classification géologique de loin la plus connue est la classification stratigraphique. Appliquée d'une façon générale, elle n'est pas d'une grande utilité pour l'ingénieur civil qui s'intéresse en premier lieu au mode de formation des sols.

Cependant, dans une région limitée et pour le Quaternaire elle complète souvent et avantageusement la classification géotechnique USCS. Dans ce cadre elle n'est pas utilisée dans sa forme stratigraphique et les descriptions géologiques des sols que l'on rencontre en Suisse dans presque tous les rapports géotechniques sont plutôt un mélange - heureux pour l'ingénieur civil - de la classification stratigraphique et d'éléments génétiques : moraine würmienne, formation de retrait würmien, retrait rissien, etc.

La classification géologiques genevoises des sols du Quaternaire, décrite sur la figure 6.1, en est un excellent exemple. Sa précision n'a cependant de sens que dans un ensemble géologique limité comme c'est le cas pour la région genevoise. Il existe d'autres exemples de classifications géologiques devant compléter la classification USCS comme celle proposée au Canada par Mirza [14].

Les moyens d'information s'automatisant de plus en plus, le besoin d'une classification géologique standard des sols se fait de plus en plus sentir dans le domaine du génie civil.

6.2 Proposition pour une classification géologique standard

Cette classification devrait être avant tout génétique car c'est surtout le mode de formation des sols qui intéresse l'ingénieur civil; il donne en effet des indications d'une grande importance sur la compacité des sols et, en particulier, sur leur degré de surconsolidation. Elle doit aussi être la plus simple possible et diviser, si possible, les sols en classes d'importance comparable.

Sur ces bases, Michel Dysli du Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL, Adalbert Fontana, du bureau de géotechnique genevois "Géotechnique appliquée, P+C Dériaz SA", Aurèle Parriaux du Laboratoire de géologie de l'EPFL et Christian Schlüchter de l'Institut de géologie de l'ETHZ (ordre alphabétique) ont fait une première proposition pour une classification géologique des sols du Quaternaire. Elle fait l'objet de la figure 6.2.

Npc	PRINCIPE DE NUMEROTATION			
	N	No de la formation		
	p	Phases :	a	graveleuse
			b	sableuse
			c	limoneuse
			d	limono-argileuse
			e	argileuse
			f	crayeuse
	c	compacité et consistance :	1	élevée
			1-2	moyenne
			2	faible
1	Terrains récents			
2	Terrain de couverture, sols actuels, remblais < 3 m			
	Remblais > 3 m			
3	Terrains holocènes			
4	Eboulis, formations de pente, colluvions, limons de ruissellement.			
5	Alluvions de terrasses.			
	Dépôts ou vases lacustres, tourbe, craie lacustre.			
6	Terrains glaciaires würmiens			
7	Formations supraglaciaires de retrait			
8	Moraine à cailloux et blocs alpins			
9	Dépôts intramorainiques ou intraformationnels			
	Cailloutis morainiques profonds ou "alluvion ancienne"			
10	Terrains attribués à l'interglaciaire Riss-Würm			
	Interglaciaire			
11	Terrains glaciaires attribués au Riss			
12	Formations de retrait			
13	Moraine à cailloux et blocs alpins			
	Dépôts intramorainiques ou intraformationnels			
14	Substratum rocheux molassique			
15	Complexe de la Molasse grise du Chattien supérieur			
	Complexe de la Molasse rouge du Chattien supérieur			
	EXEMPLES			
6b2	Phase sableuse de faible compacité des formations de retrait des terrains glaciaires würmiens			
9a	Faciès graveleux des cailloutis morainiques profonds des terrains glaciaires würmiens			
11c1	Phase limoneuse préconsolidée des formations de retrait attribuées au Riss			

Fig. 6.1 Classification géologique genevoise.

