



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics

Direction Post-Graduation & Recherche Scientifique

Mémoire de Magister

Option : Matériaux - Structures

Mr. Kamel HAMADACHE

Ingénieur d'Etat en Travaux Publics

Diplômé de l'Ecole Nationale des Travaux Publics

Intitulé du Mémoire

**Analyse statistique de quelques modèles prédictifs
de la perméabilité des sols saturés (K) à partir de la
base de données SoilVision 3.0**

Devant le Jury composé de :

| | | |
|-----------------------|---------------------|--------------------------------|
| Président : | HADID M. | Professeur, ENSTP |
| Directrice de thèse : | DERRICHE Z. | Professeur, ENSTP |
| Examineur : | AMDOUN R. | Maître de Recherche A, INRF |
| Examineur : | LEFKIR A. | Maître de conférences B, ENSTP |
| Examineur : | BENAMGHAR A. | Maître de conférences B, ENSTP |

Dédicaces

A Mes Défunts Parents

A ma grande famille, frères et sœurs

A ma femme

A mon fils, Facine

Remerciements

Mes sincères remerciements vont aux personnes qui ont contribué au bon déroulement et à l'aboutissement de cette thèse.

En premier lieu, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance au Professeur Z. Derriche, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics d'Alger, qui m'a donné la chance de réaliser ces travaux. Je tiens à la remercier pour avoir accepté de diriger cette thèse avec une formidable compétence. Grâce à son encadrement et à sa disponibilité, il m'a été possible de mener cette thèse à son terme.

Je tiens aussi à dire merci à Monsieur M. Hadid, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics d'Alger pour avoir accepté de présider le jury de cette soutenance.

Remerciements et profonde gratitude vont également au Docteur A. Benamghar, Maître de Conférences B à l'Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics d'Alger pour avoir accepté d'examiner ce travail.

J'exprime ainsi toute ma reconnaissance à Monsieur A. Lefkir, Maître de Conférence B à l'Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics d'Alger, pour avoir accepté de faire partie des membre du jury.

J'adresse aussi mes sincères remerciements au Docteur R. Amdoun, Maître de Recherche A à l'Institut National de la Recherche Forestière qui a également accepté d'être parmi les membres du jury de ce mémoire.

Je remercie également M^{me}. R. Mouhri du laboratoire ainsi que les bibliothécaires pour leur aide et leur assistance tout au long de mon travail.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude aux collègues Chercheurs de l'INRF pour leur soutien et leur aide particulièrement M^{me}. F. Sahli.

Je remercie toute personne ayant participé de près où de loin à la réalisation de ce travail.

Liste des tableaux.

Tableau 1. Coefficient de corrélation en fonction de la température ambiante C° .

Tableau 2. Modèles prédictifs de la perméabilité des sols saturés.

Tableau 3. Tableau d'analyse de la variance.

Tableau 4. Modèle de régression, ANOVA et R^2 .

Tableau 5. Modèle de régression, ANOVA et R^2 après accommodation.

Tableau 6. Comparaison des formules des trois meilleurs modèles prédictifs de K .

Liste des figures.

Figure 1.1. Structure informatique générale des données de sols (SoilVision 3.0.)

Figure 1.2. Organisation logique géotechnique des données.

Figure 1.3. Table de recherche des sols selon les paramètres de sélection retenus.

Figure 2.1. Trajectoire schématisant la circulation réelle de l'eau au travers d'une section de sol.

Figure 2.2. Trajectoire schématisée de la circulation de l'eau au travers d'une section de sol.

Figure 2.3. Schéma du dispositif permettant l'expression de la loi de Darcy.

Figure 2.4. Zone d'écoulement laminaire et turbulent d'après Taylor (1948)

Figure 4.1. Intervalle de confiance de la pente et Intervalle de confiance d'une prévision.

Figure 4.2. Distribution normale des résidus (**A**) et représentation graphique des résidus en fonction de \hat{y} (**B**) dans le cas où les hypothèses sur les résidus sont vérifiées.

Figure 4.3. Représentation graphique des résidus en fonction de \hat{y} dans le cas d'une hétéroscédasticité.

Figure 5.1. Classification des sols selon leurs pourcentages d'argile, de limon et de sable.

Figure 6.1. Graphique des résidus (**A**) et de normalité (**B**) du modèle de régression de Kozeny₁₉₆₂. (Sols argileux).

Figure 6.2. Graphique des résidus (**A**) et de normalité (**B**) du modèle de régression de Slichter₁₉₆₂. (Sols argileux).

Figure 6.3. Graphique des résidus (**A**) et de normalité (**B**) du modèle de régression de Beyer₁₉₆₄. (Sols argileux).

Figure 6.4. Graphique des résidus (**A**) et de normalité (**B**) du modèle de régression de Terzaghi₁₉₈₁. (Sols argileux).

Figure 6.5. Graphique des résidus (**A**) et de normalité (**B**) du modèle de régression de Rawls₁₉₈₃. (Sols argileux).

Figure 6.6. Graphique des résidus (**A**) et de normalité (**B**) du modèle de régression de Zamarin₁₉₉₂. (Sols argileux).

Figure 6.7. Graphique des résidus (**A**) et de normalité (**B**) du modèle de régression de Kruger₁₉₉₂. (Sols argileux).

Figure 6.8. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de USBR₁₉₉₂. (Sols argileux).

Figure 6.9. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Rawls₁₉₉₃. (Sols argileux).

Figure 6.10. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Kozeny₁₉₆₂. (Sols limoneux-sableux).

Figure 6.11. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Slichter₁₉₆₂. (Sols limoneux-sableux).

Figure 6.12. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Beyer₁₉₆₄. (Sols limoneux-sableux).

Figure 6.13. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Terzaghi₁₉₈₁. (Sols limoneux-sableux).

Figure 6.14. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Rawls₁₉₈₃. (Sols limoneux-sableux).

Figure 6.15. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Zamarin₁₉₉₂. (Sols limoneux-sableux).

Figure 6.16. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Kruger₁₉₉₂. (Sols limoneux-sableux).

Figure 6.17. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de USBR₁₉₉₂. (Sols limoneux-sableux).

Figure 6.18. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Rawls₁₉₉₃. (Sols limoneux-sableux).

Figure 6.19. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Kozeny₁₉₆₂. (Sols sableux).

Figure 6.20. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Slichter₁₉₆₂. (Sols sableux).

Figure 6.21. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Beyer₁₉₆₄. (Sols sableux).

Figure 6.22. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Terzaghi₁₉₈₁. (Sols sableux).

Figure 6.23. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Rawls₁₉₈₃. (Sols sableux).

Figure 6.24. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Zamarin₁₉₉₂. (Sols sableux).

Figure 6.25. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Kruger₁₉₉₂. (Sols sableux).

Figure 6.26. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de USBR₁₉₉₂. (Sols sableux).

Figure 6.27. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Rawls₁₉₉₃. (Sols sableux).

Figure 6.28. Droite de regression de $K_{Kozeny1962}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$). (Sols argileux - Après accommodation).

Figure 6.29. Droite de regression de $K_{Slichter1962}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$). (Sols argileux- Après accommodation).

Figure 6.30. Droite de regression de $K_{Beyer1964}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$). (Sols argileux- Après accommodation).

Figure 6.31. Droite de regression de $K_{Terzaghi1981}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$). (Sols argileux- Après accommodation).

Figure 6.32. Droite de regression de $K_{Rawls1983}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$). (Sols argileux- Après accommodation).

Figure 6.33. Droite de regression de $K_{Zamarin1992}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$). (Sols argileux- Après accommodation).

Figure 6.34. Droite de regression de $K_{Kruger1992}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$). (Sols argileux- Après accommodation).

Figure 6.35. Droite de regression de $K_{USBR1992}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$). (Sols argileux- Après accommodation).

Figure 6.36. Droite de regression de $K_{Rawls1993}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$). (Sols argileux- Après accommodation).

Figure 6.37. Droite de regression de $K_{Kozeny1962}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$). (Sols limoneux-sableux- Après accommodation).

Figure 6.38. Droite de regression de $K_{Slichter1962}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$). (Sols limoneux-sableux- Après accommodation).

Figure 6.39. Droite de regression de $K_{Beyer1964}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$). (Sols limoneux-sableux).

Figure 6.40. Droite de regression de $K_{Terzaghi1981}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$). (Sols limoneux-sableux- Après accommodation).

Figure 6.41. Droite de regression de $K_{Rawls1983}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$). (Sols limoneux-sableux- Après accommodation).

Figure 6.42. Droite de regression de $K_{Zamarin1992}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$). (Sols limoneux-sableux- Après accommodation).

Figure 6.43. Droite de regression de $K_{Kruger1992}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$). (Sols limoneux-sableux- Après accommodation).

Figure 6.44. Droite de regression de $K_{USBR1992}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$). (Sols limoneux-sableux- Après accommodation).

Figure 6.45. Droite de regression de $K_{Rawls1993}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$). (Sols limoneux-sableux- Après accommodation).

Figure 6.46. Droite de regression de $K_{Kozeny1962}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$). (Sols sableux- Après accommodation).

Figure 6.47. Droite de regression de $K_{Slichter1962}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$). (Sols sableux- Après accommodation).

Figure 6.48. Droite de regression de $K_{\text{Beyer}_{1964}}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{\text{mesuré}}$ ($m/s \times 10^{-6}$). (Sols sableux- Après accommodation).

Figure 6.49. Droite de regression de $K_{\text{Terzaghi}_{1981}}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{\text{mesuré}}$ ($m/s \times 10^{-6}$). (Sols sableux- Après accommodation).

Figure 6.50. Droite de regression de $K_{\text{Rawls}_{1983}}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{\text{mesuré}}$ ($m/s \times 10^{-6}$). (Sols sableux- Après accommodation).

Figure 6.51. Droite de regression de $K_{\text{Zamarin}_{1992}}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{\text{mesuré}}$ ($m/s \times 10^{-6}$). (Sols sableux- Après accommodation).

Figure 6.52. Droite de regression de $K_{\text{Kruger}_{1992}}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{\text{mesuré}}$ ($m/s \times 10^{-6}$). (Sols sableux- Après accommodation).

Figure 6.53. Droite de regression de $K_{\text{USBR}_{1992}}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{\text{mesuré}}$ ($m/s \times 10^{-6}$). (Sols sableux- Après accommodation).

Figure 6.54. Droite de regression de $K_{\text{Rawls}_{1993}}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{\text{mesuré}}$ ($m/s \times 10^{-6}$). (Sols sableux- Après accommodation).

Figure 6.55. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Kozeny₁₉₆₂ après accommodation. (Sols argileux- Après accommodation).

Figure 6.56. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Slichter₁₉₆₂ après accommodation. (Sols argileux- Après accommodation).

Figure 6.57. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Beyer₁₉₆₄ après accommodation. (Sols argileux- Après accommodation).

Figure 6.58. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Terzaghi₁₉₈₁ après accommodation. (Sols argileux- Après accommodation).

Figure 6.59. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Rawls₁₉₈₃ après accommodation. (Sols argileux- Après accommodation).

Figure 6.60. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Zamarin₁₉₉₂ après accommodation. (Sols argileux- Après accommodation).

Figure 6.61. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Kruger₁₉₉₂ après accommodation. (Sols argileux- Après accommodation).

Figure 6.62. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de USBR₁₉₉₂ après accommodation. (Sols argileux- Après accommodation).

Figure 6.63. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Rawls₁₉₉₃ après accommodation. (Sols argileux- Après accommodation).

Figure 6.64. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Kozeny₁₉₆₂ après accommodation. (Sols limoneux-sableux- Après accommodation).

Figure 6.65. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Slichter₁₉₆₂ après accommodation. (Sols limoneux-sableux- Après accommodation).

Figure 6.66. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Beyer₁₉₆₄ après accommodation. (Sols limoneux-sableux- Après accommodation).

Figure 6.67. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Terzaghi₁₉₈₁ après accommodation. (Sols limoneux-sableux- Après accommodation).

Figure 6.68. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Rawls₁₉₈₃ après accommodation. (Sols limoneux-sableux- Après accommodation).

Figure 6.69. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Zamarin₁₉₉₂ après accommodation. (Sols limoneux-sableux- Après accommodation).

Figure 6.70. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Kruger₁₉₉₂ après accommodation. (Sols limoneux-sableux- Après accommodation).

Figure 6.71. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de USBR₁₉₉₂ après accommodation. (Sols limoneux-sableux- Après accommodation).

Figure 6.72. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Rawls₁₉₉₃ après accommodation. (Sols limoneux-sableux- Après accommodation).

Figure 6.73. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Kozeny₁₉₆₂ après accommodation. (Sols sableux- Après accommodation).

Figure 6.74. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Slichter₁₉₆₂ après accommodation. (Sols sableux- Après accommodation).

Figure 6.75. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Beyer₁₉₆₄ après accommodation. (Sols sableux- Après accommodation).

Figure 6.76. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Terzaghi₁₉₈₁ après accommodation. (Sols sableux- Après accommodation).

Figure 6.77. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Rawls₁₉₈₃ après accommodation. (Sols sableux- Après accommodation).

Figure 6.78. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Zamarin₁₉₉₂ après accommodation. (Sols sableux- Après accommodation).

Figure 6.79. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Kruger₁₉₉₂ après accommodation. (Sols sableux- Après accommodation).

Figure 6.80. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de USBR₁₉₉₂ après accommodation. (Sols sableux- Après accommodation).

Figure 6.81. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Rawls₁₉₉₃ après accommodation. (Sols sableux- Après accommodation).

Figure 6.82. Représentation graphique du classement selon R^2 des modèles predictifs de K en fonction du type de sol. (Après accommodation).

Figures 6.83. Représentation graphique de la relation entre la porosité et le types de sol.

Figures 6.84. Représentation graphique de la relation entre $K_{mesuré}$ et la porosité n .

Figures 6.85. Représentation graphique de la relation entre $K_{mesuré}$ et le diamètre effectif d_e .

Figures 6.86. Représentation graphique de la relation entre $K_{mesuré}$ et le produit $d_e^2 \times [n/(1-n)]$.

Figures 6.87. Perméabilité mesurée ($K_{mesuré}$) en fonction de $1/S^2$ (surface spécifique).

Liste des symboles et des abréviations

| | |
|--|---|
| d_i^g et d_i^d : diamètre maximum et minimum de la fraction considérée. | H_1 : hypothèse alternative notée. |
| Δg_i : Poids de la fraction i du matériau. | h_{ii} : le levier de l'observation. |
| p : Pression. | K : coefficient de perméabilité. |
| v : Vitesse. | k_0 : facteur des formes. |
| τ : Coefficient de corrélation de température. | $K_{mesurée}$: Perméabilité mesurée. |
| γ_p : poids volumétrique unitaire du fluide. | $K_{modèle}$: perméabilité prédite par le modèle. |
| d_e : Diamètre effectif des grains en mm. | L : longueur. |
| Δg_1 : Poids de la dernière fraction fine du matériau. | n : porosité. |
| Φ^x : Porosité totale. | q : débit. |
| ΔH : perte de charge (m). | q_v : débit volumétrique. |
| μ : coefficient de viscosité absolue. | R : rayon. |
| A : section constante irrégulière. | R_1 : Rayon moyen des pores. |
| a : section transversale. | R^2 : coefficient de détermination. |
| A_f : surface de passage d'eau. | R_H : rayon hydraulique. |
| ANOVA : analyse de la variance. | S : Pourcentage de sable. |
| C : Pourcentage d'argile. | S_0 : surface mouillée. |
| C_0 : coefficient empirique. | SGBD : système de gestion des bases de données. |
| C_n : coefficient empirique qui dépend de la porosité. | S_t : surface totale. |
| C_s : coefficient de forme. | S_v : surface des vides. |
| d_l : diamètre de la dernière fraction du matériau analysé ($d_l < 0,0025$). | T : facteur de tortuosité. |
| d_{10} : Diamètre correspondant aux 10% des passants. | v : vitesse de décharge (vitesse de Darcy). |
| d_{20} : Diamètre correspondant aux 20% des passants. | V_d : vitesse de décharge de l'eau. |
| d_e : Diamètre effectif des grains. | v_m : vitesse moyenne. |
| d_i : Diamètre moyen des grains de la fraction observée. | V_s : volume des solides. |
| E : énergie. | γ_w : poids volumique du fluide. |
| e : indice des vides. | x : variable indépendante. |
| h : hauteur. | y : variable dépendante. |
| H : hauteur totale. | \hat{y} : variable dépendante estimée. |
| H_0 : hypothèse nulle. | α_0 et α_1 : coefficients. |
| | γ : poids unitaire du liquide. |
| | Δg_i : Poids de la fraction i du matériau. |
| | ε : terme d'erreur aléatoire non observable. |
| | μ : viscosité. |
| | μ_{10} : coefficient absolu de la viscosité du liquide à la température de 10° C. |
| | μ_t : coefficient absolu de la viscosité du liquide à la température t . |
| | $\Psi(n)$: fonction de la porosité. |
| | Φ^x : porosité totale. |

ملخص

نقدم في هذه الأطروحة نتائج التحليل الإحصائي، بما في ذلك تحليل الانحدار الخطي البسيط، لتسعة نماذج تنبؤية لمعامل النفاذية للتربة المشبعة بالماء قصد دراسة نجاعتها . يستند هذا التحليل على مجموعة من المعطيات المختارة من قاعدة البيانات (SoilVision). يتضمن هذا التحليل دراسة التغيرات (ANOVA) متبوعة بتشخيص للانحدار الخطي البسيط (Regression). بينت النتائج المتحصل عليها أنه من بين النماذج السبعة، ثلاثة يمكن استعمالها للتنبؤ بقيمة معامل النفاذية و لهم : نموذج Kozeny₁₉₆₂ للتربة الطينية ، نموذج Zamarin₁₉₉₂ للتربة الرملية الطمية و نموذج Kruger₁₉₉₂ للتربة الرملية. بالموازاة، بينت دراسة الخصائص الجيوتقنية المعقدة لمعامل النفاذية، أن نجاعة النماذج الثلاثة ناتجة عن أخذها بعين الاعتبار، زيادة عن المسامية التي اعتمدت في جميع النماذج المدروسة، كل أقطار الحبيبات المكونة للتربة عوضاً من اعتمادها سوى على القطر الفعال الذي تعتمد عليه النماذج الأخرى.

كلمات مفتاحية: التحليل الإحصائي - قاعدة البيانات - نماذج التنبؤ - معامل النفاذية - الانحدار الخطي البسيط.

Résumé

Ce mémoire rapporte les résultats d'une analyse statistique, notamment l'analyse de régression de neuf (09) modèles prédictifs de la perméabilité des sols saturés. L'analyse est réalisée avec les données de sols issues de la base de données commercialisée SoilVision 3.0. L'étude de la capacité de prédiction du coefficient de perméabilité de ces modèles a été effectuée par une ANOVA suivie d'un diagnostic de la régression. Les résultats montrent que sur les neuf modèles étudiés seuls trois modèles ressortent comme pouvant servir pour la prédiction de la perméabilité des sols. Il s'agit du modèle de Kozeny₁₉₆₂ pour les sols argileux, du modèle de Zamarin₁₉₉₂ pour les sols limoneux-sableux et celui de Kruger₁₉₉₂ pour les sols sableux. Une analyse approfondie de la spécificité géotechnique du coefficient de perméabilité a permis de montrer que la plus ou moins bonne performance des trois modèles cités découle du fait qu'ils tiennent compte, en plus de la porosité au même titre que les autres modèles, des diamètres des fractions composant les sols d'une manière plus détaillée qu'un diamètre effectif unique que considèrent les autres modèles.

Mots-clés : Analyse statistique, Base de données, Modèles prédictifs, Perméabilité des sols saturés (K), Régression linéaire simple.

Abstract

This dissertation documents a statistical analysis, including a regression analysis, carried out to evaluate the prediction capacity of nine models proposed to estimate the coefficient of permeability of saturated soils. The analysis uses soil data obtained from a commercial data base SoilVision 3.0. The statistical work consisted of an ANOVA followed by a regression analysis. Results obtained have shown that, for the nine models studied, only three can be used to estimate the coefficient of permeability of saturated soils. These are Kozeny₁₉₆₂ model for clayey soils, the Zamarin₁₉₉₂ model for sandy loamy soils and the Kruger₁₉₉₂ model for the sandy soils. A thorough study of the geotechnical meaning and specificity of the permeability parameter, gave foundations to conclude that, the more or less good prediction performance of the three models stems from the fact these models rely on, in addition to porosity as well as do all the other models, a more detailed expression of the grain size distribution than an effective size diameter.

Keys words: Data base, linear regression, Permeability of saturated soils K , Predictive models, Statistical analysis.

Sommaire

Liste des tableaux.
Listes des figures.
Listes des symboles et des abréviations.
ملخص.
Résumé.
Abstract.

INTRODUCTION..... 1

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1. BASE DE DONNEES..... 3

1.1. Qu'est ce qu'une base de données ? 3
1.2. Le système de gestion de base de donnée (SGBD)..... 3
1.3. Les types de base de données 3
1.4. Les bases de données géotechniques..... 4
1.5. Présentation générale de SoilVision 3.0. 4
1.6. Utilisation de la base de données de SoilVision 3.0. 7

CHAPITRE 2. PERMEABILITE DES SOLS SATURES..... 9

2.1. Perméabilité et l'hydraulique souterraine..... 9
2.1.1. Notion de charge hydraulique..... 9
2.1.2. Notion de perte de charge, vitesse d'écoulement..... 10
2.1.3. Loi de Darcy..... 13
2.1.4. Signification du coefficient de perméabilité K 14
2.1.5. Validité de la loi de Darcy..... 16
2.2. Mesure de la perméabilité..... 18
2.2.1. Mesure de la perméabilité en laboratoire..... 18
a. Perméamètre à charge constante..... 18
b. Perméamètre à charge variable..... 19
2.2.2. Mesure de la perméabilité *in situ*..... 19
a. Essai de pompage..... 19
b. Essai ponctuel..... 20
2.2.3. Autres méthodes de mesure de perméabilité..... 21
a. Essai par choc impulsif (pulse test)..... 21
b. Méthode de Porchet..... 21

| | |
|--|-----------|
| CHAPITRE 3. MODELES PREDICTIFS DE LA PERMEABILITE SATUREE | |
| (K). | 22 |
| 3.1. Modèle de Kozeny ₁₉₆₂ | 22 |
| 3.2. Modèle de Slichter ₁₉₆₂ | 23 |
| 3.3. Modèle de Beyer ₁₉₆₄ | 23 |
| 3.4. Modèle de Terzaghi ₁₉₈₁ | 23 |
| 3.5. Modèle de Rawls ₁₉₈₃ | 24 |
| 3.6. Modèle de Zamarin ₁₉₉₂ | 24 |
| 3.7. Modèle de Kruger ₁₉₉₂ | 25 |
| 3.8. Modèle de USBR ₁₉₉₂ | 26 |
| 3.9. Modèle de Rawls ₁₉₉₃ | 26 |
| 3.10. Paramètres des modèles | 26 |
| | |
| CHAPITRE 4. PRESENTATION DE L'ANALYSE STATISTIQUE DE MODELES | 28 |
| 4.1. Analyse de Régression. | 28 |
| 4.2. La régression linéaire simple. | 28 |
| 4.2.1. Modélisation statistique. | 28 |
| 4.2.2. Estimation des paramètres du modèle : Estimateurs des Moindres Carrés. | 29 |
| 4.2.3. Fiabilité de l'estimation de y : Analyse de la variance (ANOVA). | 30 |
| 4.2.4. Interprétations géométriques du modèle: Le coefficient de détermination R^2. | 31 |
| 4.2.5. Intervalle de confiance de la pente et Intervalle de confiance d'une prévision de la courbe de régression. | 32 |
| 4.2.6. Evaluation de la validité du modèle : Analyse des résidus. | 33 |
| | |
| <u>MATERIEL ET METHODES</u> | |
| | |
| CHAPITRE 5. MATERIEL ET METHODES. | 36 |
| 5.1. Utilisation de la base de données SoilVision et extraction des données. | 36 |
| 5.2. Analyse statistique des quelques modèles prédictifs de K. | 37 |
| 5.3. Software. | 37 |
| | |
| <u>RESULTATS ET DISCUSSIONS</u> | |
| | |
| CHAPITRE 6. RESULTATS ET DISCUSSIONS | 38 |
| 6.1. Evaluation des modèles de régression linéaire simple : R^2 et ANOVA. | 38 |
| 6.2. Analyse des résidus. | 40 |
| 6.3. Accommodation des modèles de régression. | 50 |
| 6.3.1. Evaluation des modèles de régression linéaire simple : ANOVA et R^2. | 50 |
| 6.3.2. Evaluation de la validité des modèles de régression : Analyse des résidus. | 60 |
| 6.4. Etude comparative de la prédictivité des modèles en fonction du type de sol. | 71 |
| | |
| CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS | 78 |
| | |
| 8. BIBLIOGRAPHIE | 80 |
| | |
| ANNEXES | 84 |

Introduction

Introduction.

La perméabilité (K) est un paramètre important pour la conception du drainage d'une région, dans la construction de barrage en terre et de digues (Boadu, 2000). Elle est également d'une importance primordiale par rapport à certains problèmes géotechniques, y compris la détermination des pertes par infiltration et des études de stabilité.

Les mesures *in situ* ou au laboratoire de la perméabilité d'un sol sont longues, coûteuses et présentent des incertitudes (Uma et al. 1989). En effet, même si on effectue des mesures sur le même échantillon de sol, les résultats présenteraient une fluctuation ou une variabilité importante qui fait que la perméabilité soit un paramètre difficile à mesurer. Pour ces raisons, de nombreux auteurs ont mis au point des modèles empiriques prédictifs de la perméabilité ($K_{\text{modèle}}$) (Todd et Mays, 2005) à partir des propriétés des sols facilement mesurables telles que la porosité, la granulométrie, la taille des grains effective (Freeze et Cherry, 1979 ; Schwartz and Zhang, 2003). Parmi ces modèles nous pouvons citer : Terzaghi₁₉₈₁, Rawls₁₉₉₃..etc.