Symbole	Français	Deutsch	Englisch
Re	Remblai artificiel	Künstliche Auffüllung	Artificial fill
Hv	Horizon végétal	Organische Verlandungsbildung	Organic layer
Co	Colluvion	Gehängeschutt	Colluvial deposit
Eb	Eboulis	Schutthalde	Scree -
Ag	Alluvion graveleuse	Schotter (kiesig)	Gravelly alluvion
As	Alluvion sableuse	Sandige Schotter	Sandy alluvion
Sl	Sédiments à fines laminations	Feingeschichtete Sedimente	Finely stratified sediment
Cr	Craie	Kreide	Boglime
Mb	Moraine bordière	Seiten-und Endmoräne	Lateral moraine
Md	Moraine de fond	Grundmoräne	Ground moraine
Ma	Moraine aquatique	Unterwassermoräne	Waterlaid till
Ra	Roche altérée	Verwitterter Fels	Weathered rock

Fig. 6.2 Première proposition pour une classification géologique standard.

C'est une classification génétique qui se veut simple est probablement suffisante pour la plupart des ouvrages du génie civil fondés, excavés ou forés sur ou dans les sols quaternaires.

Le terme "moraine aquatique" est un peu surprenant. Il désigne une moraine peu consolidée voire sous-consolidée que l'on rencontre relativement fréquemment en Suisse et qui pourrait avoir été formée en aval des langues terminales de glaciers plongeant dans un lac glaciaire; cette configuration glaciaire se rencontre, par exemple, aujourd'hui dans certains lacs glaciaires artificiels comme celui du barrage de Gries près du col du Nufenen.

6.3 Application aux sols suisses

La classification géologique proposée sur la figure 6.2 a été testée sur près de 5000 échantillons provenant de toute la Suisse romande soit de régions allant des Alpes au Jura en passant par la plaine du Rhône, le Plateau et la cuvette genevoise. Un test sur l'ensemble de la Suisse n'a pas été possible car les échantillons du centre et de l'Est de la Suisse n'ont pu être classés selon ce projet de classification géologique. Ces tests ont montré qu'elle est applicable et d'une bonne utilité pour l'ingénieur civil. La figure 6.3 montre les résultats obtenus à l'occasion de ce test.

On remarquera notamment, sur cette figure, les forts pourcentages des classes Sl : sédiments à fines laminations (41.4% de tous les échantillons) et Md : moraine de fond (33.2%). Les Sl classés selon USCS sont essentiellement des ML (les 62.4% de tous les ML sont des sédiments à fines laminations) et des CL (les 71.5% de tous les CL sont des sédiments à fines laminations). Quant à la moraine de fond, elle est surtout constituée par des GM (les 69.8% de tous les GM sont de la moraine de fond) et de GC-CL (les 76.1% de tous les GC-CL sont de la moraine de fond).

Quant au degré de consolidation de ces Sl et Md, les premiers sont plutôt normalement consolidés (les 73% de tous les échantillons dont le c_{up} est inférieur à 50 kPa sont des Sl) et que les second sont plutôt surconsolidés (les 56.6% de tous les échantillons dont le c_{up} est supérieur à 100 kPa sont des Md).

Symb.	Désignation	% échant.	% échantillons compris dans :								
			c_{up} <50	50 - 100	c_{up} <100	GM	GC-CL	SC-CL	SM-ML	ML	CL
Re	Remblai artificiel	0.1	0	0	0	0	0	0.5	0.7	0	0
Hv	Horizon végétal	1.1	0.9	0	0	0	0	0	0	0	0
Co	Colluvion	2.1	2.3	1.9	0.6	0	1.0	3.9	3.2	9.4	1.1
Eb	Eboulis	0.2	0	0	0	0	1.0	0	0	0	0
Ag	Alluvion graveleuse	6.7	0	0	0.6	29.1	1.0	0	3.2	0	0
As	Alluvion sableuse	6.3	5.4	5.7	1.5	0.4	0	1.5	49.4	13.7	0.1
Sl	Sédiments à fines laminations	41.4	73.0	61.7	35.4	0.1	0.5	3.4	13.5	62.2	71.5
Cr	Craie	0.7	2.1	0	0	0	0	0	0.4	3.1	0.5
Mb	Moraine bordière	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2
Md	Moraine de fond	33.2	4.0	13.2	56.6	69.8	76.1	74.2	27.1	9.0	14.6
Ma	Moraine aquatique	7.6	12.3	17.5	5.2	0.6	16.7	14.6	0.6	0.8	11.3
Ra	Roche altérée	0.5	0	0	0.1	0	3.7	1.9	1.9	0	0.3
	Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

c_{up} = résistance (cohésion) au pénétromètre de poche [kPa]
 Le nombre des échantillons avec c_{up} donné ne correspond pas au nombre total car l'essai au pénétromètre de poche n'a été exécuté que sur une partie des échantillons

Fig. 6.3 Répartition des échantillons "suisses romands" selon la première proposition de classification géologique des sols du quaternaire.

6.4 Questionnaire

Un questionnaire sur l'opportunité et le bien-fondé de cette classification géologique a été envoyé, en novembre 1990 aux principaux bureaux et laboratoires de géotechnique de Suisse, ainsi qu'à certaines personnalités du monde de la mécanique des sols et de la géologie. Les réponses proviennent toutes de personnes très connues, ce qui prouve l'intérêt que présente une classification géologique mais cependant pas nécessairement celle proposée. Certaines des réponses traitaient aussi de l'USCS.

L'analyse des réponses fait l'objet de la figure 6.4. Sur cette figure, nous avons respecté l'anonymat des personnes ayant répondu au questionnaire.

La synthèse de toutes les réponses reçues n'est pas facile car certaines sont contradictoires. On peut cependant dégager de l'ensemble des réponses les tendances suivantes :

- Une classification géologique standard des sols est souhaitée et sa nature génétique est la meilleure pour l'ingénieur civil.
- La première proposition de classification est loin d'être parfaite, en particulier parce que les classes Sl: sédiments à fines laminations et Md : moraine de fond regroupent les 3/4 de l'ensemble des échantillons.
- Une classification géologique doit être dissociée de l'USCS et aucune caractéristique géotechnique moyenne ne doit lui être associée.
- Certains termes utilisés dans la classification proposée n'ont pas de sens génétique très clair.

En outre, deux bureaux romands semblent apprécier particulièrement la classification géologique genevoise. A son sujet il faut cependant relever qu'elle est une classification chronologique utilisée un peu comme une classification génétique (elle inclut des paramètres comme le degré de surconsolidation et la granulométrie) et que, souvent, des caractéristiques géotechniques lui sont associés. En se basant sur l'ensemble des réponses elle a ainsi tous les défauts!

Code réponse	Commentaires <i>En italique : commentaires relatifs à l'USCS</i>												
A	Fondamentale : La classification genevoise doit être conservée, dans les profils de sondages elle pourrait être complétée par la classification proposée (réponse d'un bureau genevois!).												
B	Fondamentale : - Deux seules catégories (S1 et Md) représentent les 3/4 des échantillons. La classification proposée devrait ainsi être complétée. - Proposition raisonnable mais à affiner.												
C	Fondamentale : - Utiliser absolument les systèmes internationaux de classification (USCS selon ASTM). - La classification géologique devrait aussi être une classification internationale.												
D	Fondamentale : Des sous-classes pourraient être envisagées notamment pour les S1 et Md et éventuellement pour les Ag et As (torrentielles, fluviales, lacustres)												
E	Fondamentale : - Très favorable à l'introduction d'une classification géologique. - Utiliser les systèmes internationaux de classification : Eurocode. - La classification géologique devrait aussi être une classification internationale.												
F	Fondamentale : - Utiliser les systèmes internationaux de classification (USCS selon ASTM). - Le degré de consolidation (compacité) n'est pas intégré dans la classification proposée alors que la classification genevoise l'intègre. - La nature argileuse et/ou limoneuse n'apparaît pas alors que la classification genevoise l'intègre. - Il manque une classe pour les tourbes et vases. - Favorable au principe d'une telle classification. Détail : - Remplacer le terme "sédiments à fines laminations" par "dépôt stratifié ou varvé".												
G	Fondamentale : - Une subdivision faisant intervenir le degré de consolidation est intéressante. - Favorable à une classification génétique plutôt que chronologique (stratigraphique). Détail : - Les termes "alluvion graveleuse" et "alluvion sableuse" n'ont pas un sens génétique très clair. Proposition : <table border="0"> <tr> <td>Dépôt de couverture</td><td>remblai artificiel terre ou horizon végétal</td></tr> <tr> <td>Formations de versant</td><td>éboulis colluvions</td></tr> <tr> <td>Formations lacustres et palustres</td><td>craie sédiments lacustres sédiments palustres</td></tr> <tr> <td>Formations fluviales</td><td>alluvion fluviale dépôt de crue alluvion deltaïque</td></tr> <tr> <td>Formations glaciaires</td><td>moraine de fond moraine d'ablation (bordière) moraine subaquatique (aquatique)</td></tr> <tr> <td>Formations proglaciaires</td><td>alluvion fluvio-glaciaire sédiments glacio-lacustres (S1)</td></tr> </table>	Dépôt de couverture	remblai artificiel terre ou horizon végétal	Formations de versant	éboulis colluvions	Formations lacustres et palustres	craie sédiments lacustres sédiments palustres	Formations fluviales	alluvion fluviale dépôt de crue alluvion deltaïque	Formations glaciaires	moraine de fond moraine d'ablation (bordière) moraine subaquatique (aquatique)	Formations proglaciaires	alluvion fluvio-glaciaire sédiments glacio-lacustres (S1)
Dépôt de couverture	remblai artificiel terre ou horizon végétal												
Formations de versant	éboulis colluvions												
Formations lacustres et palustres	craie sédiments lacustres sédiments palustres												
Formations fluviales	alluvion fluviale dépôt de crue alluvion deltaïque												
Formations glaciaires	moraine de fond moraine d'ablation (bordière) moraine subaquatique (aquatique)												
Formations proglaciaires	alluvion fluvio-glaciaire sédiments glacio-lacustres (S1)												