Les modèles prédictifs de la perméabilité des sols saturés $K_{\text{modèle}}$ font l'objet d'analyses statistiques par plusieurs auteurs afin d'évaluer leurs prédictions et proposer éventuellement des corrections. Hana et Giméneza (2008) estiment que les courbes de rétention d'eau contiennent des informations qui peuvent être utilisées pour prédire K . Ils ont fait une analyse statistique sur des données de sols européens, tirées de la base de données Hydraulic Properties of European Soils (HYPRES), sur des modèles qui tiennent compte de la rétention d'eau des sols et de leur porosité effective. Ils ont conclu que les modèles étudiés ont besoin de tenir compte au moins des valeurs moyennes de la porosité totale, de la teneur en eau et du potentiel de la pression au point d'inflexion des courbes de rétention d'eau. Odong (2007) a fait une analyse statistique de sept modèles prédictifs de $K_{\text{modèle}}$, sur quatre échantillons de sols, dont le pourcentage de sable est prédominant. Il a mesuré lui-même la perméabilité saturée pour la comparer à celle déterminée par les sept modèles. Il a conclu que le modèle de Beyer donne une meilleure estimation de K pour des sols homogènes et que les meilleures estimations sont celles données par le modèle de Kozeney-Carman. Enfin Chapuis et Aubertin (2003) ont fait une étude sur la validité du modèle de Kozeney-Carman pour tout type de sol. Pour ce faire ils ont recueilli les résultats d'essais provenant de la littérature et contenant les différents paramètres qui permettent la prédiction de K par ce modèle. Ils ont conclu qu'en général ce modèle prédit assez bien la perméabilité saturée, quel que soit le type de sol.

Le but de ce travail est de comparer la prédictivité de la perméabilité (K) des sols saturés de neufs modèles ($K_{\text{modèle}}$). Pour ce faire, nous constituons une série de données tirées de la base de données géotechnique SoilVision (version 3.0.), nous menons une analyse statistique, en vue de sélectionner les meilleurs modèles sur la base de leur performance. Nous cherchons à estimer, selon un modèle de régression linéaire simple, $K_{\text{modèle}}$ en fonction de $K_{\text{mesuré}}$ tiré de SoilVision et qui représente la valeur de la perméabilité mesurée suivant différents types de sols (argileux, limoneux-sableux et sableux). Nous démarrons sur la base qu'un modèle empirique est prédictif si la valeur $K_{\text{modèle}}$ se rapproche de la valeur mesurée.

Dans ce cas, l'intérêt de modéliser est de pouvoir appliquer les outils mathématiques aux modèles de régression obtenus pour l'analyse.

Ce mémoire est organisé comme suit :

- Le chapitre 1 est consacré à la présentation générale de la base de donnée SoilVision 3.0., de sa structure logique et informatique et de son utilisation.
- Le chapitre 2, définit la perméabilité des sols saturés. Nous développons dans ce chapitre la notion d'hydraulique souterraine et de la méthodologie de mesure de la perméabilité (K).
- Le chapitre 3 est consacré à la définition des modèles étudiés prédictifs de K .
- Le chapitre 4 développe les aspects théoriques des méthodes statistiques qui seront utilisées afin d'analyser les modèles prédictifs, à savoir l'analyse de régression, les notions telles que : l'analyse de la régression linéaire simple et de l'analyse des résidus (diagnostic) en vue de valider les modèles.
- Le chapitre 5 présente les méthodes utilisées pour l'exploitation de la base de donnée SoilVision 3.0 ainsi que les méthodes statistiques pour l'analyse des modèles prédictifs.
- Nous présentons dans le chapitre 6 les résultats obtenus et leurs interprétations.
- Nous terminons par une conclusion et des perspectives.

Chapitre 1. Base de données.

1.1. Qu'est ce qu'une base de données ?

Une base de données est un ensemble de données accessibles et exploitables au moyen d'un ensemble de programmes (Bourssier, 2002). La base de données permet de stocker des données de façon structurée et avec le moins de redondance possible. C'est une approche nouvelle et pratique aux problèmes que pose la gestion de l'information.

La base de données est considérée comme une archive informatique des données du passé, du présent et du futur qui touche à tous les côtés de la vie humaine. Il est important de noter que les relations entre les diverses informations sont autant d'informations supplémentaires. Ces liens permettent d'accéder plus rapidement et plus facilement à une information à partir d'une autre (Kramarz et Perrault, 1986 ; Bourssier, 2002).

Ces données sont utilisées par des programmes, et par des utilisateurs différents avec une rapidité et une sécurité qui permettent des gains de temps et d'argent.

1.2. Le système de gestion de base de donnée (SGBD).

Le système de gestion des bases de données (SGBD), est très complexe. Une des tâches principales du SGBD est de masquer à l'utilisateur les détails complexes et fastidieux liés à la gestion de tables de la base de données.

Les tables sont définies comme étant un ensemble de logiciels permettant de mémoriser, manipuler et traiter des ensembles de données tout en assurant pour celles-ci la sécurité, la confidentialité et l'intégrité (Debiche, 2003).

Un Système de Gestion de Bases de Données (SGBD) est donc un logiciel de haut niveau qui permet de manipuler les informations dans une base de données, de stocker, d'interroger et de gérer les données présentes dans la base.

1.3. Les types de base de données

Parmi les modèles phares nous citons (Chrisment et *al* 2005) :

- Le modèle hiérarchique (c'est le modèle le plus ancien, qui n'est plus utilisé).
- Le modèle déductif,
- Le modèle relationnel,
- Le modèle déductif qui est un système définissant les règles qui déduisent ou infèrent des informations à partir des faits stockés dans une base de données. Dans ce modèle, un

langage déclaratif est utilisé pour spécifier les règles. Un mécanisme d'inférence (ou mécanisme de déduction) peut alors déduire de nouveaux faits à partir de la base de données en interprétant les règles (**Rigaux, 1999**)..

- Le modèle relationnel est un formalisme mathématique simple, rigoureux et puissant pour décrire et manipuler les données (**Rigaux, 1999**).

1.4. Les bases de données géotechniques.

La base de données géotechnique est d'un intérêt scientifique, technique et économique considérable. Elle permet de faciliter la circulation de l'information du géotechnicien avec son environnement interne et externe, optimiser les coûts et les délais des campagnes d'investigations géotechniques, avoir un outil d'aide pour les ingénieurs dans la reconnaissance et dans la prise de décision sur les problèmes complexes de géotechnique (M'hamdi, 2009).

Les systèmes d'informations géotechniques ont été développés grâce à l'intégration de méthodes de conception de systèmes qui se basent sur la capacité de pouvoir séparer la structure des données des traitements. Un rapprochement entre concepteurs de systèmes d'informations et experts géotechniciens a donné naissance à l'approche base de données géotechnique (Debiche, 2003).

La base de données géotechnique SoilVision, est une base de données relationnelle déductive basée sur l'environnement Access. Elle permet à l'utilisateur une manipulation facile puisqu'elle présente ses données dans des tableaux clairs, à deux dimensions, reliés entre eux et permet aussi de déduire des informations manquantes à partir des données stockées.

1.5. Présentation générale de SoilVision 3.0.

SoilVision est une application de base de données géotechnique. Elle a l'architecture typique d'un système de gestion des bases de données. Elle stocke les données de plus de 6000 sols dans la base suivant le modèle relationnel classique (figure 1.1). Elle présente un puissant environnement pour la gestion des données de sols. Elle est facile et intuitive à utiliser. Nous pouvons simplement pointer et cliquer pour obtenir des données ainsi que les dernières estimations théoriques ou statistiques basées sur ces mêmes données de laboratoire stockées (capacités de déduction). Le système contient plus de 45 rapports pré-créés et des estimations du comportement du sol (SoilVision user's guide, 2002).



Figure 1.1. Structure relationnelle générale des données de sols (SoilVision 3.0.)

SoilVision présente les données sous forme de tables à deux dimensions reliées entre elles. Elle permet aux utilisateurs de stocker, manipuler et utiliser les données stockées de façon simple et facile et permet aussi d'inférer d'autres informations à partir des données stockées (type déductif).

L'application utilise trois tables bases de données des sols qui sont distribués avec l'application fournie. Ces tables sont identiques dans la structure et ne varient que dans les données des sols qu'ils contiennent et la sécurité mise en place pour chaque table. Les tables de base des données des sols sont décrites comme suit :

SVSoils_Demo.mdb : cette table est une base de données non sécurisée qui contient les informations concernant un petit échantillon de sols. Cette table comme son nom l'indique est conçue pour uniquement mettre en valeur les principales caractéristiques de la base de données. Il n'est pas recommandé d'ajouter des sols dans cette table.

SVSoils_Client.mdb : table non sécurisé utilisée pour faire entrer les données des sols de l'utilisateur. La structure de cette base de données est la même que la DEMO et DATA de base de données mais est initialement vide. Les nouvelles informations des nouveaux sols sont entrées dans cette table.

SVSoils_Data.mdb : est une table sécurisée qui contient des données concernant plus de 6000 sols. Le format de cette base de données est identique à la table DEMO et la table de base de données du client. Cette base de données est fournie dans un format en lecture seule pour les utilisateurs de la version complète de SoilVision. C'est cette table qui contient les données utilisées dans ce travail.

SoilVision utilise Access pour stocker les différentes données avec leurs différents liens. Chaque type de données est sauvegardé dans une table Access différent. Les données sont présentées sous forme de tables liées entre elles.

L'organisation des données géotechniques dans la base de données soilVision est illustrée dans la figure 1.2.

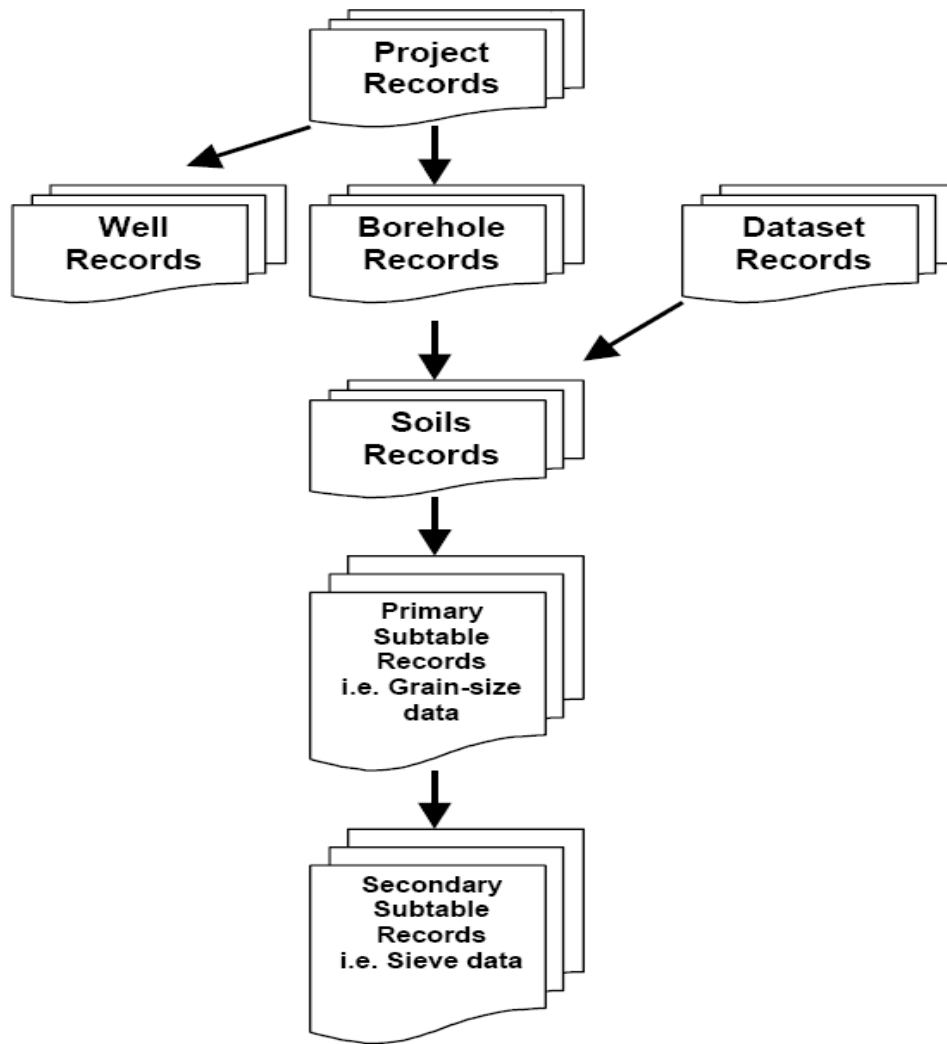


Figure 1.2. Organisation des données géotechniques dans la base de données soilVision.

1.6. Utilisation de la base de données de SoilVision 3.0.

Comme pour toute autre base de données, nous pouvons rechercher certaines données dans SoilVision, en utilisant des requêtes simples. Le système de gestion des bases de données introduit la requête dans le dictionnaire de la base de données. Après analyse et vérification de la validité d'abord syntaxique puis sémantique, la requête est traduite dans le langage de l'ordinateur puis l'optimiseur essaiera d'optimiser et développer si possible les ordres de requête pour donner les meilleures réponses (figure 1.3) (SoilVision user's guide, 2002).

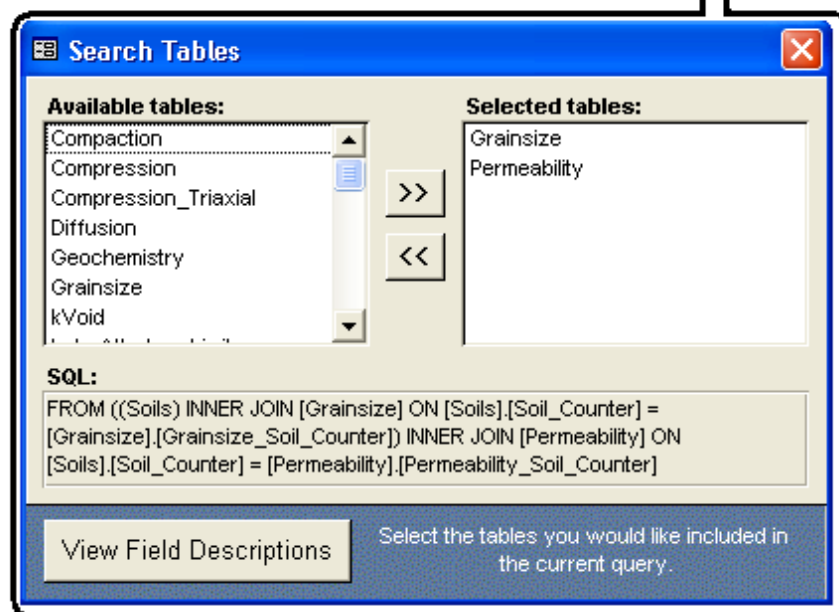
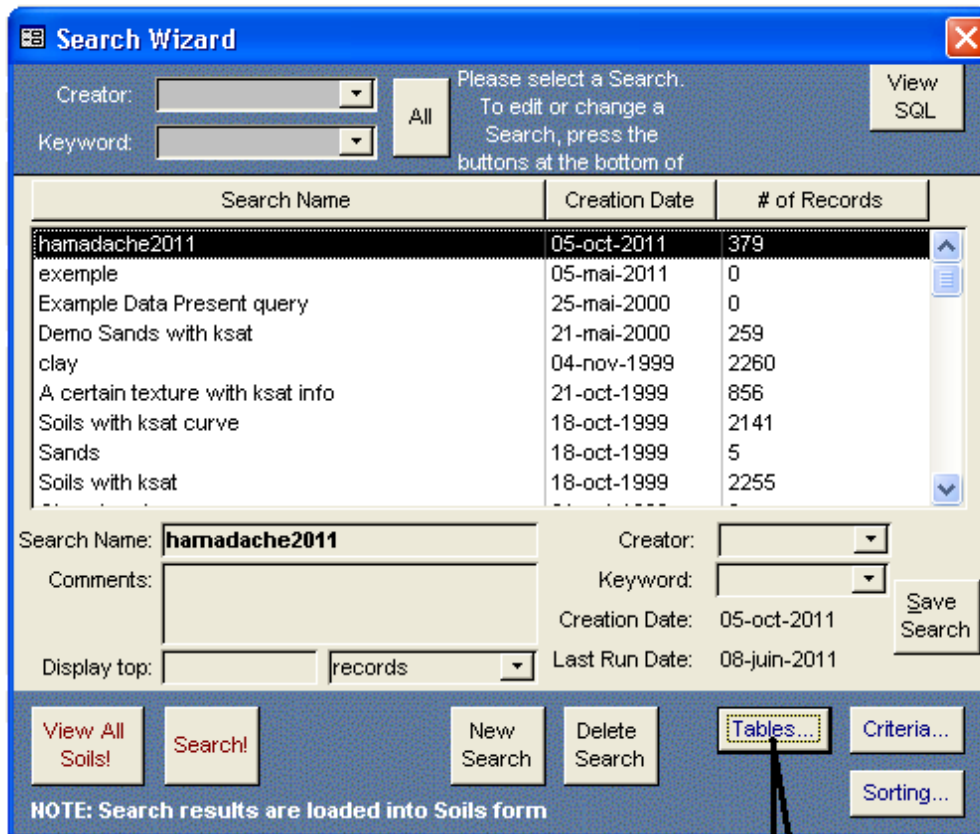


Figure 1.3. Table de recherche des sols selon les paramètres de sélection retenus.

La base de données géotechnique SoilVision permet de faire une étude préliminaire du sol à partir de ses données stockées.

Chapitre 2. Perméabilité des sols saturés.

En hydrologie des eaux souterraines, la connaissance de la perméabilité du sol saturé est nécessaire pour la modélisation de l'écoulement de l'eau dans le sol, tant dans les zones saturées que non saturées. Elle est également un paramètre important pour la conception du drainage d'une région, dans la construction de barrage en terre et de digues. Par ailleurs, elle est d'une importance primordiale par rapport à certains problèmes géotechniques, y compris la détermination des pertes par infiltration et des études de stabilité (Boadu 2000). Différentes techniques ont été proposées pour déterminer sa valeur : les méthodes de mesure *in situ* (essais de pompage des puits, des forages), les méthodes de mesure en laboratoire et de calcul à partir des formules empiriques (Todd et Mays 2005). Cependant les mesures *in situ* ou en laboratoire de la perméabilité d'un sol sont longues et coûteuses et présentent des incertitudes, particulièrement pour les mesures *in situ* où nous sommes limités par le manque de connaissances précises de la géométrie des aquifères et des limites hydrauliques (Uma *et al.* 1989). Depuis longtemps, il est reconnu que la perméabilité est liée à la granulométrie des sols (Freeze et Cherry, 1979). Cette relation est très utile pour l'estimation des valeurs de la perméabilité dans les situations où les données de mesures directes sont rares. De nombreux chercheurs ont mis au point des modèles prédictifs de déduction de la perméabilité à partir des propriétés des sols facilement mesurables telles que la porosité, la granulométrie, la taille effective des grains.

2.1. Perméabilité et l'hydraulique souterraine.

La perméabilité d'un milieu est une caractéristique physique qui représente la facilité qu'à un matériau à permettre le transfert d'un fluide au travers de ce milieu considéré comme un réseau connecté. La perméabilité découle des lois de l'hydraulique souterraine notamment l'écoulement d'un fluide au travers d'un milieu poreux (Lion, 2004).

2.1.1. Notion de charge hydraulique.

L'énergie mécanique d'une particule de fluide de masse m et de volume V comptée par rapport à un plan de référence choisi sera :

$$E_{mécanique} = E_{cinétique} + E_{potentielle} \quad \{2.1\}$$

$$E_{mécanique} = E_{cinétique} + E_{position} + E_{pression} \quad \{2.2\}$$

En écrivant les expressions de chacune de ses composantes (cinétique, position et pression) et en divisant cette énergie par le poids (mg) nous obtenons :

$$E_m = \frac{\gamma_w h}{mg} + \frac{mv^2}{2mg} + \frac{pV}{mg} \quad \{2.3\}$$

Avec :

γ_w : poids volumique du fluide ($kN.m^{-3}$), v sa vitesse (m/s) et h (m) sa hauteur par rapport au plan de référence, p sa pression ($kN.m^{-2}$), g accélération de la pesanteur ($m.s^{-2}$)

Comme $\gamma_w = \frac{mg}{V}$, on aura donc l'équation de Bernoulli dans laquelle H est la charge hydraulique qui représente l'énergie mécanique spécifique de l'eau :

$$H = h + \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma_w} \quad \{2.4\}$$

En prenant en considération que la vitesse de l'eau dans les sols est extrêmement faible, écoulement laminaire (< 10 cm/s), $\frac{v^2}{2g}$ sera comptée négligeable, ce qui transforme l'écriture de l'équation de Bernoulli adoptée en hydraulique souterraine:

$$H = h + \frac{p}{\gamma_w} \quad \{2.5\}$$

Lorsque l'eau s'écoule dans un sol d'un point A à un point B séparés par une distance AB, elle consomme une énergie évaluée à $h_A - h_B$ appelée perte de charge.

2.1.2. Notion de perte de charge, vitesse d'écoulement.

L'interaction de l'eau avec les grains du sol provoque par frottement une perte de charge entre deux points A et B le long d'un écoulement de longueur l de A vers B. En considérant les charges hydrauliques aux points h_A et h_B nous aurons :

$$\Delta h = h_A - h_B \quad \{2.6\}$$

Nous définissons la perte de charge par unité de longueur par i moyen. Lorsque i est variable le long de l'écoulement nous l'appellons gradient :

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad \{2.7\}$$

Pour l'étude des écoulements de l'eau dans les sols, nous considérons que le sol est parfaitement saturé, que les grains et l'eau sont incompressibles et enfin que la phase liquide est partout continue.

Si nous considérons un écoulement d'eau au travers d'une section de sol S_t nous devons reconnaître que pratiquement l'eau ne circule que dans les vides entre les grains, selon une trajectoire tortueuse (figure 2.1). Nous considérerons donc la vitesse moyenne réelle v' et la surface des vides S_v : la vitesse réelle de l'eau, qui est la tangente en chacun des points de la trajectoire est difficile à obtenir eu égard à la tortuosité des trajectoires.

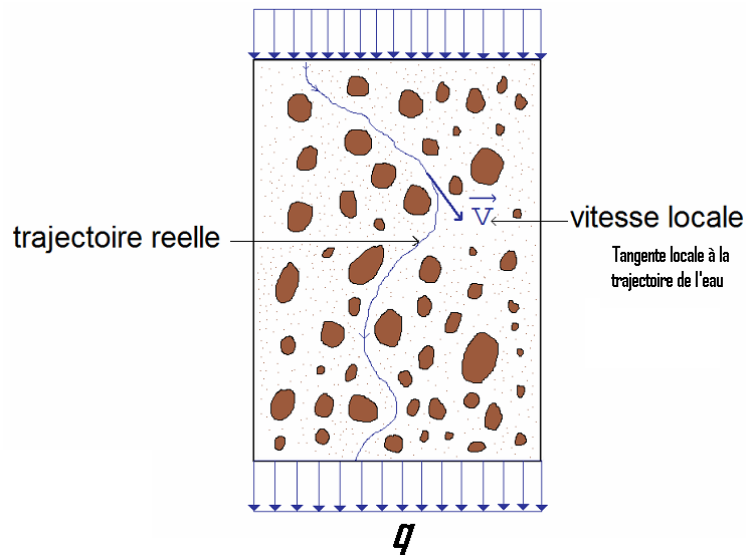


Figure 2.1. Trajectoire schématisant la circulation réelle de l'eau au travers d'une section de sol.

Si nous obtenons un débit q d'eau s'écoulant au travers de la surface totale S_t qui est la somme des surfaces des grains et la surface des vides S_v , nous pouvons définir une vitesse moyenne v_m de l'eau qui s'exprimera par :

$$v_m = \frac{q}{S_v} \quad \{2.7\}$$

Avec :

v_m : vitesse moyenne (m/s)

q : débit (m^3/s)

S_v : surface des vides (m^2)

L'écoulement se produit selon la situation schématisée par la figure 2.2.

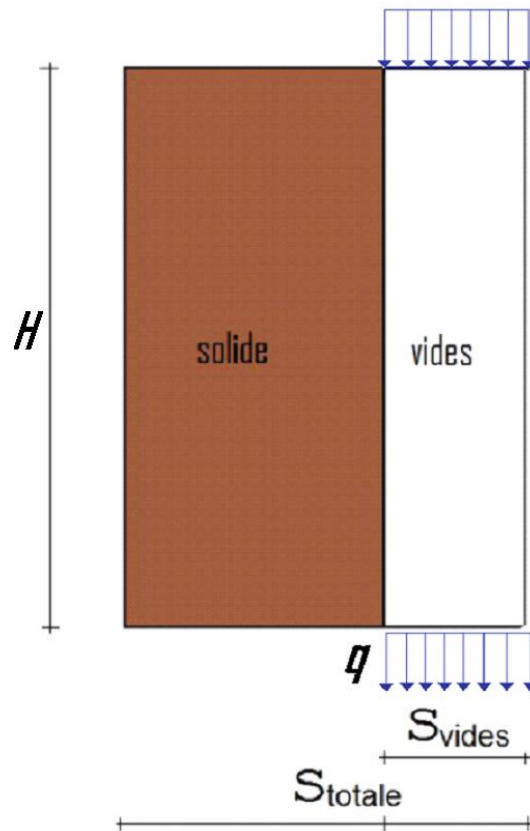


Figure 2.2. Trajectoire schématisée de la circulation de l'eau au travers d'une section de sol.

Nous définissons une vitesse de décharge de l'eau :

$$v_d = \frac{q}{S_t} \quad \{2.8\}$$

Avec

v_d : vitesse de décharge de l'eau (m/s).

$$V_v = nV_t = nS_t H = S_v H \quad \{2.9\}$$

Avec :

V_v : volume des vides (m^3).

V_t : volume total (m^3)

S_t : surface totale (m^2)

H : hauteur (m)

Nous pouvons montrer que :

$$v_m = \frac{q}{S_v} = \frac{q}{nS_t} = \frac{v_d}{n} \quad \{2.10\}$$

v_m : vitesse moyenne de l'eau (m/s).

v_d est la vitesse de décharge de l'eau qui est utilisée dans l'étude des écoulements souterrains. Selon la loi de Darcy présentée ci-après.