Fig. 6.4 Analyse des réponses au questionnaire (suite sur la page suivante).

Code réponse	Commentaires <i>En italique : commentaires relatifs à l'USCS</i>
H	Fondamentale : • <i>La caractérisation géotechnique d'un matériau doit être étendue surtout en ce qui concerne:</i> - <i>le degré de consolidation qui est une caractéristique très importante,</i> - <i>l'homogénéité granulométrique.</i> • Ne pas adjoindre une classification objective : l'USCS et une autre subjective : géologique sans les séparer fortement. En aucun cas corréler la classification géologique avec des caractéristiques de sols.
I	Fondamentale : • <i>Utiliser la classification USCS selon ASTM.</i> • <i>Ajouter les différents types de Molasse, débris molassiques, débris jurassiques, argiles opalines, etc.</i> Détail : • Des codes basés sur l'allemand sont nécessaires en plus de ceux basés sur le français. • Un tableau des caractéristiques des sols du type de celui de la norme SN 670'010 serait nécessaire pour la classification géologique.
J	Fondamentale : • Le groupe S1 : Sédiments à fines laminations, est trop important.. Détail : • Mettre en parallèle les classifications avec leur signature graphique (USCS et classification géologique).
K	Détail : • Le terme "Sédiments à fines laminations" n'est pas génétique

Fig. 6.4 (suite) Analyse des réponses au questionnaire.

Cette classification genevoise est cependant utilisée depuis quelque trente ans avec un très grand succès. Ce succès s'explique par le contexte géologique très restreint sur lequel elle s'applique. En dehors de la cuvette genevoise elle pourrait certes être appliquée mais très probablement avec beaucoup moins de succès voire être la cause de sérieuses déconvenues.

La principale critique de la classification proposée est donc que les classes S1 : sédiments à fine lamination et Md : moraine de fond comprennent un trop grand nombre d'échantillons.

Il faut, tout d'abord, signaler que le nombre d'échantillons n'est pas directement lié à l'importance volumétrique ou surfacique de ces sols. Si ce nombre est important, c'est aussi parce que les sols des classes Md et surtout S1 sont des sols de grande compressibilité et de faible résistance qui exigent des essais en laboratoire pour presque tous les projets de construction. En outre, le fait que l'on rencontre en Suisse surtout des sols de ces deux types génétiques est une évidence géologique. Dans un désert, une classe "sable éolien" serait de loin la plus importante!