2.1.3. Loi de Darcy.

Darcy (1856) a effectué de nombreuses expérimentations afin d'étudier le débit d'écoulement à travers les couches filtrantes de sable. Il a testé des échantillons de sable de différentes épaisseurs et a utilisé une série de pressions d'eau. Une charge hydraulique constante en haut et en bas de l'échantillon est maintenue constante durant le test. Les résultats de ses nombreux tests lui ont permis d'établir la relation de proportionnalité entre la vitesse d'écoulement et le gradient hydraulique.

Nous considérons un tube cylindrique de section S rempli d'un échantillon de sol sur une hauteur l dans lequel nous faisons circuler de l'eau sur une hauteur totale H (dispositif à charge constante) (figure 2.3).

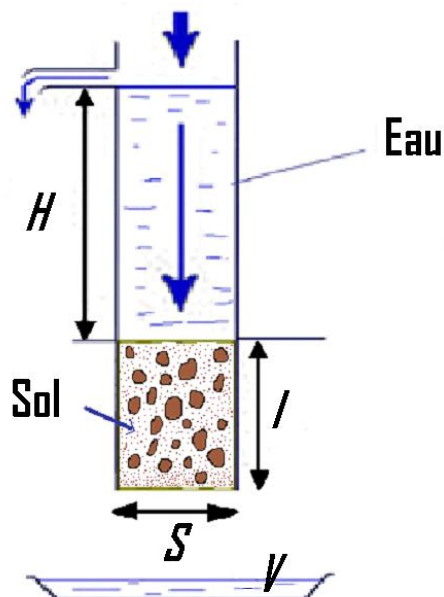


Figure 2.3. Schéma du dispositif permettant l'expression de la loi de Darcy.

Lorsque le milieu est saturé, le débit d'entrée (Q_e) est égal au débit de sortie (Q_s).
L'équation de Darcy s'écrit alors :

$$Q = KS \frac{\Delta H}{l} \quad \{2.11\}$$

K : coefficient de perméabilité de Darcy (m.s^{-1})

S : surface (m^2)

ΔH : perte de charge (m)

$\frac{\Delta H}{l}$: est le gradient hydraulique (i)

En posant :

$$v = \frac{q}{s} \quad \text{et} \quad i = \frac{\Delta h}{l} \quad \{2.12\}$$

La relation se transforme en :

$$v = K.i \quad \{2.13\}$$

C'est l'expression la plus simple de la loi de Darcy, v est la vitesse de décharge appelée vitesse de Darcy telle que présentée dans la section précédente (équation 2.13).

2.1.4. Signification du coefficient de perméabilité K .

La perméabilité ou le coefficient de perméabilité (K), correspond à la conductivité hydraulique. Ce paramètre hydraulique est le volume d'eau qui percole pendant l'unité de temps à travers l'unité de surface d'une section et ceci à la température de 20° C. Nous présentons ci-après les bases qui permettent de comprendre le coefficient K (Lion, 2004).

La loi de Darcy dérive de la loi de Poiseuille qui relie le débit volumétrique q_v au gradient hydraulique i (Mitchel et Soga, 2005).

Lors de l'écoulement d'un fluide de viscosité μ dans un tuyau cylindrique de rayon R et de longueur L tels que $L \gg R$, l'écoulement étant assuré grâce à une différence de pression d'entrée et de sortie du fluide Δh , la loi de Poiseuille s'écrira :

$$q_v = \left[\frac{\gamma_p R^2}{8\mu} \right] \left[\frac{\Delta h}{L} \right] = \left[\frac{\gamma_p R^2}{8\mu} \right] i \quad \{2.14\}$$

q_v : débit volumétrique.

R : rayon du tube.

μ : viscosité du fluide.

γ_p : poids volumétrique unitaire du fluide.

Dans le cas de l'écoulement de l'eau dans un sol, les canaux d'écoulement sont de différentes dimensions, nous définissons alors le rayon hydraulique R_H :

$$R_H = \frac{\text{volume d'eau}}{\text{surface mouillée}} \quad \{2.15\}$$

Dans le cas de l'écoulement dans un tube de section circulaire, le rayon hydraulique s'écrit :

$$R_H = \frac{\pi R^2}{2\pi R} = \frac{R}{2} \quad \{2.16\}$$

L'équation de Poiseuille deviendra :

$$q = \frac{1}{2} \left[\frac{\gamma_p}{\mu} \right] R_H^2 i a \quad \{2.17\}$$

Où a est la section transversale du tube.

Pour des sections autres que cylindrique, cette équation {2.17} s'écrira en fonction d'un coefficient de forme C_s :

$$q = C_s \left[\frac{\gamma_p R_H^2}{\mu} \right] i a \quad \{2.18\}$$

Pour une bande de tube parallèle de section constante mais irrégulière A (solide + vide) la surface de passage d'eau A_f est :

$$A_f = S n A \quad \{2.19\}$$

Où S est le degré de saturation et n la porosité. Dans cette condition le rayon hydraulique est donné par l'équation suivante :

$$R_H = \frac{A_f}{P} = \frac{A_f L}{PL} = \frac{\text{Volume d'eau}}{\text{surface mouillée}} = \frac{V_w}{V_s S_0} \quad \{2.20\}$$

S_0 : est la surface mouillée par unité de volume qui dépend de la taille des grains et peut être considérée comme la surface totale effective par unité de volume de la phase solide.

Pour un indice des vides e et un volume des solides V_s , le volume de l'eau est :

$$V_w = e V_s S \quad \{2.21\}$$

L'équation {2.17} devient:

$$\frac{q}{A} = C_s \left(\frac{1}{S_0} \right) \left(\frac{\gamma_p}{\mu} \right) S^3 \left(\frac{e^3}{1+e} \right) i A \quad \{2.22\}$$

Par analogie avec l'équation de Darcy, on a:

$$K_h = C_s \left(\frac{\gamma_p}{\mu} \right) \left(\frac{1}{S_0^2} \right) \left(\frac{e^3}{1+e} \right) S^3 \quad \{2.23\}$$

Pour les sols parfaitement saturés $S=1$, et en définissant le facteur de forme comme étant égal à $\frac{1}{k_0 T^2}$, où k_0 est le facteur des formes des vides et T est le facteur de tortuosité, on obtient l'équation de Kozeney-Carman :

$$K = K_h \left(\frac{\mu}{\gamma_p} \right) = \frac{1}{k_0 T^2 S_0^2} \left(\frac{e^3}{1+e} \right) \quad \{2.24\}$$

Il ressort de l'expression 2.23 que le coefficient de perméabilité est conditionné par l'indice des vides (e^2) et par la surface spécifique $1/S_0^2$.

Il est aussi affecté par la forme des vides, l'expression de la forme des grains, de la distribution granulométrique et par une mesure de la tortuosité.

2.1.5. Validité de la loi de Darcy.

La loi de Darcy est valide pour la plupart des types d'écoulements dans les sols dont les dimensions vont du sable moyen au limon (Lutz et kemper, 1959). Toutefois, elle présente des déviations pour les sables grossiers et graviers ainsi que pour les sols fins tels que les argiles et les sols limoneux.

La relation entre le flux (débit spécifique) et le gradient hydraulique n'est pas linéaire aux grandes vitesses pour lesquelles les forces d'inerties ne sont pas négligeables devant

les forces de viscosité (Hubbert, 1959). La loi de Darcy est applicable seulement pour les écoulements laminaires (vitesses faibles), et dans le cas où l'interaction sol-eau n'introduit pas de changements dans la fluidité ou la perméabilité en fonction du gradient. Dans les sables et les graviers, des gradients hydrauliques supérieurs à l'unité peuvent développer des conditions d'écoulement non linéaires et la loi de Darcy n'est alors pas applicable.

Pour les sols fins, bien que la loi de Darcy soit généralement valable (Olsen et Daniel, 1981), certains auteurs ont montré des déviations du comportement prévu par la loi de Darcy pour les argiles et les sols argileux (Lutz et Kemper, 1959 ; Hansbo, 1960 ; Miller et Low, 1963 ; Gardner, 1974 ; Sri Rajan et Karthigesu, 1996 ; Zou, 1996 ; Ait Saadi, 2003).

Le gradient seuil apparent est le seuil en dessous duquel le flux est soit nul (l'eau reste apparemment immobile), soit au moins inférieur à celui prédit par la loi de Darcy. Miller et Low (1963), attribuent la présence du gradient seuil à l'existence d'une structure « quasi-cristalline » de l'eau. D'après ces auteurs, les interactions eau-argile étaient responsables de l'alignement théorique des molécules d'eau et qu'une force non nulle est nécessaire pour casser cette structure avant qu'il y ait écoulement. Olsen (1965), a établi que certains gradients seuils apparents peuvent être dus aux erreurs expérimentales non détectées. D'autres facteurs peuvent contribuer dans quelques cas d'observation du gradient seuil à savoir la consolidation locale et le gonflement, une saturation incomplète, et une croissance bactérienne dans les échantillons testés. Ce même auteur a identifié récemment (1972 ; 1985) l'importance de la contribution d'un gradient osmotique (chimique) à l'écoulement dans l'échantillon, pour des gradients hydrauliques faibles.

En résumé, selon la vitesse, l'écoulement hydraulique peut être laminaire, turbulent ou entre les deux c'est-à-dire transitoire, tout dépend du nombre de Reynolds qui exprime le rapport entre les forces d'inerties et les forces visqueuses. Ces différents régimes d'écoulement influencent la relation entre la variation du gradient hydraulique et la vitesse. Taylor (1948) a tracé la courbe montrant cette influence (figure 2.4) :

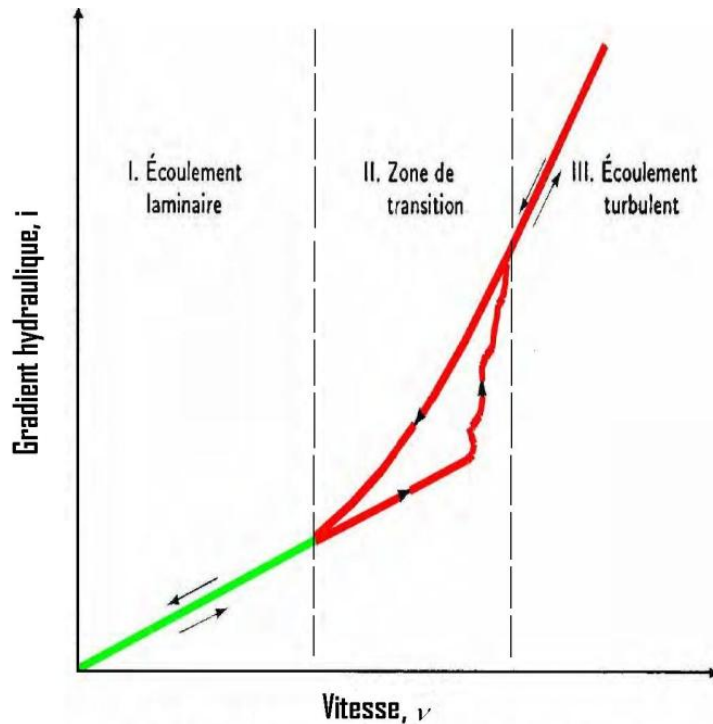


Figure 2.4. Zone d'écoulement laminaire et turbulent d'après Taylor (1948)

Dans un écoulement laminaire la relation est linéaire entre le gradient hydraulique i et la vitesse v . La relation est non linéaire et irréversible dans les écoulements turbulents, ceci est dû à la dissipation d'énergie plus élevée et aux remous. Dans les écoulements transitoires, l'écoulement est entre les régimes laminaire et turbulent.

Dans les sols, la vitesse d'écoulement est plutôt faible (<10 cm/s). Elle est donc souvent proportionnelle au gradient hydraulique selon la loi de Darcy (1856).

2.2. Mesure de la perméabilité.

2.2.1. Mesure de la perméabilité en laboratoire.

Le principe de mesure de la perméabilité en laboratoire est de relier le débit spécifique d'eau q traversant un échantillon cylindrique de sol saturé à la charge h sous laquelle se produit l'écoulement en utilisant la loi de Darcy (équation 2.13).

a. Perméamètre à charge constante.

Cette méthode est utilisée pour les sols de grande perméabilité ($K > 10^{-5}$ m/s) tels que les sables. Pour cette méthode, il est nécessaire de mesurer le débit q .

$$K = \frac{q}{s.i} = \frac{q.l}{s.h} \quad \{2.25\}$$

b. Perméamètre à charge variable.

Cette méthode est utilisée pour des sols de faibles perméabilités ($< 10^{-5}$ m/s) tels que les limoneux et argileux. Elle consiste à faire varier la charge h , d'où l'impossibilité de mesurer le débit q . Nous considérons donc que le volume d'eau dv qui traverse l'échantillon de sol de section S_s est égal à la diminution du volume d'eau dans le tube de section S_t pendant un temps dt pour que le niveau d'eau passe de h_1 à h_2 :

$$dV = q.dt = S.dh \quad \{2.26\}$$

En remplaçant q :

$$S_s = K \cdot \frac{h}{l} . dt = -S_t dh \quad \{2.27\}$$

$$K . dt = -\frac{S_t}{S_s} . l . \frac{dh}{h} \quad \{2.28\}$$

Et après intégration nous aurons :

$$K = \frac{S_t}{S_s} \cdot \frac{l}{t} \cdot \text{Ln} \frac{h_1}{h_2} \quad \{2.29\}$$

2.2.2. Mesure de la perméabilité *in situ*.

Les essais de mesure de la perméabilité en laboratoire sur des échantillons de sols ne rendent pas compte de l'hétérogénéité des formations des sols naturels. Nous procédons alors aux essais de mesure *in situ*. Ces mesures se font généralement sur le terrain par deux types d'essais.

a. Essai de pompage.

Nous réalisons un puits de diamètre suffisant pour descendre une pompe ou une crépine jusqu'au substratum imperméable. Autour de ce puits, nous posons des piézomètres. Nous pompons à débit q constant jusqu'à l'obtention d'un régime permanent et nous suivons le rabattement dans le puits et les piézomètres mis en place préalablement. Nous obtenons pour chaque piézomètre, une valeur de K (perméabilité). Après l'arrêt du pompage, nous

enregistrons la remontée de la nappe dans les piézomètres, ce qui permet de calculer la perméabilité K du terrain.

$$K = q \cdot \frac{\text{Ln} \frac{R}{r}}{\pi \cdot (H^2 - h^2)} \quad \{2.30\}$$

q : Débit d'écoulement

H : Hauteur de la nappe d'eau

h : Hauteur d'eau dans le puits

r : Rayon du puits

R : Rayon d'action du pompage. Il peut être évalué de différentes manières. Soit par relevé du niveau de la nappe au cours du pompage soit à l'aide de formules empiriques : $100 r < R < 300 r$.

L'essai de pompage donne une valeur moyenne de la perméabilité dans un volume très grand. La précision de la mesure obtenue est de l'ordre de 10%.

b. Essai ponctuel

L'essai ponctuel est habituellement exécuté en même temps que le sondage dans le sol. Ce dernier est tubé jusqu'au niveau où doit être effectuée la mesure de perméabilité. A ce niveau est exécutée une cavité limitée par la paroi du sondage et un bouchon étanche. Cette cavité de forme déterminée est caractérisée par un coefficient de forme C (déterminé le plus souvent par analogie électrique). La filtration s'effectue par les parois de la cavité et non pour celle du forage.

Cet essai consiste à injecter ou à pomper de l'eau à débit q constant dans cette cavité. Nous créons ainsi une variation de charge dans celle-ci. Lorsque le régime d'équilibre est atteint, nous avons la relation simple :

$$q = K.C.h \quad \{2.31\}$$

q : débit de l'écoulement (m^3/s).

K : coefficient de perméabilité ($m \cdot s^{-1}$).

C : coefficient de forme de la cavité.

h : charge hydraulique (m).

Appelé également essai Lefranc, il est réalisé pendant un temps suffisamment court pour que le niveau de la nappe au cours de l'essai reste inchangé. Il est donc rapide à

réaliser, mais le volume intéressé est faible (5 m autour de la cavité), d'où la faiblesse de la précision sur la perméabilité. Pour obtenir une valeur correcte, il est nécessaire de réaliser de nombreux essais sur un site pour avoir une valeur moyenne.

2.2.3. Autres méthodes de mesure de perméabilité.

Parmi les autres méthodes, moins connues en géotechnique nous citons :

a. Essai par choc impulsionnel (pulse test).

Cet essai est une variante des essais à charge variable, il a été développé dans le domaine pétrolier pour le contrôle des roches de faibles perméabilités (Ait Saadi, 2003).

La méthode consiste à enregistrer la variation dans le temps de la charge hydraulique dans une chambre fermée réalisée dans le terrain, après application instantanée d'une charge hydraulique (choc impulsionnel) dans le tube de mesure rempli d'un volume d'eau connu. La variation de la pression à volume constant est suivie par un capteur de pression.

Les résultats présentés dans la littérature montrent que ces tests par chocs impulsionnels peuvent fournir une bonne approximation des propriétés hydrauliques sur des sols à faibles perméabilités.

b. Méthode de Porchet :

Cet essai, utilisé le plus souvent en Agronomie, consiste à suivre, en fonction du temps, l'infiltration d'un volume d'eau versé dans un trou de tarière cylindrique de 8 à 10 cm de diamètre et de 50 à 100 cm de profondeur.

C'est une méthode simple et rapide qui donne une perméabilité globale sur toute la profondeur du trou de tarière (étude de l'EPFL, 2000).

Cette méthode est toutefois critiquable par manque de maîtrise des bases scientifiques sur lesquelles elle s'appuie (Colombani *et al.*, 1973).

Chapitre 3. Modèles prédictifs de la perméabilité saturée (K).

Les modèles prédictifs de la perméabilité des sols saturés analysés dans ce travail, sont présentés ci après : Kozeny₁₉₆₂ (Schceller, 1962), Slichter₁₉₆₂ (Schceller, 1962), Beyer₁₉₆₄ (Kovacs, 1981), Terzaghi₁₉₈₁ (Kovacs, 1981), Rawls₁₉₈₃ (Rawls *et al.*, 1983), Zamarin₁₉₉₂ (Milan & Andjelko, 1992), Kruger₁₉₉₂ (Milan & Andjelko, 1992), USBR₁₉₉₂ (Milan & Andjelko, 1992) et Rawls₁₉₉₃ (Rawls *et al.*, 1993).

3.1. Modèle de Kozeny₁₉₆₂.

Le modèle de Kozeny a été proposé en 1962 sous l'expression :

$$K_{\text{Kozeny}_{1962}} = 7,94 \cdot \frac{n^2}{(1-n)^2} \tau d_e^2 \quad \{3.1\}$$

τ : Correction de température

d_e : Diamètre effectif des grains en mm donné par l'équation :

$$\frac{1}{d_e} = \frac{3}{2} \frac{\Delta g_1}{d_1} + \sum_{i=2}^{i=n} \frac{\Delta g_i}{d_i} \quad \{3.2\}$$

Avec :

d_1 : Le plus large diamètre de la dernière fraction du matériau analysé ($d_1 < 0,0025$).

Δg_1 : Poids de la dernière fraction fine du matériau.

Δg_i : Poids de la fraction i du matériau.

d_i : Diamètre moyen des grains de la fraction observée déterminé par l'expression suivante :

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{d_i^g} + \frac{1}{d_i^d} \right] \quad \{3.3\}$$

Où d_i^g et d_i^d sont les diamètres maximum et minimum de la fraction i considérée.

3.2. Modèle de Slichter₁₉₆₂.

La formule la plus utilisée de Slichter est:

$$K_{\text{Slichter}_{1962}} = \frac{\gamma}{\mu} 10,021 \cdot \Psi(n) d_e^2 \quad \{3.4\}$$

γ : Poids unitaire du liquide.

μ : Coefficient de viscosité absolue.

$\Psi(n)$: En fonction de la porosité, il est donné par la formule {3.5}:

d_e : Diamètre effectif des grains, en pratique nous prenons le d_{10} .

$$\Psi(n) = n^{3,287} \quad \{3.5\}$$

Les limites d'application de cette formule sont déterminées par les valeurs de d_e qui doivent être comprises entre 0.01mm et 5 mm.

3.3. Modèle de Beyer₁₉₆₄.

Le modèle de Beyer₁₉₆₄ tient compte de la granulométrie du sol notamment le d_{10} et le d_{60} et ne tient pas compte de la porosité :

$$K_{\text{Beyer}_{1964}} = C \cdot d_e^2 \quad \{3.6\}$$

d_e : Diamètre effectif des grains

C : coefficient empirique qui dépend du coefficient d'uniformité, i est donné par la formule suivante:

$$C = 4,5 \cdot 10^{-3} \log \left[\frac{500}{\frac{d_{60}}{d_{10}}} \right] \quad \{3.7\}$$

3.4. Modèle de Terzaghi₁₉₈₁.

La formule de Terzaghi₁₉₈₁ tient compte, entre autres, d'un coefficient empirique dépendant de la nature de la surface des grains :

$$K_{\text{Terzaghi}_{1981}} = C_0 \frac{\mu_{10}}{\mu_t} \left[\frac{n - 0,13}{\sqrt[3]{1 - n}} \right]^2 \cdot d_{10}^2 \quad \{3.8\}$$

Où :

d_{10} (mm): Diamètre correspondant aux 10% des passants.

μ_{10} : coefficient absolu de la viscosité du liquide à la température de 10° C.

μ_t : coefficient absolu de la viscosité du liquide à la température t .

C_0 : coefficient empirique dépendant de la nature de la surface des grains qui varie de 203 pour les sables de rivière à 800 pour les sables de dunes dont les grains ont une forme arrondie.

3.5. Modèle de Rawls₁₉₈₃.

La formule de Rawls (1983) dépend de la porosité ainsi que des pourcentages de sable et celui de l'argile contenue dans le sol.

$$K_{\text{Rawls}_{1983}} = 2,77 \cdot 10^{-4} \cdot \text{EXP} \left[\begin{array}{l} 19,52348n - 8,968470,028212\%C + 0,001107\%S^2 \\ -0,0094125\%C^2 - 8,395215n^2 + 0,077718\%S \cdot n \\ -0,00298\%S^2 \cdot n^2 - 0,19492\%C^2 \cdot n^2 + 0,000173\%S^2 \cdot \%C^2 \\ + 0,02733\%C^2 \cdot n + 0,001434\%C^2 - 0,02733C^2 \cdot n + 0,000035\%C^2 \cdot \%S \end{array} \right] \quad \{3.9\}$$

Où

n : Porosité,

S : Pourcentage de sable

C : Pourcentage d'argile

D'après l'auteur du modèle, cette formule est valable pour les matériaux contenant un pourcentage de sable compris entre 5% et 70% et un pourcentage d'argile variant de 5% à 60%

3.6. Modèle de Zamarin₁₉₉₂.

L'expression la plus utilisée de la formule de Zamarin (1992) est:

$$K_{\text{Zamarin}_{1992}} = 8,07 \frac{n^3}{(1 - n)^2} C_n \cdot \tau \cdot d_e^2 \quad \{3.10\}$$

n : porosité

τ : Coefficient de corrélation de température donné par le tableau 1.

C_n : coefficient empirique qui dépend de la porosité donné par l'équation:

$$C_n = (1,275 - 1,5n)^2 \quad \{3.11\}$$

d_e : Diamètre effectif donné par l'équation {3.2}.

Tableau 1. Coefficient de corrélation en fonction de la température ambiante C°.

| t (c°) | τ | t (c°) | τ | t (c°) | τ | t (c°) | τ | t (c°) | τ |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 0,588 | 6 | 0,712 | 12 | 0,854 | 18 | 1,000 | 24 | 1,155 |
| 1 | 0,612 | 7 | 0,744 | 13 | 0,874 | 19 | 1,025 | 25 | 1,180 |
| 2 | 0,635 | 8 | 0,766 | 14 | 0,902 | 20 | 1,052 | 26 | 1,313 |
| 3 | 0,656 | 9 | 0,786 | 15 | 0,926 | 21 | 1,080 | 27 | 1,620 |
| 4 | 0,676 | 10 | 0,807 | 16 | 0,950 | 22 | 1,107 | 28 | 1,926 |
| 5 | 0,698 | 11 | 0,837 | 17 | 0,975 | 23 | 1,131 | 29 | 2,231 |

3.7. Modèle de Kruger₁₉₉₂.

Le modèle Kruger₁₉₉₂ tient compte des mêmes paramètres du sol que le modèle de Zamarin₁₉₉₂ à part le coefficient de température.

$$K_{\text{Kruger}_{1992}} = 240 \cdot \frac{n}{(1-n)^2} \cdot d_e^2 \quad \{3.12\}$$

Où

n : Porosité

d_e (mm): diamètre effectif des grains donné par l'équation :

$$\frac{1}{d_e} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\Delta g_i}{d_i} = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta g_i \frac{2}{d_i^g + d_i^d} \quad \{3.13\}$$

Δg_i (gramme): Poids de la fraction i du matériau.

d_i (mm): Diamètre moyen des fractions correspondantes

d_i^g et d_i^d (mm) sont les diamètres maximum et minimum de la fraction considérée i.

3.8. Modèle de USBR₁₉₉₂.

La formule développée par U.S. Bureau of Reclamation (USBR) est recommandée par les auteurs pour des sables moyens avec un coefficient d'uniformité ($\eta = d_{60}/d_{10} < 5$).

$$K_{\text{USBR}_{1992}} = 0,36 \cdot d_{20}^{2,3} \quad \{3.14\}$$

d_{20} : Diamètre correspondant aux 20% des passants.

3.9. Modèle de Rawls₁₉₉₃.

$$K_{\text{USBR}_{1992}} = 4,41 \cdot 10^7 \left[\frac{\Phi^x}{n^2} \right] R_l^2 \quad \{3.15\}$$

Φ^x : Porosité totale, avec l'exposant x estimé à 4/3.

n : classe de dimension de pores.

R_l : Rayon moyen des pores.

3.10. Paramètres des modèles

Les modèles prédictifs de K sont résumés dans le tableau 2. Pour prédire la perméabilité, ces modèles tiennent compte de différentes manières, de la granulométrie, de la porosité et de la température ambiante qui influe sur la viscosité de l'eau.

Dans ce qui suit, les résultats des valeurs de la perméabilité prédits par ces modèles seront comparés avec des résultats des valeurs mesurés suivant la loi de Darcy et consignés dans la base de données SoilVision 3.0. L'étude comparative sera réalisée selon une approche de modélisation à savoir, l'analyse de régression.

Tableau 2. Modèles prédictifs de la perméabilité des sols saturés.

| | | |
|--------------------------------|---|--------|
| Kozeny₁₉₆₂ | $K_{_Kozeny_{1962}} = 7,94 \cdot \frac{n^2}{(1-n)^2} \tau d_e^2$ | {3.1} |
| Slichter₁₉₆₂ | $K_{_Slichter_{1962}} = \frac{\gamma}{\mu} 10,021 \cdot \Psi(n) d_e^2$ | {3.4} |
| Beyer₁₉₆₄ | $K_{_Beyer_{1964}} = C \cdot d_e^2$ | {3.6} |
| Terzaghi₁₉₈₁ | $K_{_Terzaghi_{1981}} = C_0 \frac{\mu_{10}}{\mu_t} \left[\frac{n-0,13}{\sqrt[3]{1-n}} \right]^2 \cdot d_{10}^2$ | {3.8} |
| Rawls₁₉₈₃ | $K_{_Rawls_{1983}} = 2,77 \cdot 10^{-4} \cdot \text{EXP} \left[\begin{array}{l} 19,52348n - 8,968470,028212\%C + 0,001107\%S^2 \\ -0,0094125\%C^2 - 8,395215n^2 + 0,077718\%S \cdot n \\ -0,00298\%S^2 \cdot n^2 - 0,19492\%C^2 \cdot n^2 + 0,000173\%S^2 \cdot \%C^2 \\ + 0,02733\%C^2 \cdot n + 0,001434\%C^2 - 0,02733C^2 \cdot n + 0,000035\%C^2 \cdot \%S \end{array} \right]$ | {3.9} |
| Zamarin₁₉₉₂ | $K_{_Zamarin_{1992}} = 8,07 \frac{n^3}{(1-n)^2} C_n \cdot \tau \cdot d_e^2$ | {3.10} |
| Kruger₁₉₉₂ | $K_{_Kruger_{1992}} = 240 \cdot \frac{n}{(1-n)^2} \cdot d_e^2$ | {3.12} |
| USBR₁₉₉₂ | $K_{_USBR_{1992}} = 0,36 \cdot d_{20}^{2,3}$ | {3.14} |
| Rawls₁₉₉₃ | $K_{_Rawls_{1993}} = 4,41 \cdot 10^7 \left[\frac{\Phi^x}{n^2} \right] R_1^2$ | {3.15} |

Légendes : **Kozeny₁₉₆₂** (τ : correction de température ; d_e : diamètre effectif des grains en mm) - **Slichter₁₉₆₂** (γ : poids unitaire du liquide ; μ : coefficient de viscosité absolue ; $\Psi(n)$: fonction de la porosité) - **Beyer₁₉₆₄** (d_e : diamètre effectif des grains ; C : coefficient empirique) - **Terzaghi₁₉₈₁** (d_{10} : diamètre correspondant aux 10% des passants) - **Rawls₁₉₈₃** (n : porosité ; S : pourcentage de sable ; C : pourcentage d'argile) - **Zamarin₁₉₉₂** (n : porosité ; τ : coefficient de corrélation de température ; C_n : coefficient empirique) - **Kruger₁₉₉₂** (n : porosité ; d_e : diamètre effectif des grains) - **USBR₁₉₉₂** (d_{20} : diamètre correspondant aux 20% des passants) - **Rawls₁₉₉₃** (Φ^x : porosité totale, avec l'exposant x estimé à 4/3 ; n : classe de dimension de pores ; R_1 : rayon moyen des pores).

Chapitre 4. Présentation de l'analyse statistique de modèles.

Dans le but d'analyser statistiquement les modèles empiriques prédictifs de K des sols saturés à partir de la base de données SoilVision, nous avons cherché à mettre en relation $K_{\text{modèle}}$ (Kozeny₁₉₆₂, Slichter₁₉₆₂...etc) en fonction de $K_{\text{mesuré}}$ suivant un modèle de régression linéaire. L'intérêt de modéliser la relation dans ce cas est de pouvoir appliquer les outils mathématiques au modèle pour l'analyser. Cette approche a été utilisée par plusieurs auteurs tels que Hwang (2002), Mbonimpa *et al.* (2002) et Zacharias et Wessolek (2007).

4.1. Analyse de Régression.

Afin d'étudier et de mesurer la relation qui existe entre deux ou plusieurs variables, l'analyse de régression est un outil statistique de choix. Nous écrivons la relation recherchée sous la forme suivante (Dehon *et al.*, 2008):

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad \{4.1\}$$

Le but de l'analyse de régression est de déterminer la relation entre la variable dépendante y et la variable (ou les variables) indépendante x et d'établir le degré de fiabilité de l'estimation. Cette analyse permet aussi de voir si les résultats sont significatifs et si la relation entre les variables (x, y) est réelle ou seulement apparente (Doge, 1997 ; Cornillon & Matzner-Løber, 2007 ; Dehon *et al.*, 2008).

4.2. La régression linéaire simple.

La régression linéaire simple est une analyse de régression qui permet de modéliser la relation linéaire entre une seule variable explicative, notée x , et une variable à expliquer, notée y .

4.2.1. Modélisation statistique.

Le modèle de régression linéaire simple est de type polynomial, il s'écrit :

$$y_i = \alpha_0 + \alpha_1 x_i + \varepsilon_i \quad \{4.2\}$$

Où :

y est la variable dépendante (ou la variable à expliquer).

x est la variable indépendante (ou la variable explicative).

ε est le terme d'erreur aléatoire non observable.

α_0 et α_1 sont les paramètres à estimer. a_0 est le terme constant du modèle c'est-à-dire la valeur moyenne de y quand x vaut 0 et a_1 est la pente de la droite de regression.

Dans notre cas d'étude, y_i représente la valeur de $K_{modèle}$ et x_i , la valeur de $K_{mesuré}$ tirée de la base de données SoilVision 3.0.

4.2.2. Estimation des paramètres du modèle : Estimateurs des Moindres Carrés.

Face à une distribution de points d'observation, $K_{modèle}$ en fonction de $K_{mesuré}$, nous pouvons se demander *quelle est, parmi les n droites possibles, la plus représentative ?* En d'autres termes, ceci reviendrait à répondre à la question suivante : *Comment estimer les paramètres a_0 et a_1 du modèle linéaire ?*

La droite qui convient le mieux est celle qui tend à minimiser les écarts entre les observations et la droite du modèle linéaire de régression. L'estimation peut se faire par la méthode des moindres carrés qui propose de choisir comme estimateurs \hat{a}_0 et \hat{a}_1 de a_0 et a_1 respectivement, les valeurs qui minimisent la somme des carrés des distances (verticales) des points à la droite.

La méthode des moindres carrés est la plus fréquemment utilisée pour l'estimation des paramètres α_0 et α_1 (Dodge, 1993 ; Goupy & Creighton, 2006 ; Dehon *et al.*, 2008). Elle a pour objet de minimiser la somme des carrés des erreurs. Nous appelons estimateur des moindres carrés \hat{a}_0 de a_0 et \hat{a}_1 de a_1 les valeurs suivantes (Cornillon et Matzner-Løber, 2007) :

$$\left. \begin{aligned} \hat{a}_0 &= y_{moyen} - \hat{a}_1 x_{moyen} \\ \hat{a}_1 &= \frac{\sum (x_i - x_{moyen}) y_i}{\sum (x_i - x_{moyen})^2} \end{aligned} \right\} \quad \{4.3\}$$

4.2.3. Fiabilité de l'estimation de y : Analyse de la variance (ANOVA).

Lorsque nous calculons par la méthode des moindres carrés une estimation de la valeur y , soit \hat{y} , en se basant sur un modèle linéaire qui traduit la relation entre y et x , il est utile de se poser la question : *jusqu'à quel point peut-on se fier à ce modèle ?* Afin de répondre à cette question, il faut réaliser une analyse de la variance et des tests d'hypothèses sur les paramètres α_0 et α_1 de la droite de régression. Pour effectuer ces tests, nous devons poser les hypothèses suivantes (Dehon *et al.*, 2008):

- Chaque valeur x, y est une variable aléatoire distribuée selon la loi normale.
- La variance σ^2 de y est la même pour tout x ;
- Les différentes observations sur y sont indépendantes les unes des autres mais conditionnées par les valeurs de x .

L'analyse de la variance (ANOVA : ANalyses Of VAriance) est une technique statistique qui consiste à séparer la variation totale d'un ensemble de données en composantes raisonnées associées à des sources spécifiques de variation (Dodge, 1993). Le but est de comparer les moyennes de plusieurs populations normales et de même variance à partir d'échantillons aléatoires et indépendants les uns des autres et de conclure à l'égalité (hypothèse nulle notée H_0) ou non - égalité (hypothèse alternative notée H_1) globale de toutes les moyennes (Mouchiroud, 2003).

L'ANOVA est aussi réalisée dans le but de tester certaines hypothèses concernant les paramètres du modèle, ou d'estimer les composantes de la variance (Dodge, 1993 ; Dehon *et al.*, 2008). C'est dans ce contexte que notre analyse s'insère. En effet, l'ANOVA réalisée sur le modèle de régression linéaire simple aura pour objectif de prouver ou non l'existence d'une relation statistiquement significative entre y et x mettant ainsi en évidence la prédiction de K par le modèle étudié.

Le tableau d'analyse de la variance que nous devons construire doit être structuré tel que indiqué dans le tableau 3.

L'ANOVA permet de tester l'hypothèse nulle $H_0 : \alpha_1 = 0$ contre l'hypothèse alternative : $H_1 : \alpha_1 \neq 0$. La statistique F_{obs} doit être comparée avec la valeur $F_{\alpha,1,n-2}$ (F_{theo} , théorique) de la table de Fisher, où α (5%) est le seuil de signification du test. Si la valeur de F_{obs} est inférieure ou égale à la valeur de F_{theo} , on accepte H_0 , donc le modèle est non significatif ce qui implique qu'il n'y a pas de lien entre x et y . Dans le cas contraire, le modèle est significatif : on rejette l'hypothèse H_0 au profit de H_1 (Dodge, 1993).

Tableau 3. Tableau d'analyse de la variance.

| <i>Source de Variation</i> | <i>Degré de Liberté (ddl)</i> | <i>Somme des carrés (SCE)</i> | <i>Carrés Moyens (CM)</i> | <i>Test de Fisher observé (F_{obs})</i> |
|-----------------------------------|-------------------------------|--|--|---|
| <i>Modèle de Régression (reg)</i> | 1 | $\sum_{i=1}^n (y_{(estim\hat{e})i} - y_{moyen})^2$ | $CM_{reg} = \frac{SCE}{ddl}$ $= \frac{\sum_{i=1}^n (y_{(estim\hat{e})i} - y_{moyen})^2}{1}$ | $F_{obs} = \frac{CM_{reg}}{CM_{res}}$ $= \frac{CM_{reg}}{S^2}$ |
| <i>Résiduelle (res)</i> | n-2 | $\sum_{i=1}^{n_i} (y_i - y_{(estim\hat{e})i})^2$ | $CM_{res} = \frac{SCE}{ddl}$ $= \frac{\sum_{i=1}^{n_i} (y_i - y_{(estim\hat{e})i})^2}{n-2}$ | |
| <i>Total</i> | n-1 | $\sum_{i=1}^{n_i} (y_i - y_{estim\hat{e}})^2$ | | |

Nous qualifierons un modèle de statistiquement non significatif si la probabilité est supérieure à 0,05. C'est-à-dire que la probabilité du hasard dans le modèle de régression linéaire simple est très élevée (CM_{res} élevé). Le modèle sera qualifié de statistiquement significatif si la probabilité est inférieure à 0,05(*), de hautement significatif pour une probabilité égale ou inférieure à 0,001(**) et de modèle très hautement significatif pour une probabilité égale ou inférieure à 0,0001(***)(Dodge, 1993).

4.2.4. Interprétations géométriques du modèle: Le coefficient de détermination R^2 .

Le coefficient de détermination R^2 mesure la proportion de la variation de la variable y, qui est traduite par l'équation de régression {équation 4.2}. Ainsi le coefficient de détermination R^2 est défini par l'équation :

$$R^2 = \frac{\text{Variation expliquée}}{\text{Variation totale}}, \quad R^2 = \frac{SC_{reg}}{SC_{tot}} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{(est)i} - y_{moy})^2}{\sum_{i=1}^{n_i} (y_i - y_{moy})^2} \quad \{4.4\}$$

Plus la valeur de R^2 se rapproche de 1, plus la variation inexpliquée est petite. Si la valeur du coefficient de détermination R^2 est faible, cela signifie que le modèle n'explique pas convenablement la variation (Cornillon & Matzner-Løber, 2007 ; Dehon *et al.*, 2008; Myers & Montgomery, 2009).

4.2.5. Intervalle de confiance de la pente et Intervalle de confiance d'une prévision de la courbe de régression.

L'intervalle de confiance de la pente (figure 4.1) sert surtout à des fins d'inférence, par exemple pour vérifier qu'une pente prédite se trouve à l'intérieur de l'intervalle de confiance calculé pour un seuil de signification donné.

L'intervalle de confiance d'une prévision (figure 4.1) définit les limites dans lesquelles se situe probablement une valeur individuelle lue sur la droite de régression (Dodge, 1993).

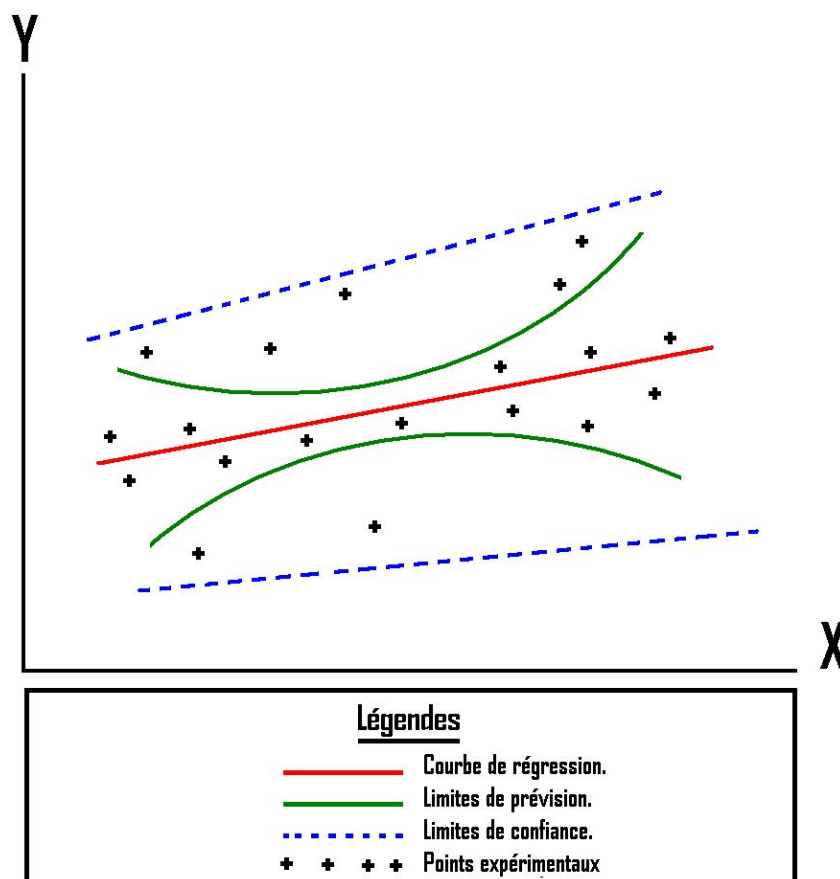


Figure 4.1. Intervalle de confiance de la pente et Intervalle de confiance d'une prévision.

4.2.6. Evaluation de la validité du modèle : Analyse des résidus.

L'analyse des résidus constitue une étape primordiale de la régression linéaire, elle est essentiellement fondée sur des méthodes graphiques. Il est donc difficile d'avoir des règles strictes de décision. L'analyse des résidus permet de tester la validité d'un modèle de régression par rapport aux hypothèses relatives aux résidus. Cette analyse permet aussi de détecter d'éventuelles observations aberrantes (Dodge, 1993).

a. Ajustement individuel au modèle, valeur aberrante

Il suffit de voir la valeur du résidu correspondant à une observation pour analyser la qualité d'ajustement du modèle à cette observation. Si la valeur est anormalement élevée, elle est dite aberrante. La valeur aberrante est une observation qui est mal expliquée par le modèle et admet un résidu élevé (Mason *et al.* 2003).

Généralement les données aberrantes sont détectées graphiquement. Une fois détectées, il est utile de comprendre pourquoi ces valeurs sont aberrantes (erreur de mesure, d'enregistrement...etc). En général, il est recommandé de supprimer ces valeurs de l'analyse (Mason *et al.* 2003). Dans notre cas, le levier peut être utilisé pour détecter les valeurs aberrantes.

Toute prédiction y_i^* peut s'exprimer comme une combinaison linéaire des observations y_j :

$$y_i^* = \sum_j h_{ij} y_j \quad \{4.5\}$$

Le coefficient h_{ii} de l'observation y_i , est dit le levier de l'observation i . Sa valeur est comprise entre 0 et 1 (Mason *et al.* 2003).

b. Analyse de la normalité et de l'homoscédasticité.

Les hypothèses les plus importantes sur les résidus aléatoires non observables ε_i (équation 4.2) sont (Dodge, 1993):

- leur distribution suit une loi normale,
- Leur variance σ^2 est constante (homoscédasticité).

Si le modèle de régression choisi est adéquat, la distribution des résidus $e_i = y_i - \hat{y}_i$, doit confirmer les hypothèses que les résidus suivent une loi normale, leur moyenne est égale à zéro et leur variance est constante.

Tout écart significatif par rapport à cette loi normale ou par rapport à l'homoscidasticité peut être testé ou visualisé graphiquement. Si la distribution normale des résidus est vérifiée, les points doivent suivre une droite comme le montre la figure 4.2-A. La représentation graphique des résidus ($e_i = y_i - \hat{y}_i$) en fonction de \hat{y}_i est l'un des graphiques les plus utilisés dans l'analyse des résidus. Si le modèle choisi est adéquat, les résidus sont distribués de manière uniforme sur une bande horizontale du graphique comme le montre la figure 4.2-B (Dodge, 1993).

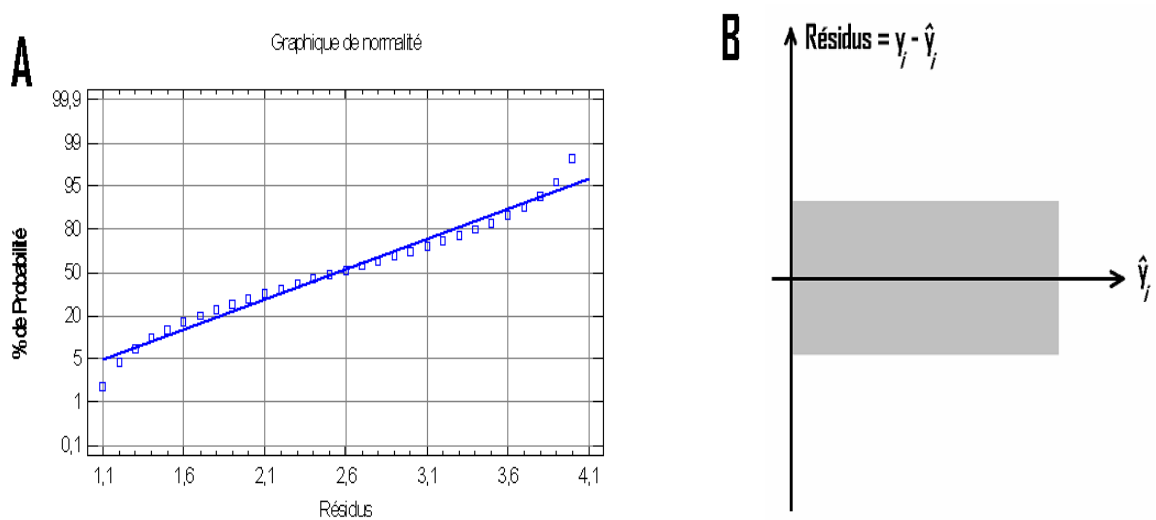


Figure 4.2. Distribution normale des résidus (A) et représentation graphique des résidus en fonction de \hat{y} (B) dans le cas où les hypothèses sur les résidus sont vérifiées.

Ce graphique peut prendre des allures différentes si les hypothèses des résidus ne sont pas vérifiées (figure 4.3) (Dodge, 1993). Dans ce cas, pour y remédier nous pouvons faire (Mason *et al.* 2003):

- une transformation des données y_i .
- une suppression des valeurs aberrantes après leur détection.

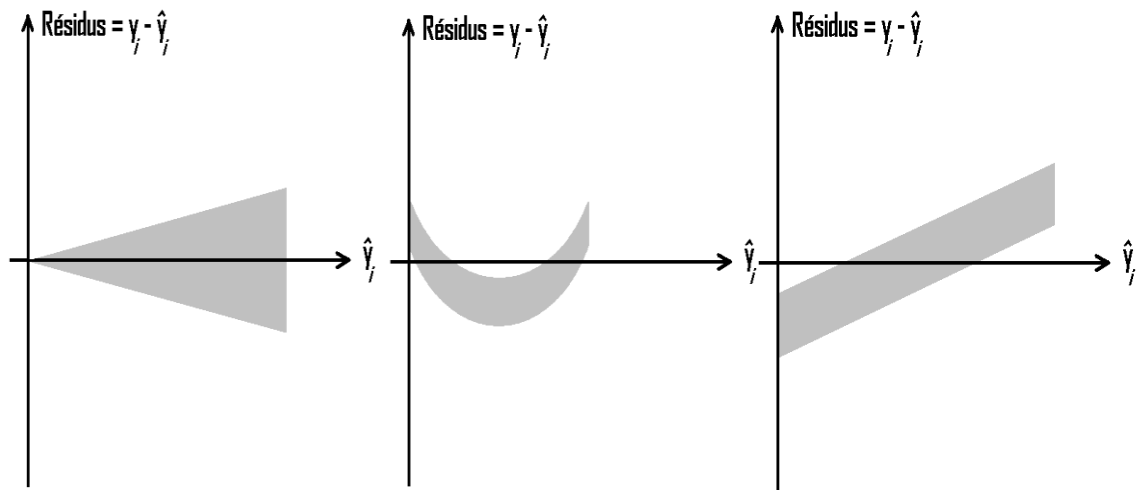


Figure 4.3. Représentation graphique des résidus en fonction de \hat{y} dans le cas d'une hétéroscédasticité.

Chapitre 5. Matériel et méthodes.

5.1. Utilisation de la base de données SoilVision et extraction des données.

Parmi les 6215 sols de la base de données SoilVision 3.0., il existe 379 sols pour lesquels la perméabilité saturée (K) a été mesurée. Parmi ces derniers, nous avons retenu 188 sols dans un premier temps en fonction des propriétés disponibles pour ces sols dans la base de données par SoilVision:

- *Granulométrie.*
- *Perméabilité.*
- *Porosité*

Certains de ces sols (188) manquent de données requises par les modèles prédictifs de la perméabilité. Nous avons donc éliminé systématiquement ces sols, au final 165 sols ont été retenus pour l'analyse statistique. Les 165 sols retenus ont été classés en fonction de leur granulométrie en trois catégories : sols argileux, sols limoneux sableux et sols sableux. Ils se répartissent comme indiqués dans le triangle de classification des sols (figure 5.1) :

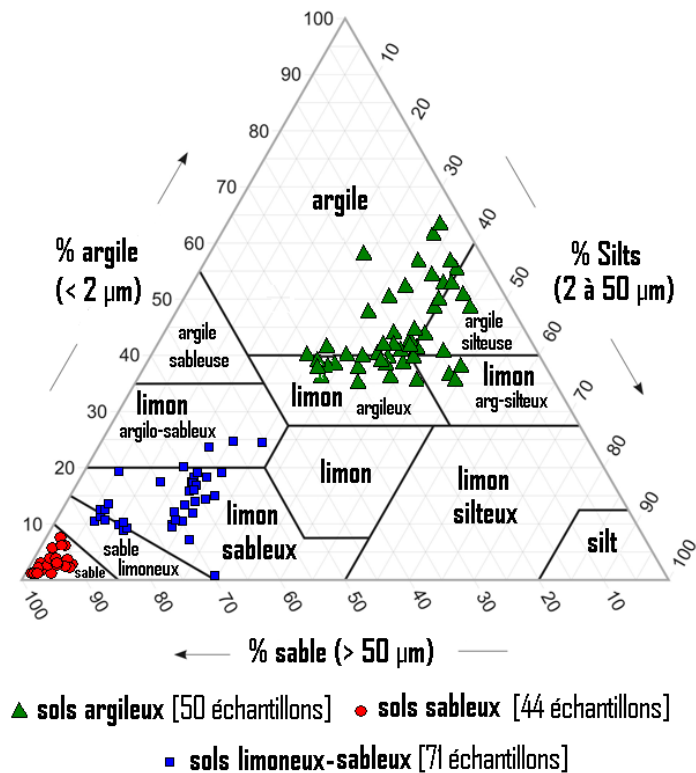


Figure 5.1. Classification des sols selon leurs pourcentages d'argile, de limon et de sable.

5.2. Analyse statistique des quelques modèles prédictifs de K .

La prédiction statistique des neuf modèles empiriques de K des sols saturés sera étudiée en modélisant la relation entre $K_{\text{modèle}}$ et $K_{\text{mesuré}}$. Pour ce faire, nous utilisons l'analyse de régression linéaire simple.

Les coefficients du modèle sont calculés par la méthode des moindres carrés. Si la valeur du coefficient de détermination R^2 du modèle est faible, cela signifie que le modèle n'explique pas convenablement la variation. C'est-à-dire que les valeurs de $K_{\text{modèle}}$ s'écartent des valeurs de $K_{\text{mesuré}}$.

Le modèle de régression linéaire ainsi obtenu est soumis à une analyse de la variance (ANOVA) qui a pour but de prouver qu'il existe une relation statistiquement significative entre $K_{\text{modèle}}$ et $K_{\text{mesuré}}$. Si le test F de l'ANOVA est significatif, il fournirait une preuve statistique sur l'existence d'un lien entre les valeurs de $K_{\text{modèle}}$ et $K_{\text{mesuré}}$.