Peut-on diviser ces classes tout en gardant le caractère génétique de la classification proposée? Un des bureaux ayant répondu au questionnaire (G) a proposé de diviser les S1 en sédiments glaciolacustres et en sédiments lacustres; le nombre des échantillons de l'ensemble étudié (Suisse romande) provenant de sédiments lacustres est cependant très faible. Ce bureau (Colombi, Schmutz et Dorthé — il a demandé que son nom soit cité—) utilise la classification génétique de la figure 6.5. En plus de la terminologie, ce bureau emploie des clés pour la détermination précise de chacune des classes.

Classification CSD	Correspondance avec la classification proposée (selon CSD)	Symbole de la classification proposée
Sol	Horizon végétal	Hv
Palésol	Horizon végétal	Hv
Altérite	Roche altérée	Ra
Sédiments lacustres riverains ou palustres	Craie Horizon végétal	Cr Hv
Sédiments lacustres de fond	Sédiments à fines laminations	S1
Sédiments glaciolacustres	Sédiments à fines laminations Moraine aquatique	S1 Ma
Alluvions fluviales	Alluvion sableuse	As
Alluvions de ruissellement	Alluvion sableuse Alluvion graveleuse	As Ag
Alluvions torrentielles	Alluvion graveleuse	Ag
Alluvions de delta	Alluvion graveleuse	Ag
Alluvions fluvioglaciaires	Alluvion graveleuse	Ag
Loess		
Eboulis	Eboulis	Eb
Moraine d'ablation	Moraine bordière	Mb
Moraine de fond	Moraine de fond	Md
Colluvions	Colluvions	Co
Coulée de boue		

Fig. 6.5 Classification utilisée par le bureau Colombi, Schmutz et Dorthe (CSD)

La classification CSD est intéressante car elle est plus génétique que celle proposée, notamment pour les alluvions (les adjectifs "sableuse" et "graveleuse" ne sont pas génétiques), sols que l'on rencontre fréquemment en Suisse mais qui font plus rarement l'objet d'essais en laboratoire que les sédiments à fine lamination et que la moraine de fond.

6.5 Proposition

Sur la base de la première proposition énoncée sur la figure 6.2, de la synthèse des réponses au questionnaire et de la classification utilisée par le bureau Colombi, Schmutz et Dorthe (CSD), nous proposons, sur la figure 6.6, une nouvelle classification géologique pouvant être appliquée aux sols des régions alpines et péri-alpines. Elle pourrait nonobstant être complétée pour l'ensemble des sols du quaternaire.

Symbole	Français	Deutsch	Englisch
Re	Remblai	Auffüllung	Fill
Ho	Horizon organique	Organische Verlandungsbildung	Organic layer
Co	Colluvion	Gehängeschutt	Colluvial deposit
Eb	Eboulis	Schutthalde	Scree
Af	Alluvions fluviales	Fluviale Schotter	Fluvial alluvium
Ar	Alluvions de ruissellement	Bachschutt	Running off alluvium
At	Alluvions torrentielles	Bachschotter	Torrential alluvium
Ad	Alluvions de delta	Deltaschotter	Delta alluvium
Ag	Alluvions fluvioglaciaires	Fluvioglaziale Schotter	Fluvioglacial alluvium
Sr	Sédiments lacustres, riverains ou palustres	Seesedimente, Auenlehme, Verlandungsbildung	Lacustrine, riverside or palustrine sediment
Sl	Sédiments lacustres de fond	Seebodenablagerungen	Ground lacustrine sediment
Sg	Sédiments glaciolacustres	Kaltseeablagerungen	Glaciolacustrine sediment
Cr	Craie lacustre	Seekreide	Boglime
Mb	Moraine bordière	Seitenmoräne	Lateral moraine
Mf	Moraine de fond	Grundmoräne	Ground moraine
Ma	Moraine aquatique	Unterwassermoräne	Waterlaid till
Ra	Roche altérée	Verwitterter Fels	Weathered rock
Lo	Loess	Loess	Loess
Cb	Coulée de boue	Schlammstrom	Mudflow