Après l'ANOVA, la validation du modèle, ou ce qui est aussi appelé le diagnostic du modèle et accommodation (analyse des résidus, outliers... etc) est une étape nécessaire. Les observations présentant une valeur de Levier élevée sont considérées comme aberrantes et sont supprimées comme le recommande Mason *et al.* (2003).

Nous concluons qu'un modèle empirique est bon si les valeurs prédites de $K_{\text{modèle}}$ se rapprochent le plus aux valeurs mesurées au laboratoire avec le minimum d'erreur. Dans ce cas, le modèle de régression ajusté est une droite (*modèle d'ordre 1*) avec une pente positive passant par l'origine (*cas idéal : modèle prédictif*). Cette conclusion est possible grâce à la modélisation qui permet l'analyse statistique (application des outils mathématiques) des modèles de régressions.

5.3. Software.

Le logiciel utilisé pour les traitements statistique est STATGRAPHICS Centurion XV version 15.2.05.

Chapitre 6. Résultats et discussions.

6.1. Evaluation des modèles de régression linéaire simple : R^2 et ANOVA.

Les modèles de régression et l'analyse de l'ANOVA ainsi que les coefficients de détermination R^2 sont résumés dans le tableau 4 :

L'analyse de la régression linéaire simple des neuf modèles prédictifs de K pour les trois types de sols révèle que les coefficients de régression (a_0 et a_1) s'écartent des valeurs idéales qui sont $a_0 = 0$ et $a_1 = + 1$ qui font que les valeurs du modèle prédictif soient égales aux valeurs mesurées de la perméabilité ($K_{\text{modèle}} = K_{\text{mesuré}}$). En effet, les valeurs des coefficients varie de 0,00009 à 693,96 pour a_0 et de $- 52,14$ à $+ 1,71$ pour a_1 .

Le coefficient R^2 montre que l'ensemble des modèles de régression n'explique pas la variation totale. En effet, pour les sols argileux le R^2 des modèles prédictifs varie de 0,00% pour le modèle de Rawls₁₉₉₃ à 2,01% pour celui de l'USBR₁₉₉₂. Dans le cas des sols limoneux-sableux, il varie de 0,02% (Slichter₁₉₆₂) à 10,91% (Rawls₁₉₉₃). Pour les sols sableux, les valeurs varient de 0,26% (Slichter₁₉₆₂) à 3,69% (Rawls₁₉₈₃).

D'une manière générale, ce manque d'adéquation des modèles est confirmé par l'ANOVA qui ne met pas en évidence une relation statistiquement significative entre $K_{\text{modèle}}$ et $K_{\text{mesuré}}$. En effet, pour les sols argileux, les probabilités varient de 0,9774 (Rawls₁₉₉₃) à 0,3261 (USBR₁₉₉₂), ce qui montre que ces neuf modèles sont statistiquement non significatifs. Pour les sols Limoneux-sableux, les deux seuls modèles statistiquement significatifs sont les modèles de Rawls₁₉₈₃ et Rawls₁₉₉₃ (respectivement $p = 0,0249$ et $0,0179$). En ce qui concerne les sols sableux, les probabilités varient de $p = 0,2117$ à $0,7443$ pour respectivement Rawls₁₉₈₃ et Slichter₁₉₆₂, les neuf modèles sont donc statistiquement non significatifs.

Il est nécessaire dans ce cas de faire une évaluation de la validité des modèles de régression (diagnostic) par l'analyse des résidus pour voir si les hypothèses sur les résidus sont vérifiées ou non. Ceci permettra d'améliorer les modèles suite à leur accommodation.

Tableau 4. Modèle de régression, ANOVA et R^2

(* : Significatif ; ** : Hautement significatif ; *** : Très hautement significatif).

| Modèle | Régression | ANOVA | | R^2 (%) |
|--------------------------------|--|----------|----------------------------|-----------|
| | | F_{ob} | Probabilité -signification | |
| Sols argileux | | | | |
| Kozeny ₁₉₆₂ | $10,4714 + 0,0165969.K_{mesuré}$ | 0,19 | 0,6627 | 0,40 |
| Slichter ₁₉₆₂ | $0,000082346 - 1,12758 E-7.K_{mesuré}$ | 0,15 | 0,6998 | 0,31 |
| Beyer ₁₉₆₄ | $0,258092 + 0,00035707.K_{mesuré}$ | 0,14 | 0,7140 | 1,57 |
| Terzaghi ₁₉₈₁ | $0,00319942 - 0,0000050174.K_{mesuré}$ | 0,06 | 0,8021 | 0,13 |
| Rawls ₁₉₈₃ | $1,75182 + 0,00035429.K_{mesuré}$ | 0,01 | 0,9392 | 0,01 |
| Zamarin ₁₉₉₂ | $8,53891 - 0,0111229.K_{mesuré}$ | 0,57 | 0,4551 | 1,22 |
| Kruger ₁₉₉₂ | $27,343 - 0,0389892.K_{mesuré}$ | 0,50 | 0,4849 | 1,02 |
| USBR ₁₉₉₂ | $0,0000902771 - 2,5796E-7.K_{mesuré}$ | 0,98 | 0,3261 | 2,01 |
| Rawls ₁₉₉₃ | $0,820447 + 0,0000578118.K_{mesuré}$ | 0,00 | 0,9774 | 0,00 |
| Sols limoneux - sableux | | | | |
| Kozeny ₁₉₆₂ | $23,1122 + 0,020117.K_{mesuré}$ | 0,92 | 0,3417 | 1,85 |
| Slichter ₁₉₆₂ | $19,5074 - 0,00299331.K_{mesuré}$ | 0,01 | 0,9268 | 0,02 |
| Beyer ₁₉₆₄ | $18,078 - 0,0116812.K_{mesuré}$ | 0,08 | 0,7775 | 0,22 |
| Terzaghi ₁₉₈₁ | $387,568 - 0,0881667.K_{mesuré}$ | 0,2 | 0,8929 | 0,04 |
| Rawls ₁₉₈₃ | $0,384132 + 0,000606525.K_{mesuré}$ | 5,35 | 0,0249 * | 9,85 |
| Zamarin ₁₉₉₂ | $44,1164 + 0,0477142.K_{mesuré}$ | 0,85 | 0,3613 | 1,70 |
| Kruger ₁₉₉₂ | $94,0905 + 0,109748.K_{mesuré}$ | 0,79 | 0,3771 | 1,60 |
| USBR ₁₉₉₂ | $2,388775 - 0,00190968.K_{mesuré}$ | 1,21 | 0,2763 | 2,41 |
| Rawls ₁₉₉₃ | $0,250115 - 0,000276695.K_{mesuré}$ | 6,00 | 0,0179 * | 10,91 |
| Sols sableux | | | | |
| Kozeny ₁₉₆₂ | $284,615 + 1,70803.K_{mesuré}$ | 0,42 | 0,5188 | 1,00 |
| Slichter ₁₉₆₂ | $693,96 - 1,68411.K_{mesuré}$ | 0,11 | 0,7443 | 0,26 |
| Beyer ₁₉₆₄ | $266,92 - 0,97874.K_{mesuré}$ | 0,37 | 0,5468 | 0,87 |
| Terzaghi ₁₉₈₁ | $13097,5 - 52,1448.K_{mesuré}$ | 0,28 | 0,5997 | 0,66 |
| Rawls ₁₉₈₃ | $0,280661 - 0,00107648.K_{mesuré}$ | 1,61 | 0,2117 | 3,69 |
| Zamarin ₁₉₉₂ | $137,266 - 0,638551.K_{mesuré}$ | 0,43 | 0,5132 | 1,03 |
| Kruger ₁₉₉₂ | $138,424 - 0,65178.K_{mesuré}$ | 0,47 | 0,4966 | 1,11 |
| USBR ₁₉₉₂ | $66,8476 + 0,265759.K_{mesuré}$ | 0,16 | 0,6872 | 0,39 |
| Rawls ₁₉₉₃ | $0,211988 - 0,000518868.K_{mesuré}$ | 1,57 | 0,2171 | 3,60 |

6.2. Analyse des résidus.

L'analyse des résidus permet d'évaluer la validité du modèle de régression par rapport aux hypothèses relatives aux résidus en vérifiant les hypothèses de distribution normale et de l'homoscédasticité.

L'analyse des résidus montre que les hypothèses concernant les paramètres des modèles ne sont pas vérifiées. En effet, les figures 6.1 à 6.27 montrent que pour les neuf modèles étudiés, la distribution normale des résidus n'est pas vérifiée car les points des pourcentages de probabilité en fonction des résidus ne suivent pas une droite. De même, que les représentations graphiques des résidus e_i en fonction de \hat{y}_i montrent que les résidus ne sont pas distribués de manière uniforme suivant une bande horizontale.

Donc, les hypothèses (distribution normale, homoscédasticité) ne sont pas vérifiées, ce qui nous emmène à faire une accommodation de ces modèles en supprimant les données présentant une valeur de levier élevée (valeurs aberrantes) et faire des transformations des données si nécessaire.

Sols argileux

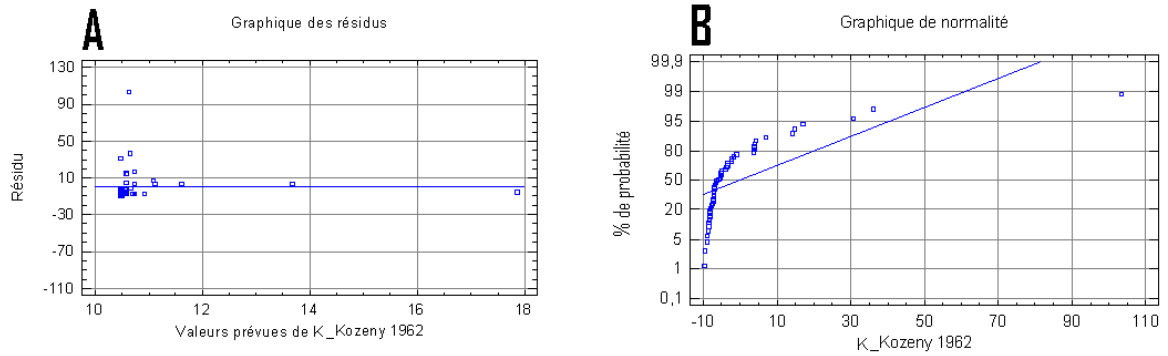


Figure 6.1. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Kozeny₁₉₆₂.

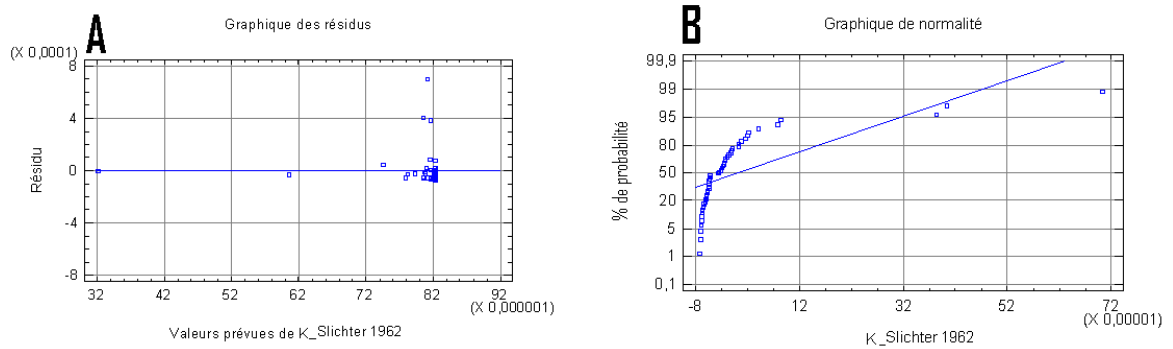


Figure 6.2. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Slichter₁₉₆₂.

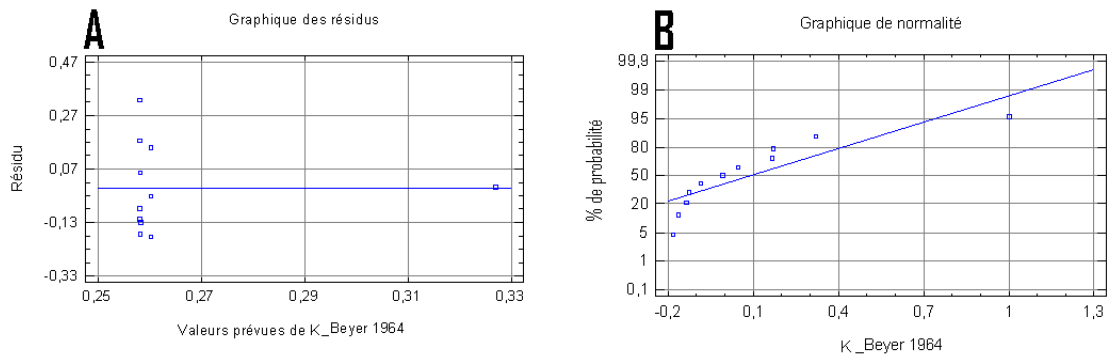


Figure 6.3. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Beyer₁₉₆₄.

Sols argileux

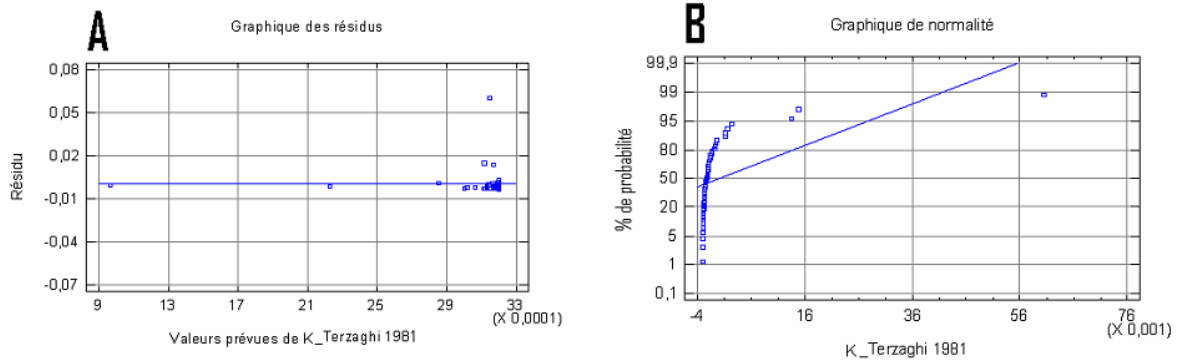


Figure 6.4. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Terzaghi₁₉₈₁.

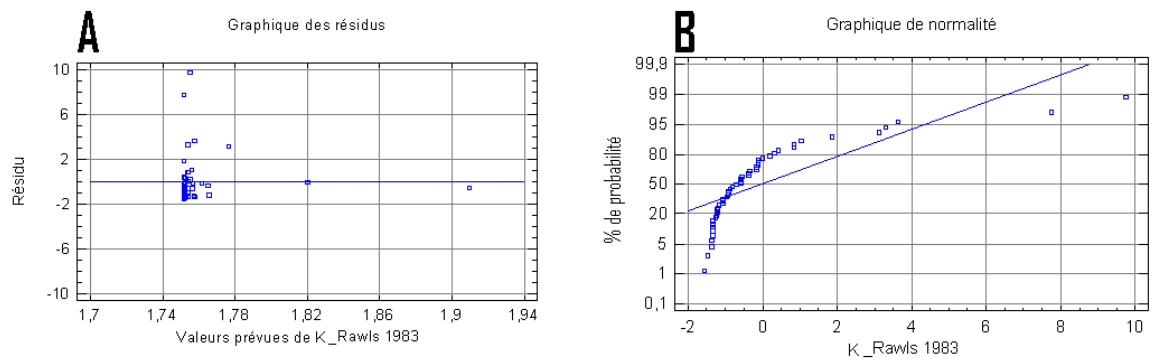


Figure 6.5. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Rawls₁₉₈₃.

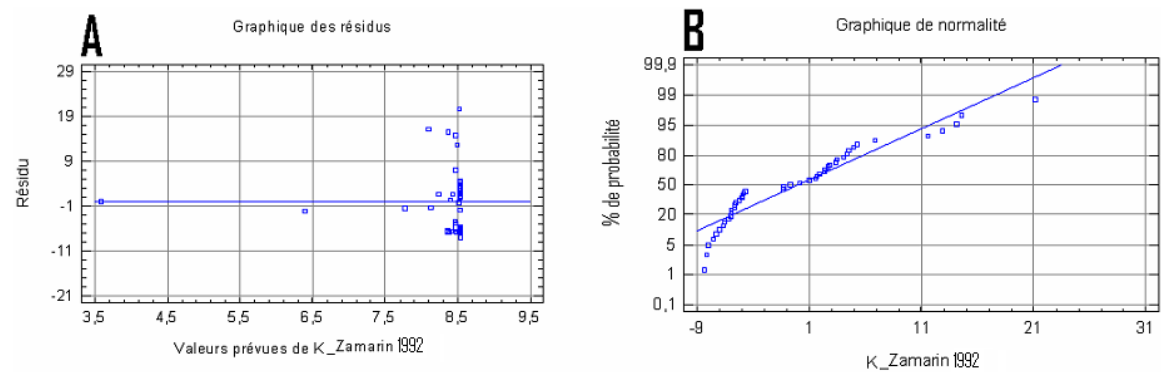


Figure 6.6. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Zamarin₁₉₉₂.

Sols argileux

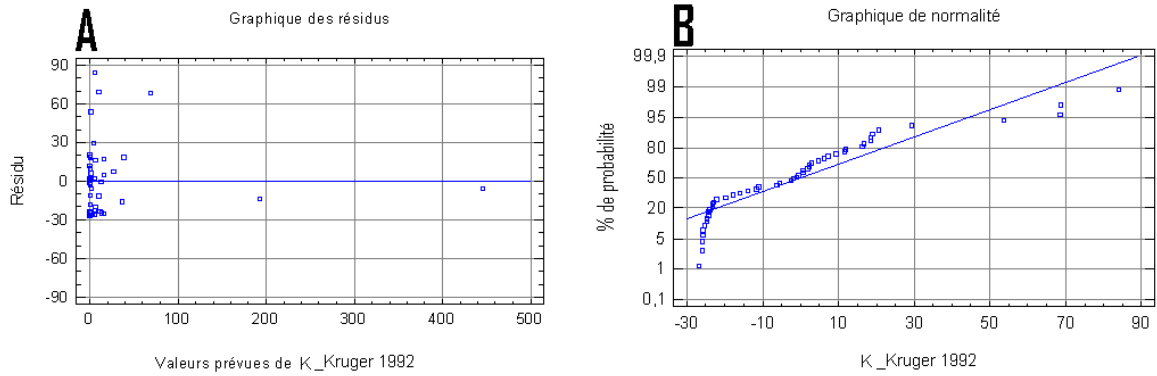


Figure 6.7. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Kruger₁₉₉₂.

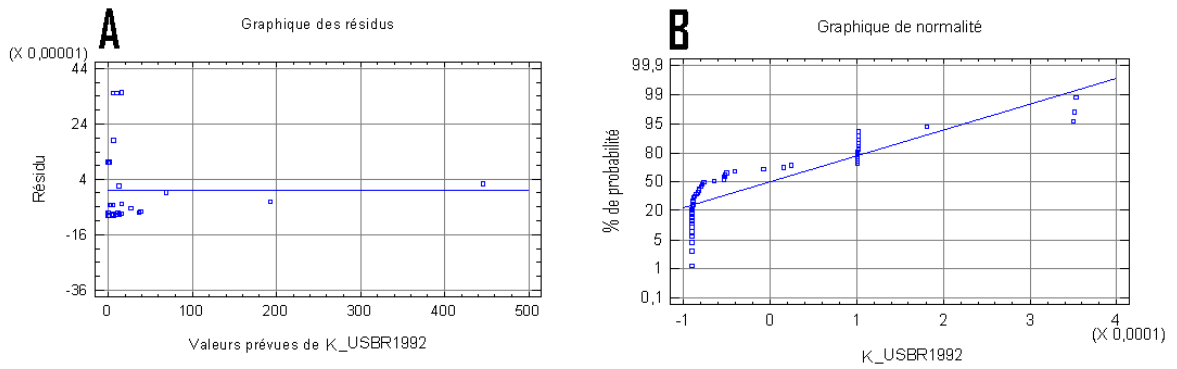


Figure 6.8. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de USBR₁₉₉₂.

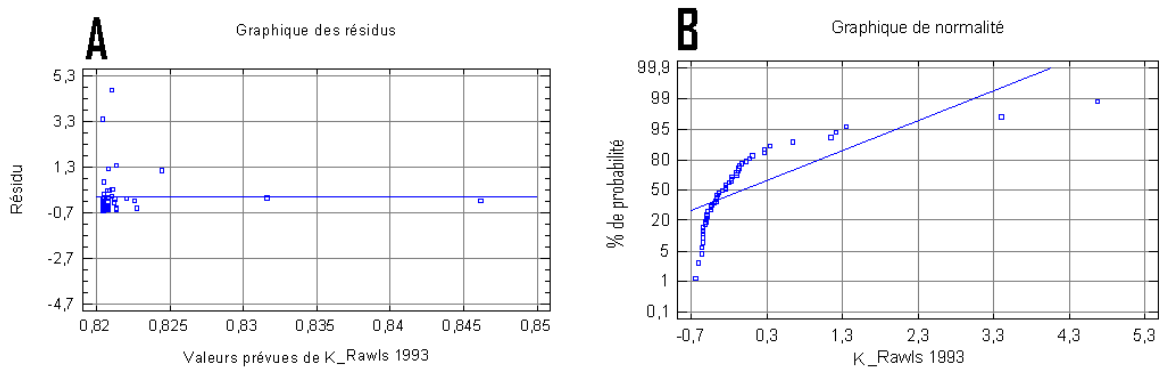


Figure 6.9. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Rawls₁₉₉₃.

Sols limoneux-sableux

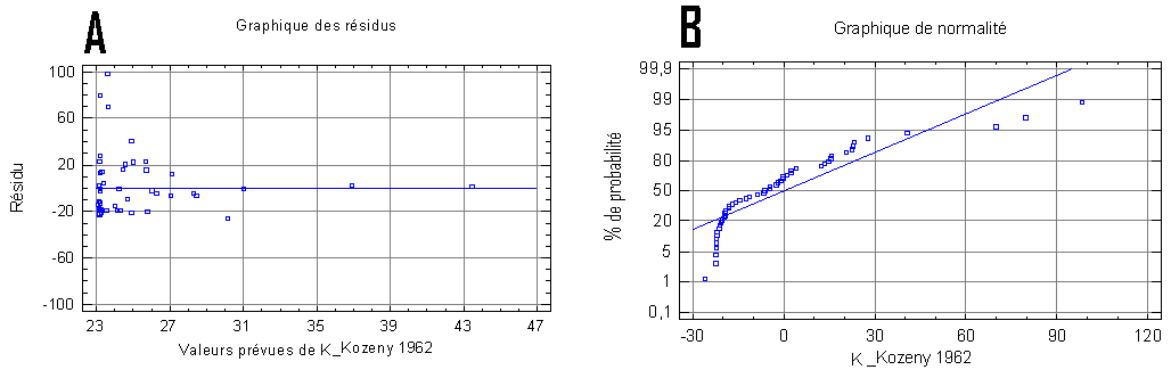


Figure 6.10. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Kozeny₁₉₆₂.

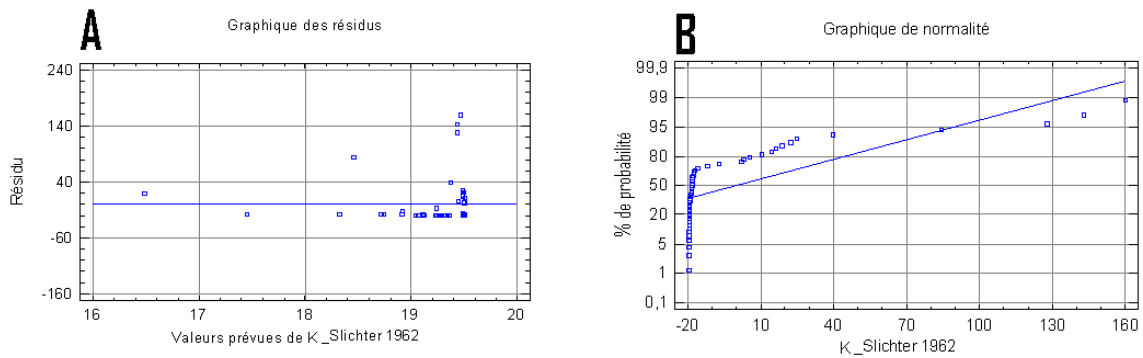


Figure 6.11. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Slichter₁₉₆₂.

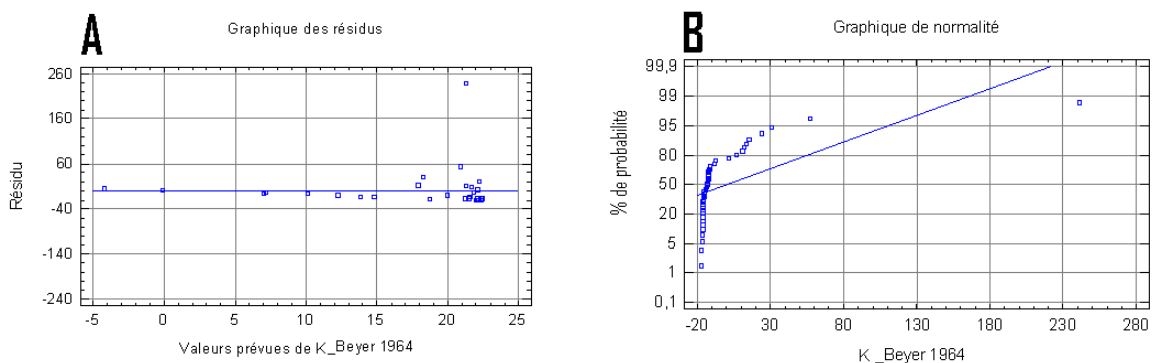


Figure 6.12. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Beyer₁₉₆₄.

Sols limoneux-sableux

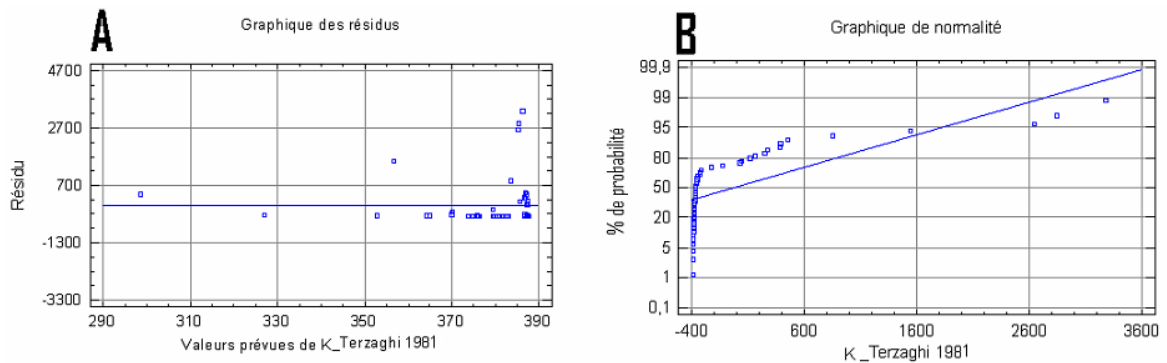


Figure 6.13. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Terzaghi₁₉₈₁.

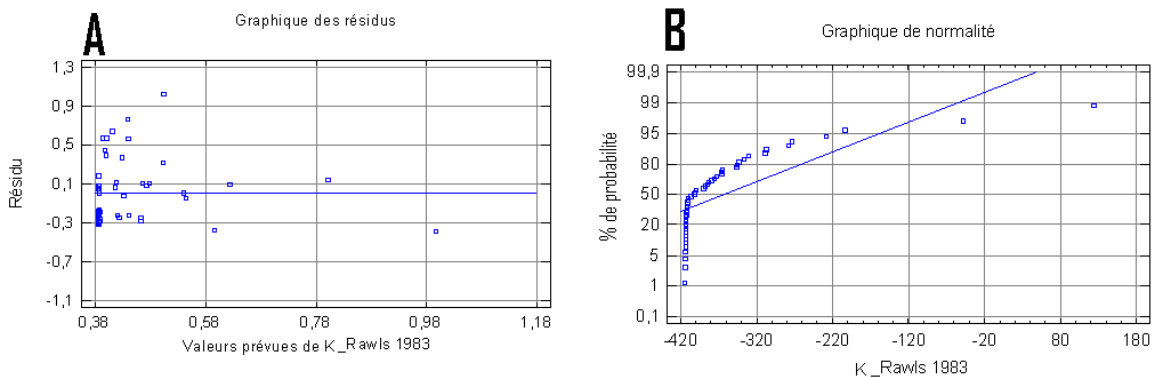


Figure 6.14. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Rawls₁₉₈₃.

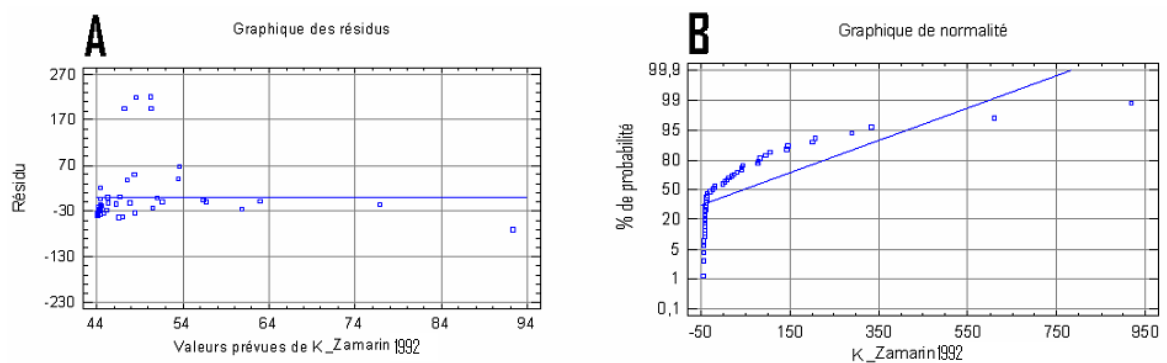


Figure 6.15. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Zamarin₁₉₉₂.

Sols limoneux-sableux

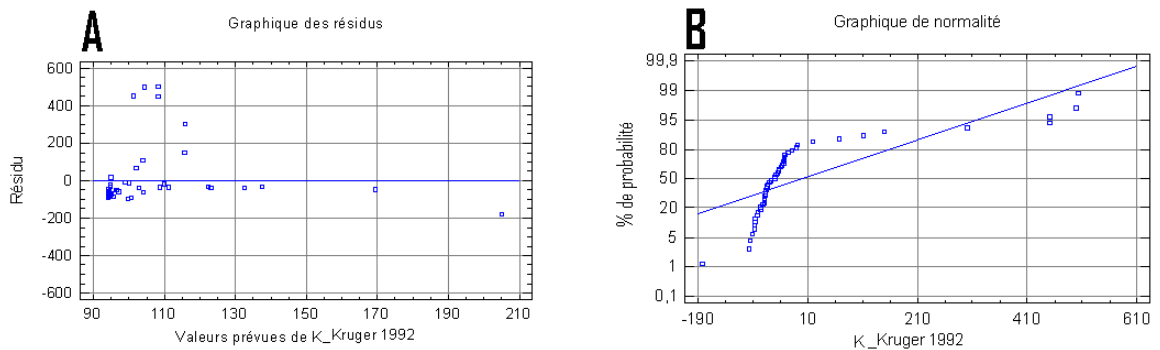


Figure 6.16. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Kruger₁₉₉₂.

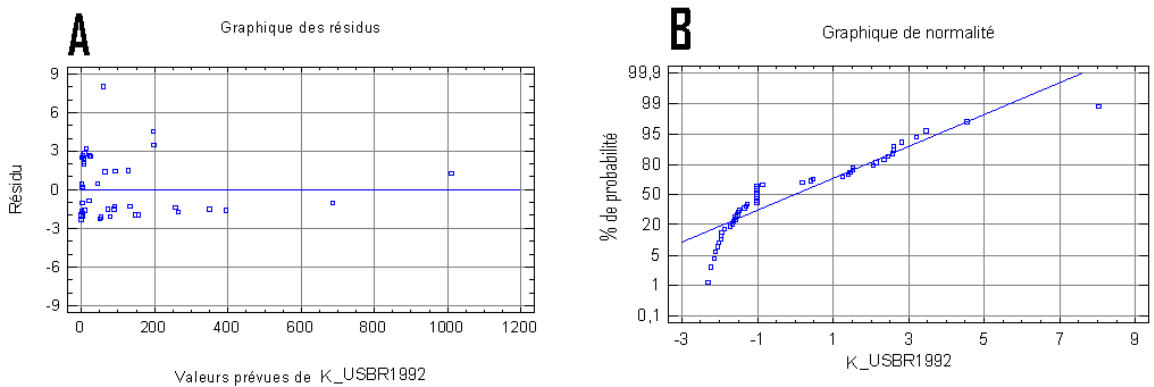


Figure 6.17. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de USBR₁₉₉₂.

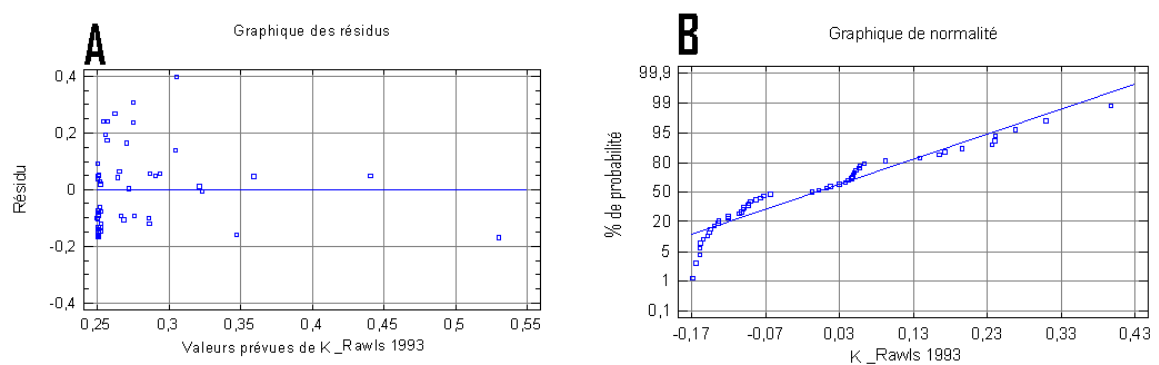


Figure 6.18. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Rawls₁₉₉₃.

Sols sableux

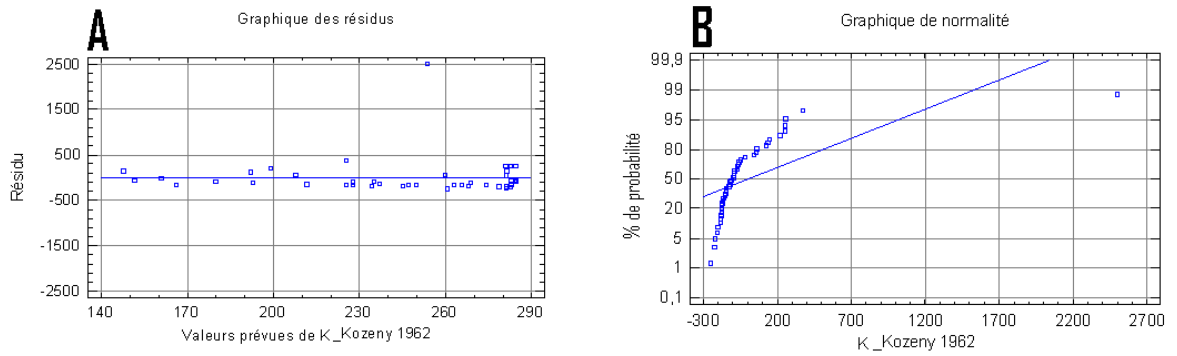


Figure 6.19. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Kozeny₁₉₆₂.

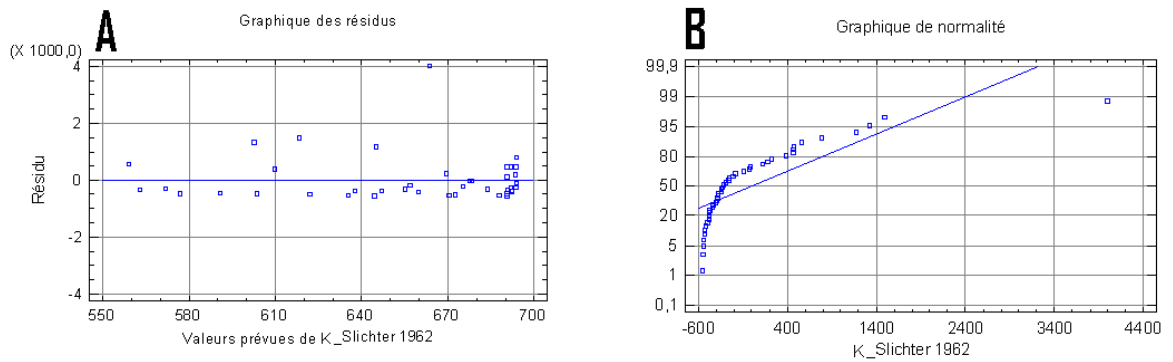


Figure 6.20. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Slichter₁₉₆₂.

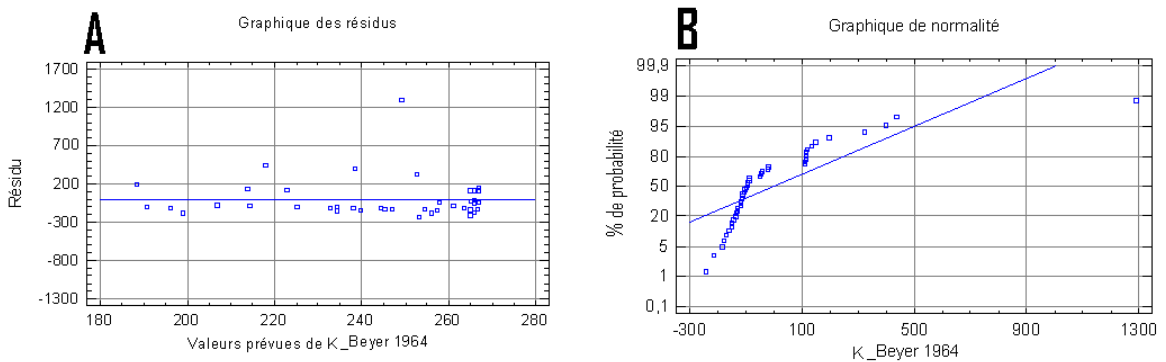


Figure 6.21. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Beyer₁₉₆₄.

Sols sableux

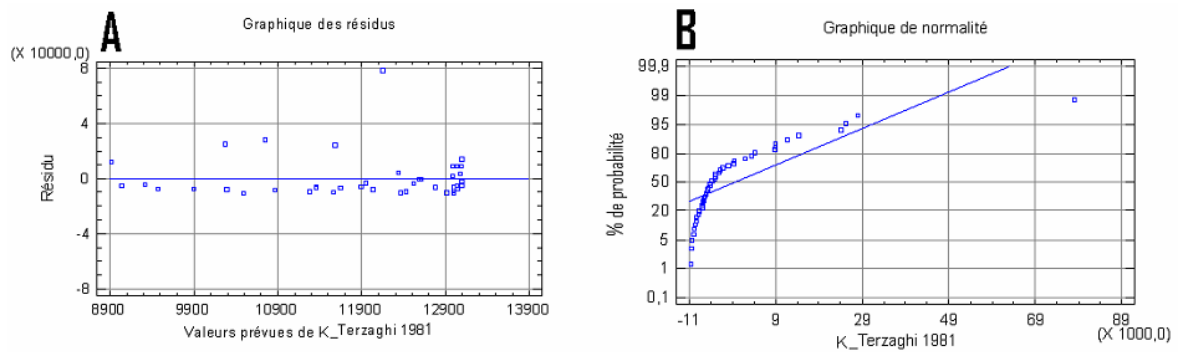


Figure 6.22. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Terzaghi₁₉₈₁.

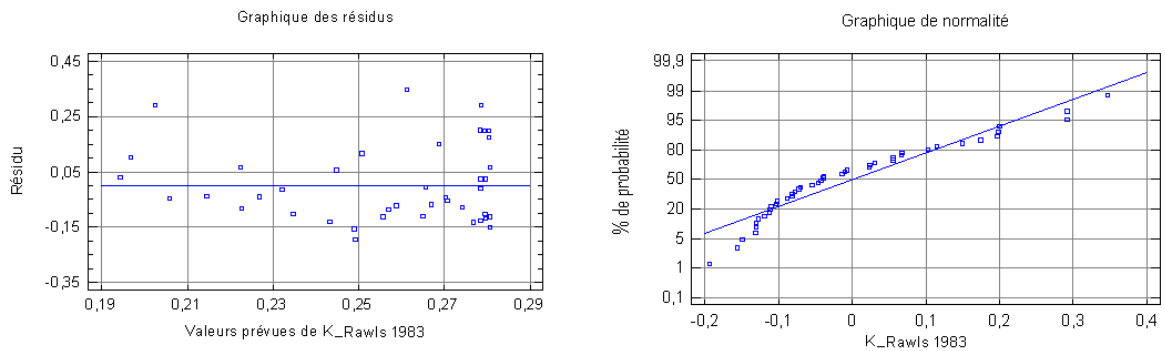


Figure 6.23. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Rawls₁₉₈₃.

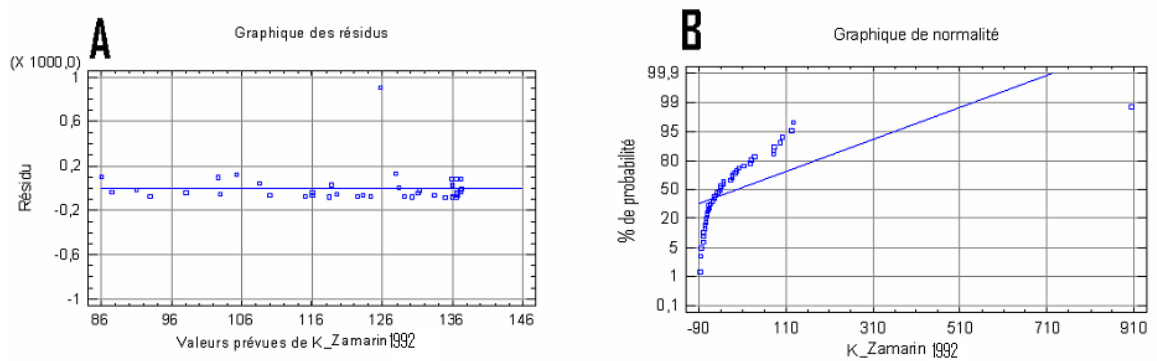


Figure 6.24. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Zamarin₁₉₉₂.

Sols sableux

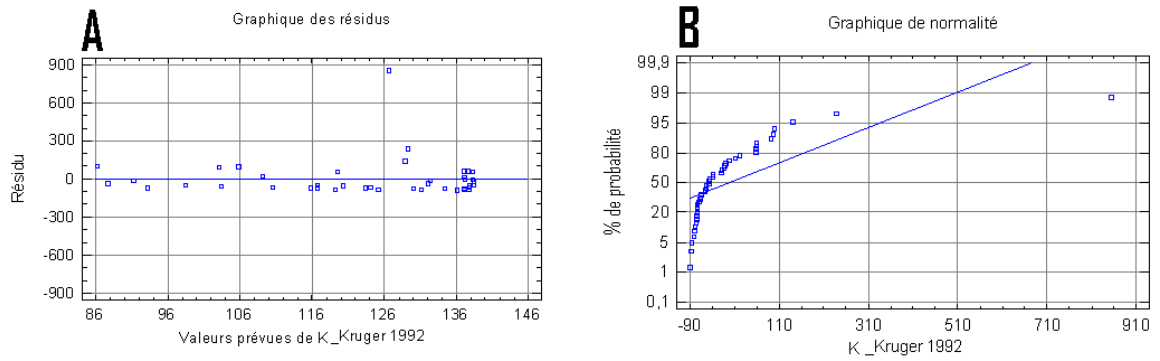


Figure 6.25. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Kruger₁₉₉₂.

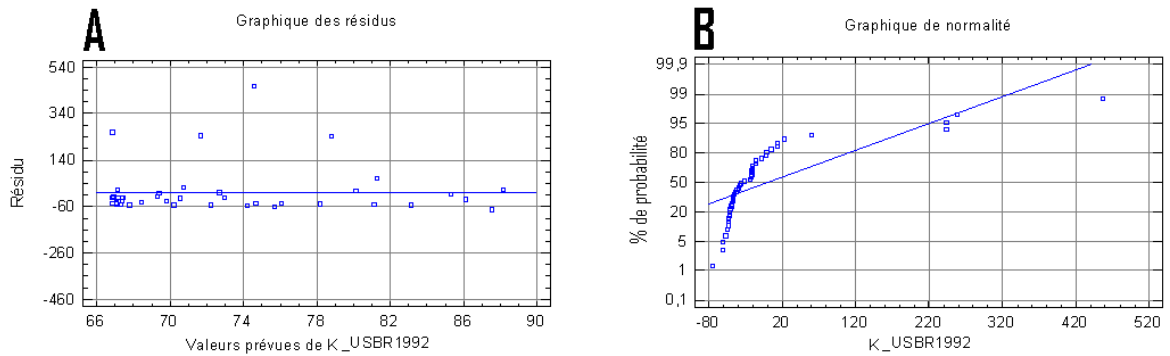


Figure 6.26. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de USBR₁₉₉₂.

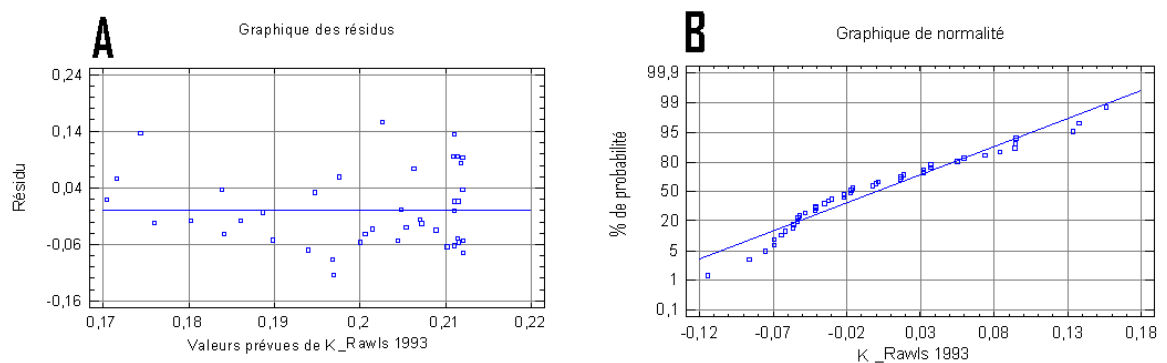


Figure 6.27. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Rawls₁₉₉₃.

6.3. Accommodation des modèles de régression.

6.3.1. Evaluation des modèles de régression linéaire simple : ANOVA et R^2 .

L'accommodation du modèle de régression consiste à supprimer les observations aberrantes c'est-à-dire présentant une valeur du levier importante ou à transformer les données de SoilVision 3.0., selon une formule mathématique donnée par le logiciel STATGRAPHICS (Centurion XV version 15.2.05). L'accommodation du modèle est réalisée d'une manière itérative en procédant à chaque fois à une analyse de la variance et des résidus jusqu'à atteindre une valeur maximale de R^2 .

Les droites de régression des modèles prédictifs après accommodation ne sont plus horizontales (modèle non significatif) ce qui montre une amélioration des valeurs des coefficient a_0 et a_1 dans la plupart des modèles (figures 6.28 à 6.54). Pour le modèle Koney₁₉₆₂ par exemple, elles passent de $a_0 = 10,47$ à $a_0 = 2,89$ et de $a_1 = 0,02$ à $1,23$.

En général, l'accommodation des modèles de régression linéaire a permis d'améliorer les valeurs de R^2 pour tous les modèles prédictifs (figures 6.28 à 6.54).

Pour les sols argileux le coefficient de détermination R^2 est passé de 0,00% à 7,66% pour le modèle de Rawls₁₉₉₃ après accommodation et de 0,40% à 19,39% pour le modèle de Koney₁₉₆₂. L'analyse de la variance montre que les modèles Rawls₁₉₈₃, Rawls₁₉₉₃ et Terzaghi₁₉₈₁ sont significatifs, leurs probabilités sont respectivement de 0,0545, 0,0421 et 0,0318. Elle montre aussi que le modèle de Koney₁₉₆₂ est le meilleur modèle en étant hautement significatif avec une probabilité de 0,0031 (figures 6.28 à 6.36).

Dans le cas des sols limoneux-sableux, le meilleur modèle prédictif est celui de Zamarin₁₉₉₂. Son R^2 est de 57,62% après accommodation alors qu'il n'était que de 1,70%. L'ANOVA pour ce modèle montre un lien très hautement significatif entre $K_{modèle}$ et $K_{mesuré}$ ($p = 0,0000$). Il est suivi de Kruger₁₉₉₂ ($p = 0,0000$), de Rawls₁₉₉₃ ($p = 0,0047$), de Rawls₁₉₈₃ ($p = 0,0062$) et de Kozeney₁₉₆₂ ($p = 0,0102$) (figures 6.37 à 6.45).

En ce qui concerne les sols sableux, l'accommodation du modèle de régression linéaire a permis de faire passer la valeur de R^2 de 1,11% à 22,96% pour le modèle de Kruger₁₉₉₂. Les modèles de Rawls₁₉₉₃ ($p = 0,0458$), de Zamarin₁₉₉₂ ($p = 0,0449$), de Rawls₁₉₈₃ ($p = 0,0320$) sont significatifs et celui de Kruger₁₉₉₂ est hautement significatif, il est ainsi le meilleur modèle pour les sols sableux (figures 6.46 à 6.54).

Sols argileux

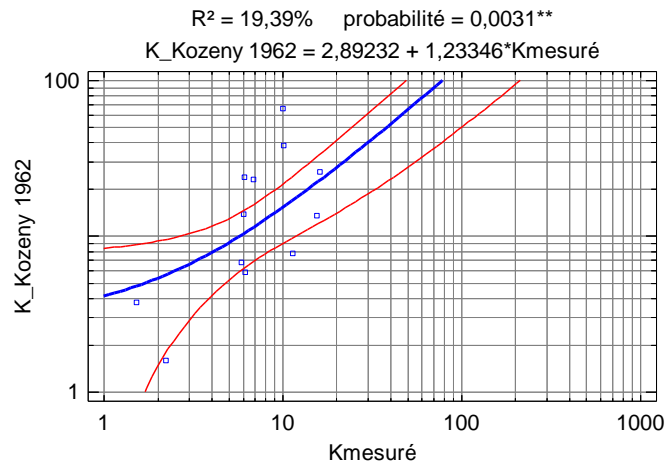


Figure 6.28. Droite de regression de $K_{\text{Kozeny}_{1962}}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{\text{mesuré}}$ ($m/s \times 10^{-6}$).

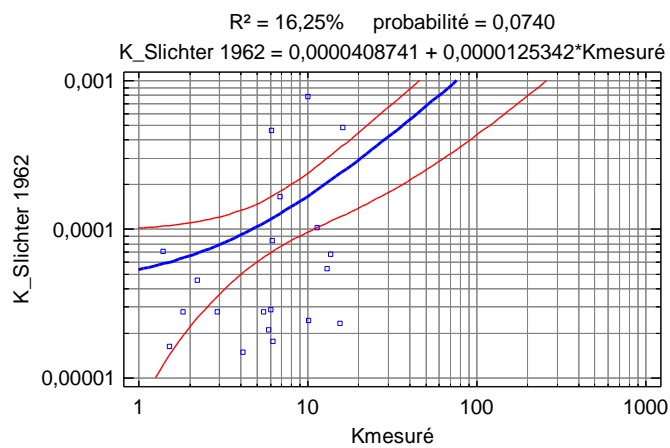


Figure 6.29. Droite de regression de $K_{\text{Slichter}_{1962}}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{\text{mesuré}}$ ($m/s \times 10^{-6}$).