Fig. 6.6 Deuxième proposition pour une classification géologique standard

Références

- [1] M DYSLI, A. FONTANA, A. PARRIAUX, CH. SCHLÜCHTER. Une classification géologique des sols suisses. *Route et trafic No 1*, 1990.
- [2] M DYSLI, A. FONTANA, A. PARRIAUX, CH. SCHLÜCHTER, Eine geologische Klassifikation schweizerischer Lockergesteine. *Strasse und Verkehr Nr 12*, 1990.
- [3] R. E. GIBSON. Experimental determination of the true cohesion and true angle of internal friction in clays. *Proc. of Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Eng.*, Zürich, 1953.
- [4] K. TERZAGHI, R. PECK. *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley, London, 1967.
- [5] NAVDOCKS DM-7. *Design Manual, Soil mechanics, foundations and earth structures*. Depart. of the Navy Bureau of Yards and Docks, Washington DC, 1971.
- [6] A. W.. SKEMPTON, R. D. NORTHEY. The sensitivity of clays. *Geotechnique*. 3. 1952.
- [7] A. HAZEN. Discussion of "Dams on sand foundation", *Trans. American Soc. of Civil Eng. Institute of Canada*, vol 73, 1911.
- [8] C. S. SLICHTER. Theoretical investigation of the motion of ground waters, *Annual Report of the US geological Survey*, part. 2, 1899.
- [9] Classification of highway subgrade materials, *Proc. Highway Research Board*, 1945, Washington DC.
- [10] A. CASAGRANDE. Classification and identification of soils, *Transaction ASCE* 901, 1948.
- [11] Unified Soil Classification System, *Technical memorandum 3-357, US Waterways Experiment Station*, 1953, Vicksburg, Miss.
- [12] ASTM D-2487, Standard method for classification of soils for engineering purposes, *Annual book of standards, ASTM*, Philadelphia, Pa.
- [13] SETRA-LCPC. Recommandation pour les terrassements routiers, 1976.
- [14] C. MIRZA. A case for the extension of the unified soil classification system, *Revue canadienne de géotechnique* 19, 1982.

Symboles et unités

Masse, volume, identification

e	indice de vide	[-]
e_0	indice de vide initial	[-]
γ	poids volumique (apparent) du sol	[kN·m ⁻³]
γ_d	poids volumique du sol sec	[kN·m ⁻³]
γ_s	poids volumique des particules solides	[kN·m ⁻³]
γ_{sat}	poids volumique du sol saturé	[kN·m ⁻³]
γ_w	poids volumique de l'eau	[kN·m ⁻³]
ρ	masse volumique (apparente) du sol	[t·m ⁻³]
ρ_d	masse volumique du sol sec	[t·m ⁻³]
ρ_s	masse volumique des particules solides	[t·m ⁻³]
ρ_{sat}	masse volumique du sol saturé	[t·m ⁻³]
ρ_w	masse volumique de l'eau	[t·m ⁻³]
S_r	degré de saturation	[% ou -]
w	teneur en eau massique	[% de la masse]
w_L	limite de liquidité	[% de la masse]
w_P	limite de plasticité	[% de la masse]
I_P	indice de plasticité	[% de la masse]
I_L	indice de liquidité = $(w - w_P)/I_P$	[-]
I_C	indice de consistance = $(w_L - w)/I_P$	[-]

Hydraulique

k_D	conductivité hydraulique (Darcy) = perméabilité	[m·s ⁻¹]
d_{10}	diamètre des grains à 10% de la courbe granulométrique	[mm]

Résistance

c	cohésion	[kN·m ⁻² = kPa]
c_u	cohésion apparente obtenue par compression simple	[kN·m ⁻² = kPa]
c_{up}	cohésion apparente obtenue par pénétromètre de poche	[kN·m ⁻² = kPa]
c_{us}	cohésion apparente obtenue par scissomètre	[kN·m ⁻² = kPa]
c'	cohésion effective	[kN·m ⁻² = kPa]
Φ'	angle de frottement effectif	[°]

Déformation

C_c	Indice de compression	[-]
C_s	Indice de gonflement	[-]
$E_{\alpha d}$	module œdométrique	[kN·m ⁻² = kPa], [MN·m ⁻² = MPa]
σ_v'	contrainte verticale effective	[kN·m ⁻² = kPa]
σ_{v0}'	contrainte verticale (effective) initiale en place	[kN·m ⁻² = kPa]

Statistique

μ	moyenne	
N	nombre de points	
S	- écart type	-
β_1	coefficient de dissymétrie	
r	degré de corrélation	[-]