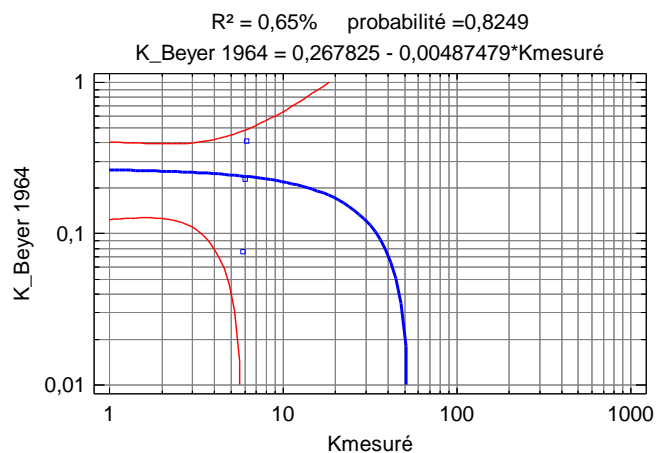


Figure 6.30. Droite de regression de $K_{\text{Beyer}_{1964}}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{\text{mesuré}}$ ($m/s \times 10^{-6}$).

Sols argileux

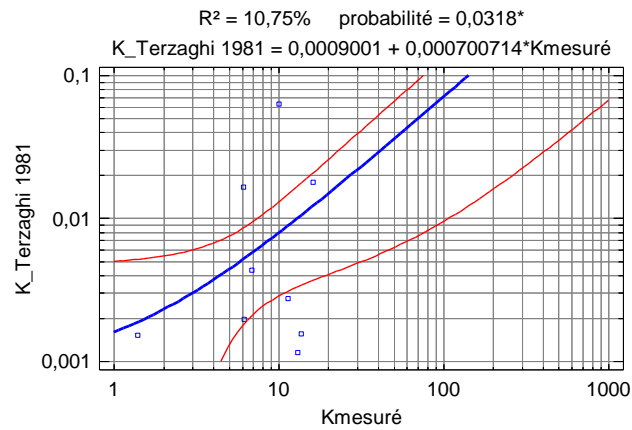


Figure 6.31. Droite de regression de $K_Terzaghi_{1981}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$).

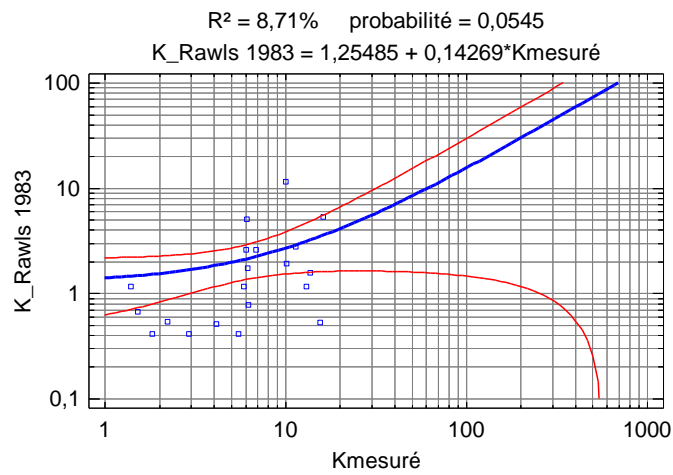


Figure 6.32. Droite de regression de K_Rawls_{1983} ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$).

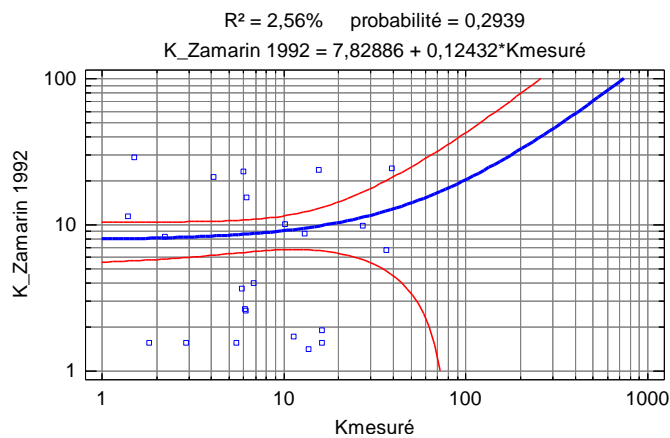


Figure 6.33. Droite de regression de $K_Zamarin_{1992}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$).

Sols argileux

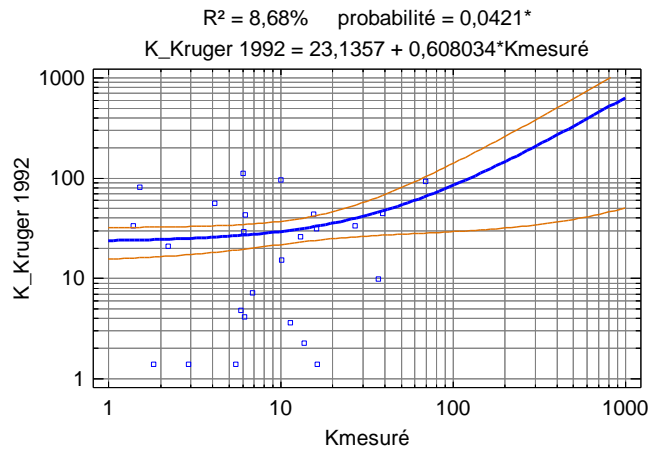


Figure 6.34. Droite de regression de K_Kruger_{1992} ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$).

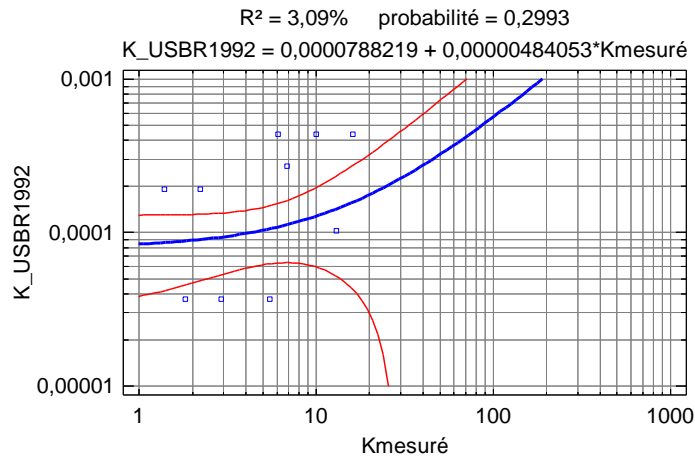


Figure 6.35. Droite de regression de K_USBR_{1992} ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$).

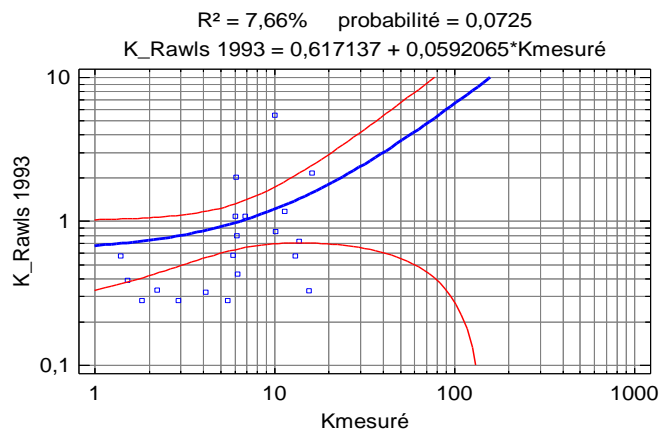


Figure 6.36. Droite de regression de K_Rawls_{1993} ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$).

Sols limoneux-sableux

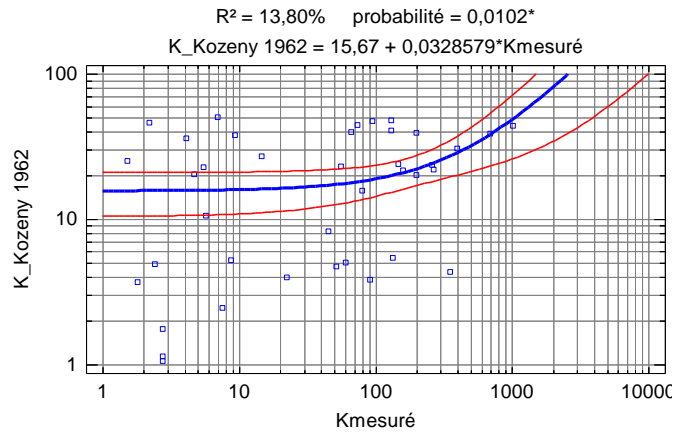


Figure 6.37. Droite de regression de $K_{\text{Kozeny}_{1962}}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{\text{mesuré}}$ ($m/s \times 10^{-6}$).

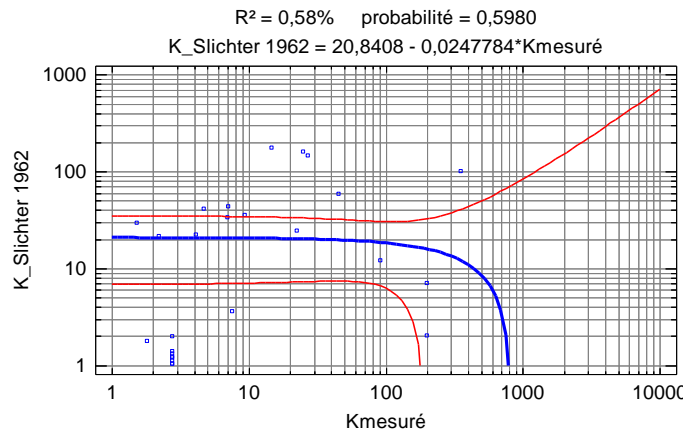


Figure 6.38. Droite de regression de $K_{\text{Slichter}_{1962}}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{\text{mesuré}}$ ($m/s \times 10^{-6}$).

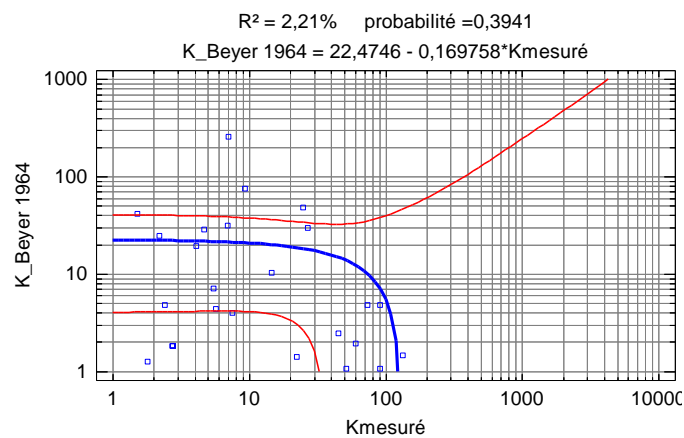


Figure 6.39. Droite de regression de $K_{\text{Beyer}_{1964}}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{\text{mesuré}}$ ($m/s \times 10^{-6}$).

Sols limoneux-sableux

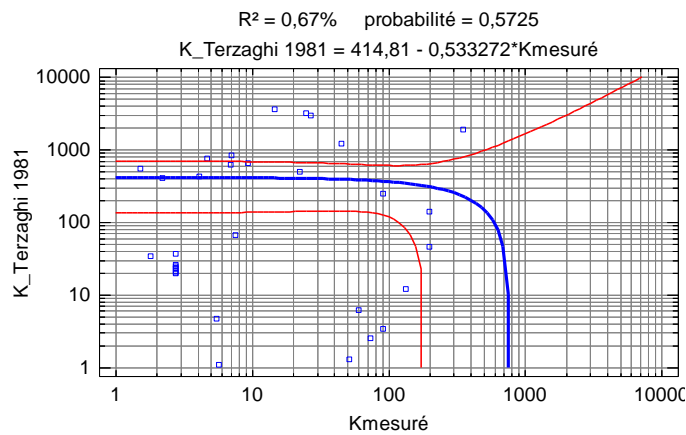


Figure 6.40. Droite de regression de $K_Terzaghi_{1981}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$).

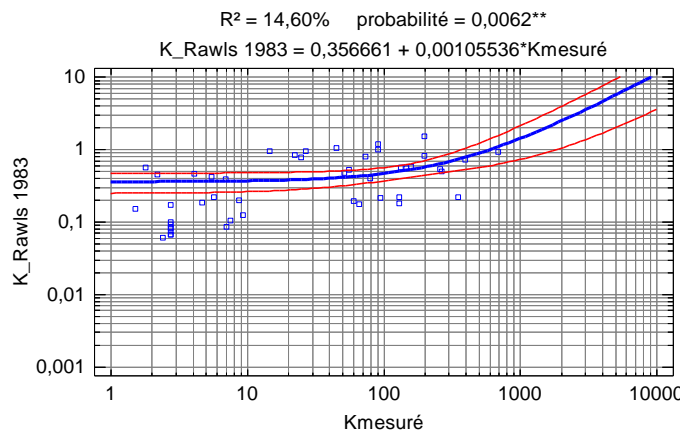


Figure 6.41. Droite de regression de K_Rawls_{1983} ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$).

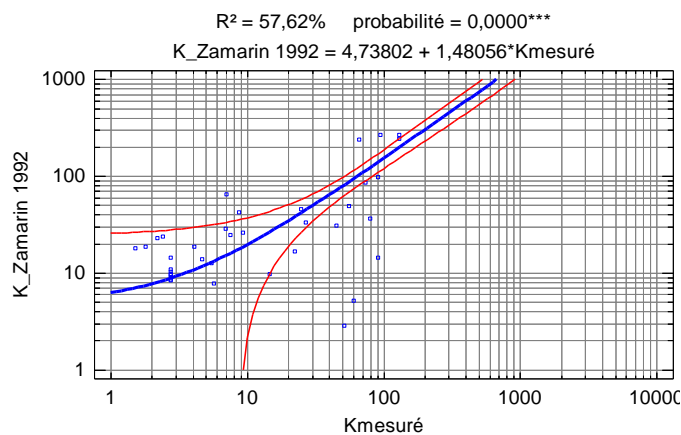


Figure 6.42. Droite de regression de $K_Zamarin_{1992}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$).

Sols limoneux-sableux

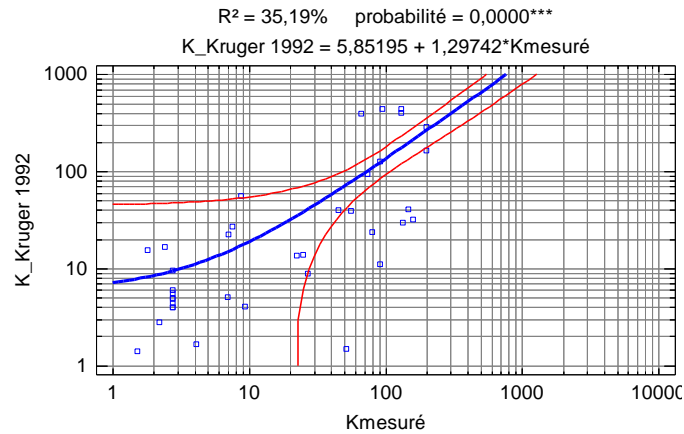


Figure 6.43. Droite de regression de $K_{\text{Kruger 1992}}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{\text{mesuré}}$ ($m/s \times 10^{-6}$).

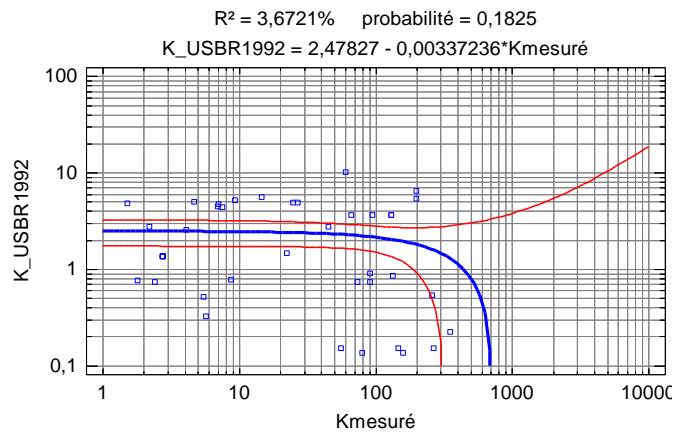


Figure 6.44. Droite de regression de $K_{\text{USBR 1992}}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{\text{mesuré}}$ ($m/s \times 10^{-6}$).

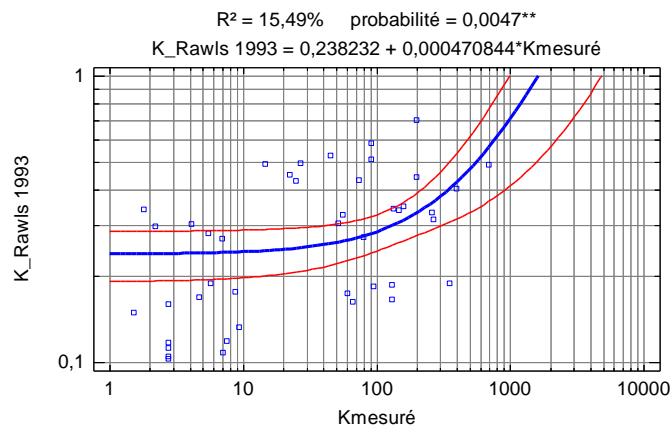


Figure 6.45. Droite de regression de $K_{\text{Rawls 1993}}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{\text{mesuré}}$ ($m/s \times 10^{-6}$).

Sols sableux

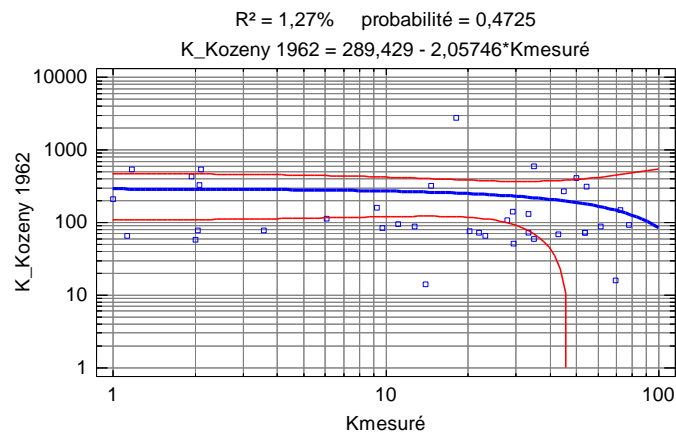


Figure 6.46. Droite de regression de $K_{\text{Kozeny}_{1962}}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{\text{mesuré}}$ ($m/s \times 10^{-6}$).

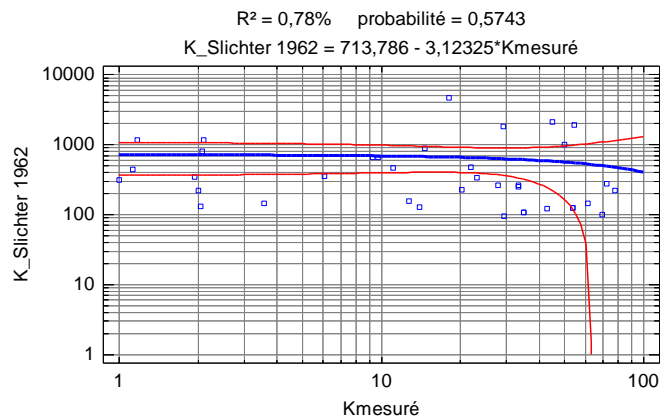


Figure 6.47. Droite de regression de $K_{\text{Slichter}_{1962}}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{\text{mesuré}}$ ($m/s \times 10^{-6}$).

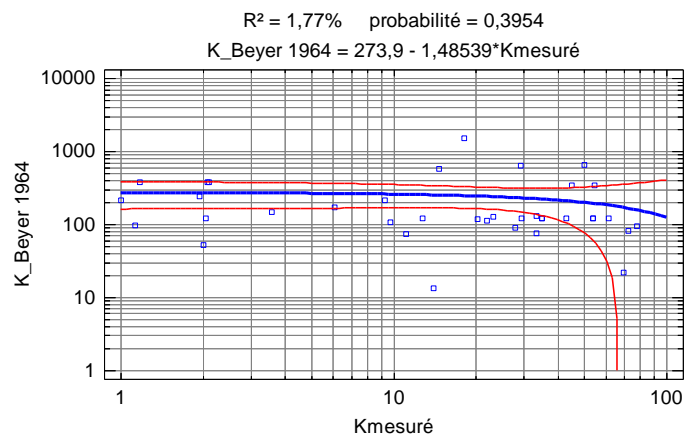


Figure 6.48. Droite de regression de $K_{\text{Beyer}_{1964}}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{\text{mesuré}}$ ($m/s \times 10^{-6}$).

Sols sableux

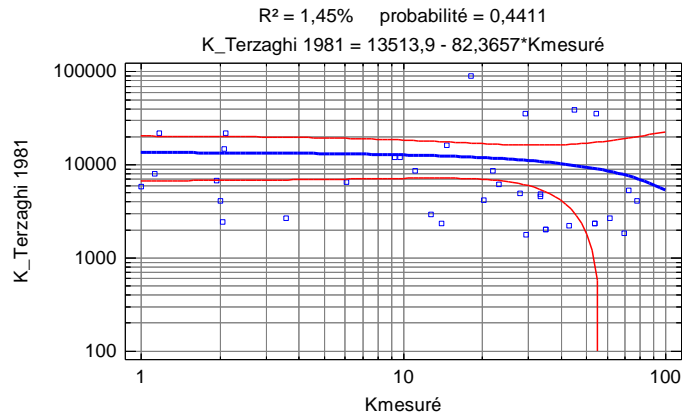


Figure 6.49. Droite de regression de $K_Terzaghi_{1981}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$).

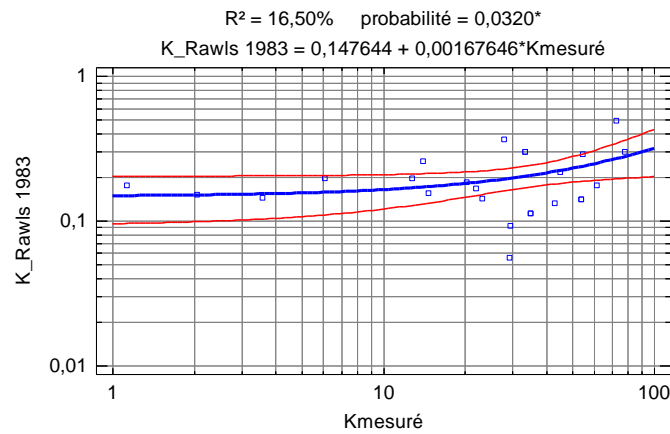


Figure 6.50. Droite de regression de K_Rawls_{1983} ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$).

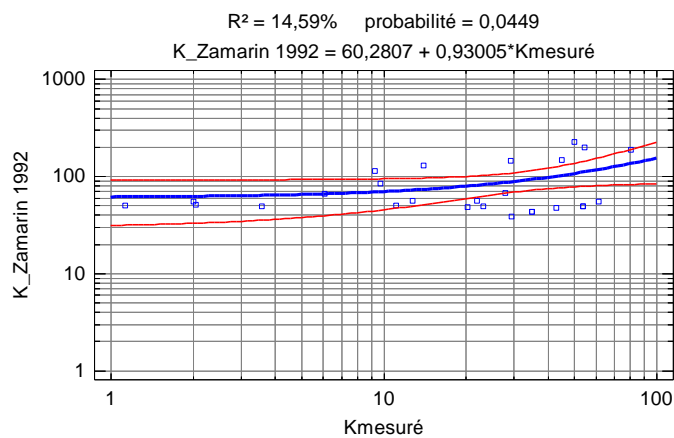


Figure 6.51. Droite de regression de $K_Zamarin_{1992}$ ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$).

Sols sableux

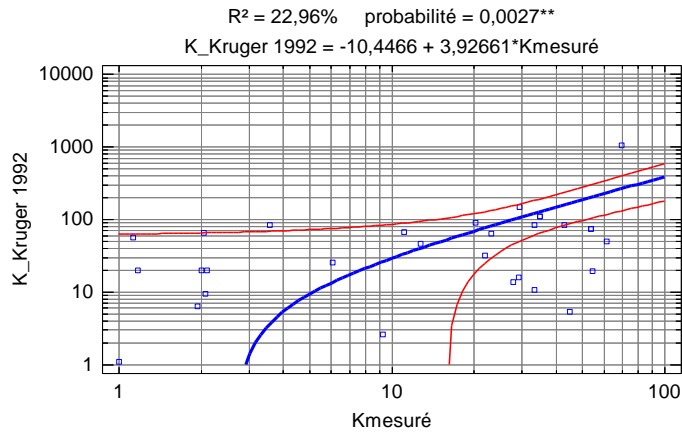


Figure 6.52. Droite de regression de K_Kruger_{1992} ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$).

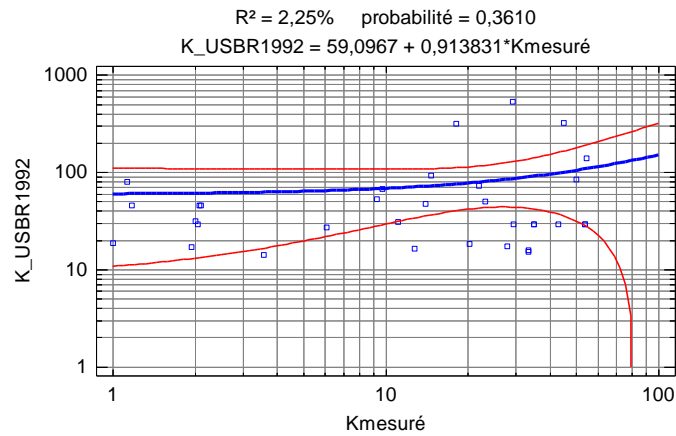


Figure 6.53. Droite de regression de K_USBR_{1992} ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$).

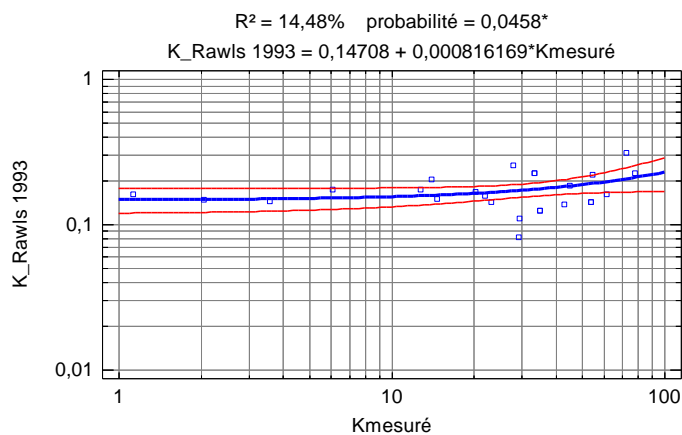


Figure 6.54. Droite de regression de K_Rawls_{1993} ($m/s \times 10^{-6}$) en fonction de $K_{mesuré}$ ($m/s \times 10^{-6}$).

6.3.2. Evaluation de la validité des modèles de régression : Analyse des résidus.

De manière générale, nous notons une amélioration concernant la distribution normale et l'homoscédasticité des résidus quelque soit le modèle et le type de sols après accommodation (figures 6.55 à 6.81).

Pour le cas des sols argileux, les figures 6.55-A à 6.63-A montrent qu'après accommodation, les résidus suivent plus ou moins une bande horizontale pour les neuf modèles prédictifs. Donc l'hypothèse de la distribution normale est vérifiée. Les figures de la distribution normalité des résidus (figure 6.55-B à 6.63-B) montrent que les points des pourcentages de probabilité en fonction des résidus suivent plus ou moins une droite. Donc nous pouvons conclure que l'hypothèse de homoscédasticité est vérifiée.

L'hypothèse de normalité et d'homoscédasticité étant vérifiée, nous pouvons conclure que pour les sols argileux les modèles de régression sont statistiquement valides.

En ce qui concerne les sols limoneux-sableux, les figures montrent que l'hypothèse de homoscédasticité et de la distribution normale ne sont pas vérifiées pour les Slichter₁₉₆₂ (figures 6.65), Beyer₁₉₆₄ (figures 6.66), Terzaghi₁₉₈₁ (figures 6.67) et USBR₁₉₉₂ (figures 6.71). Les hypothèses n'étant pas vérifiées, nous ne pouvons pas donc les valider. Cependant, pour Kozeny₁₉₆₂ (figures 6.64), Kruger₁₉₉₂ (figures 6.70), Rawls₁₉₉₃ (figures 6.72), Rawls₁₉₈₃ (figures 6.68) et Zamarin₁₉₉₂ (figures 6.69) les modèles sont valides car les deux hypothèses sont vérifiées.

Pour les sols sableux, les hypothèses de normalité et de l'homoscédasticité ne sont pas vérifiées pour les modèles de régression de Kozeny₁₉₆₂ (figures 6.73), Slichter₁₉₆₂ (figures 6.74), Beyer₁₉₆₄ (figures 6.75), Terzaghi₁₉₈₁ (figures 6.76) et USBR₁₉₉₂ (figures 6.80). Donc ces modèles ne sont pas valides. Alors que pour les modèles de régression de Rawls₁₉₈₃ (figures 6.77), Zamarin₁₉₉₂ (figures 6.78), Rawls₁₉₉₃ (figures 6.81) les hypothèses étant vérifiées ils sont donc validés. Dans le cas du modèle de régression de Kruger₁₉₉₂, la figure 6.79 montre que les points ne suivent pas tout à fait une droite, néanmoins nous notons une amélioration dans la distribution normale après accommodation.

Sols argileux

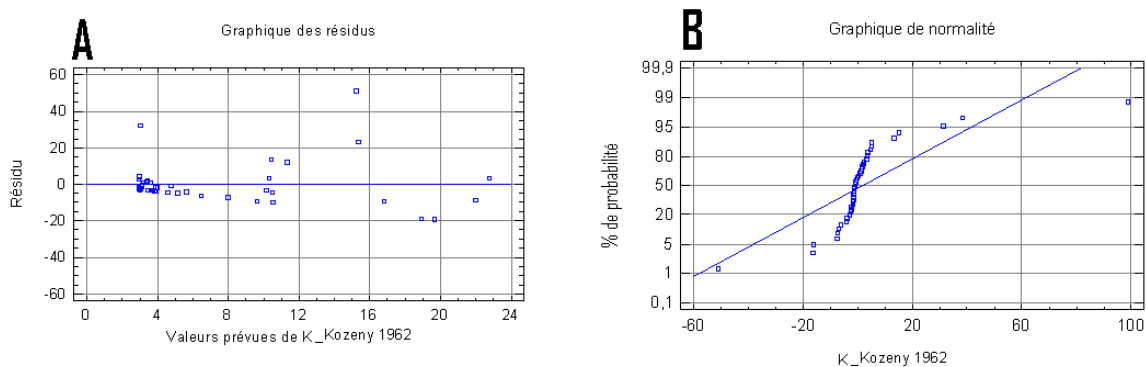


Figure 6.55. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Kozeny₁₉₆₂ après accommodation.

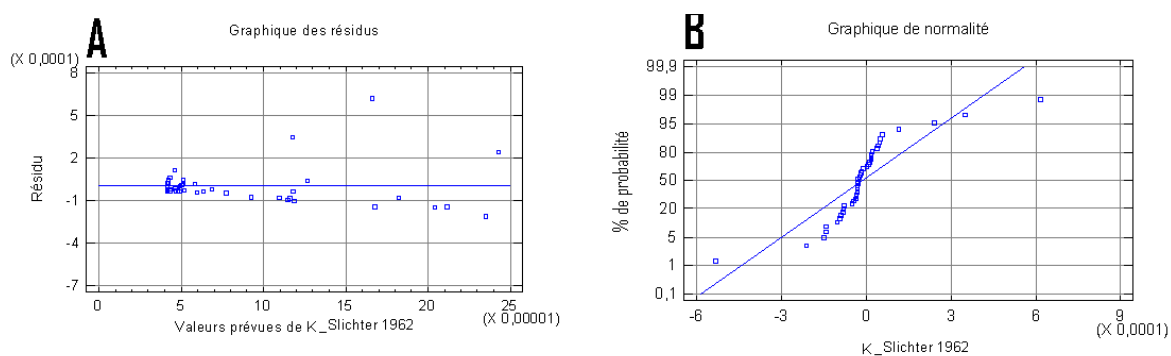


Figure 6.56. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Slichter₁₉₆₂ après accommodation.

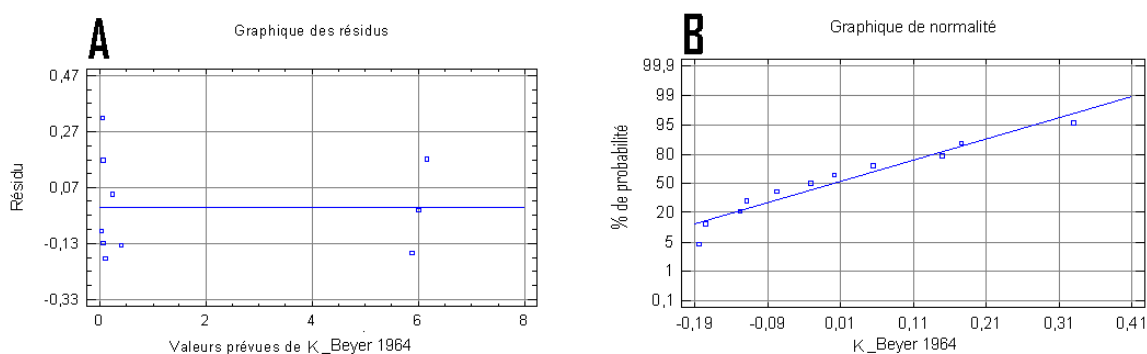


Figure 6.57. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Beyer₁₉₆₄ après accommodation.

Sols argileux

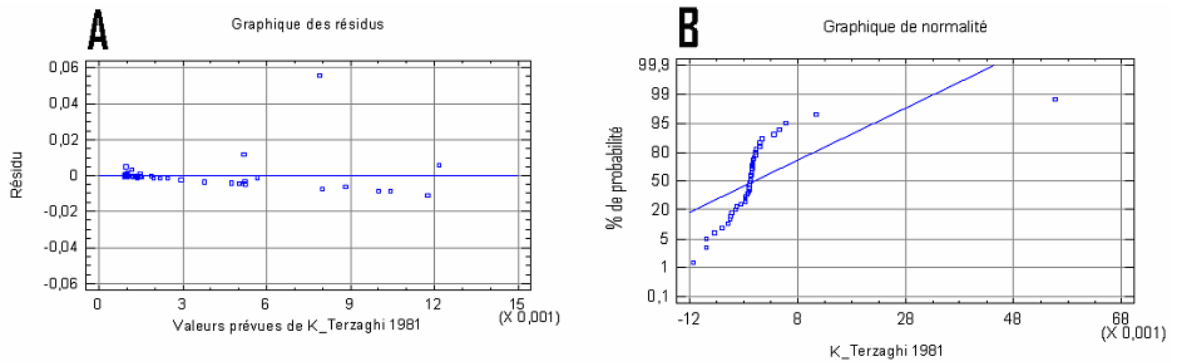


Figure 6.58. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Terzaghi₁₉₈₁ après accommodation.

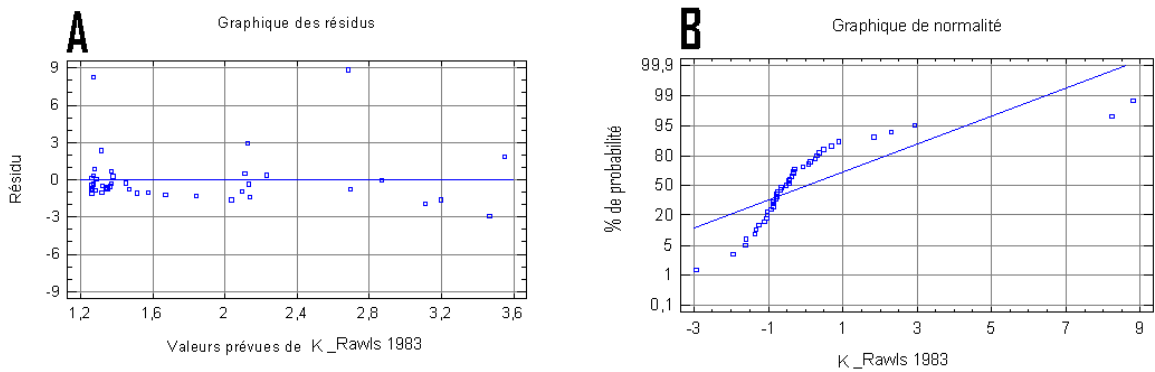


Figure 6.59. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Rawls₁₉₈₃ après accommodation.

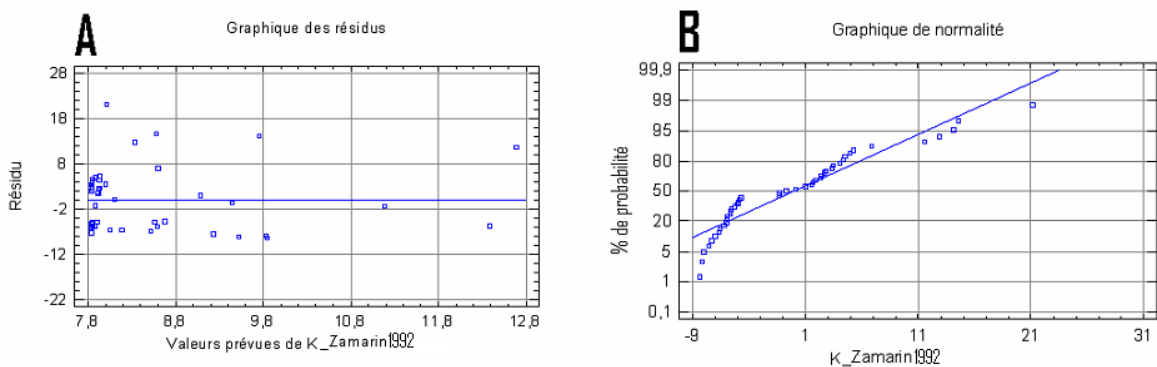


Figure 6.60. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Zamarin₁₉₉₂ après accommodation.

Sols argileux

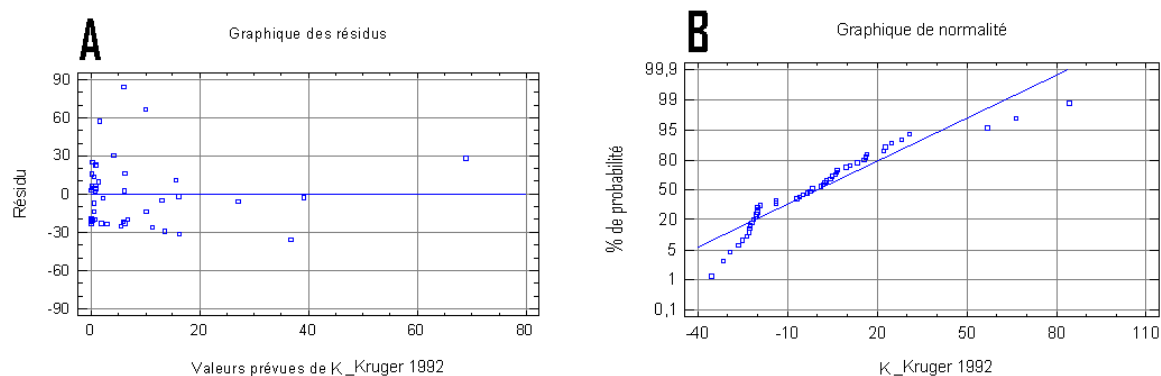


Figure 6.61. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Kruger₁₉₉₂ après accommodation.

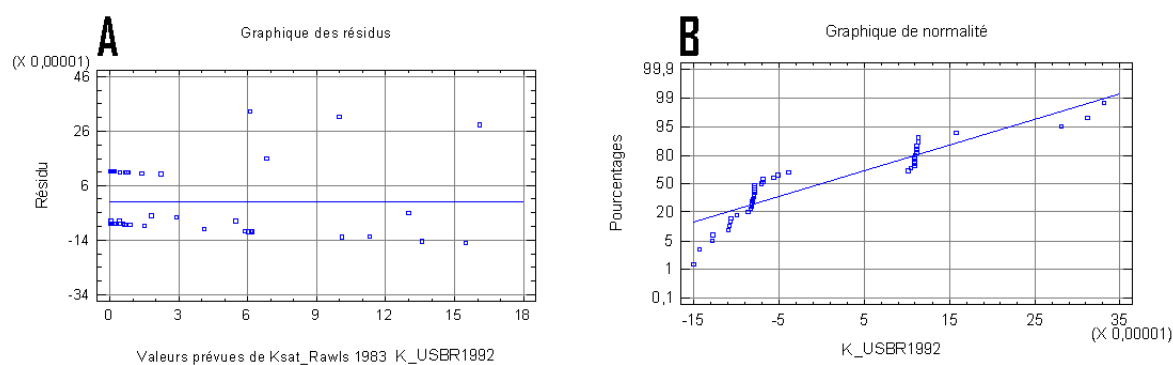


Figure 6.62. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de USBR₁₉₉₂ après accommodation.

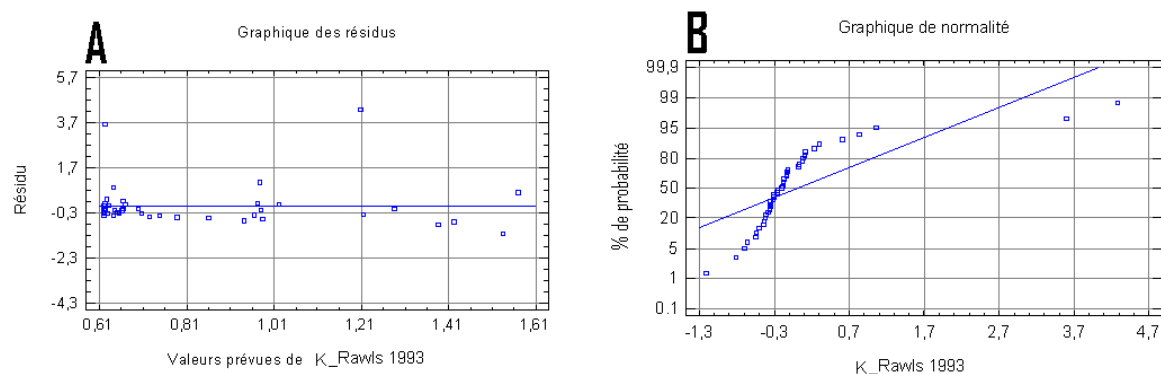


Figure 6.63. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Rawls₁₉₉₃ après accommodation.

Sols limoneux-sableux

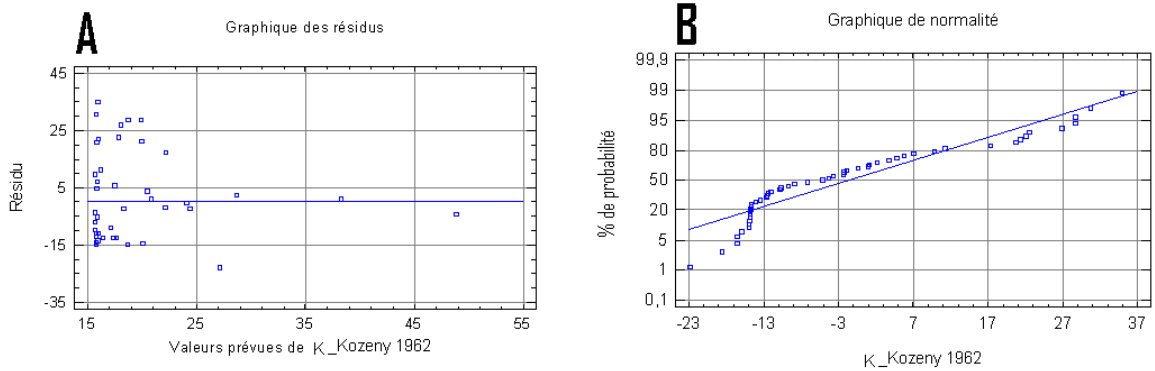


Figure 6.64. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Kozeny₁₉₆₂ après accommodation.

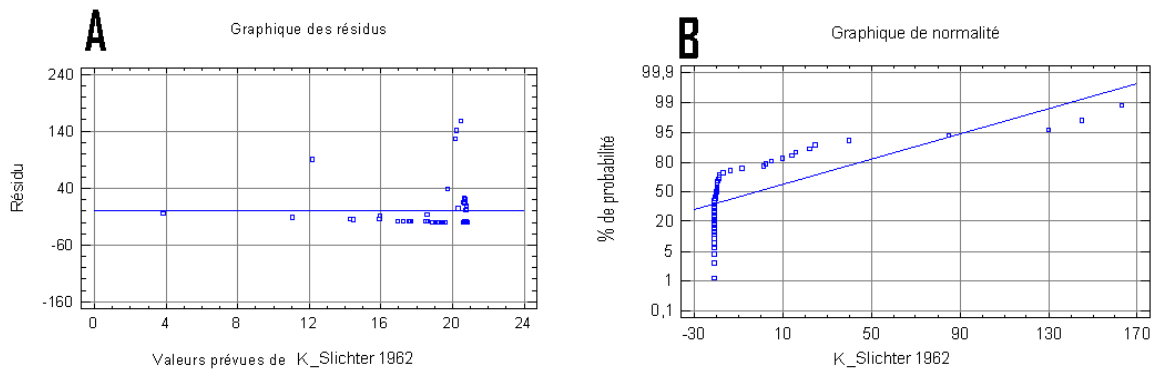


Figure 6.65. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Slichter₁₉₆₂ après accommodation.

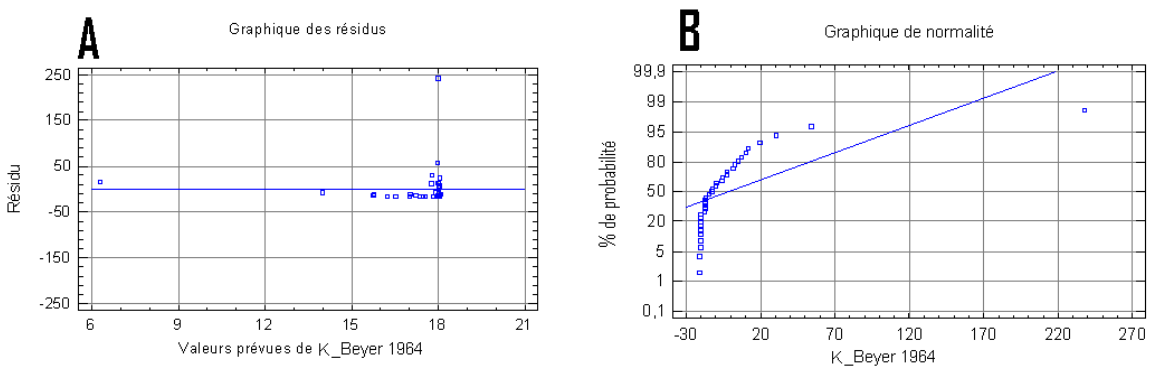


Figure 6.66. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Beyer₁₉₆₄ après accommodation.

Sols limoneux-sableux

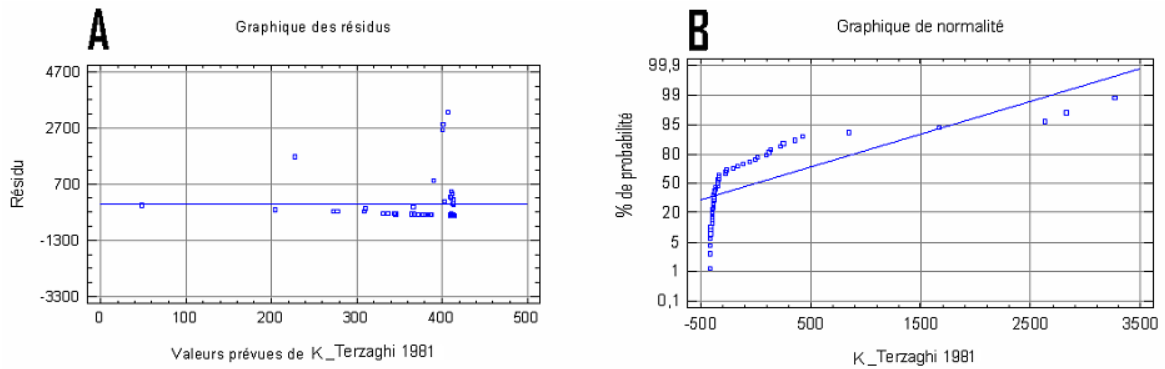


Figure 6.67. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Terzaghi₁₉₈₁ après accommodation.

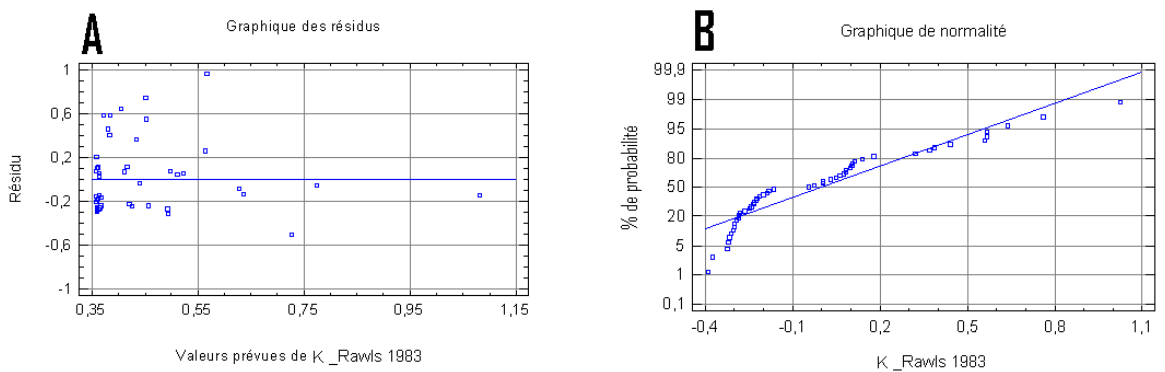


Figure 6.68. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Rawls₁₉₈₃ après accommodation.

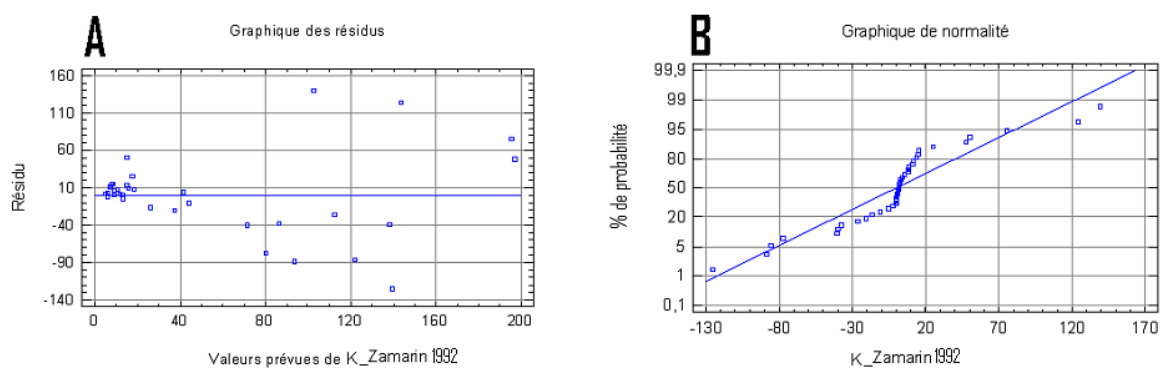


Figure 6.69. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Zamarin₁₉₉₂ après accommodation.

Sols limoneux-sableux

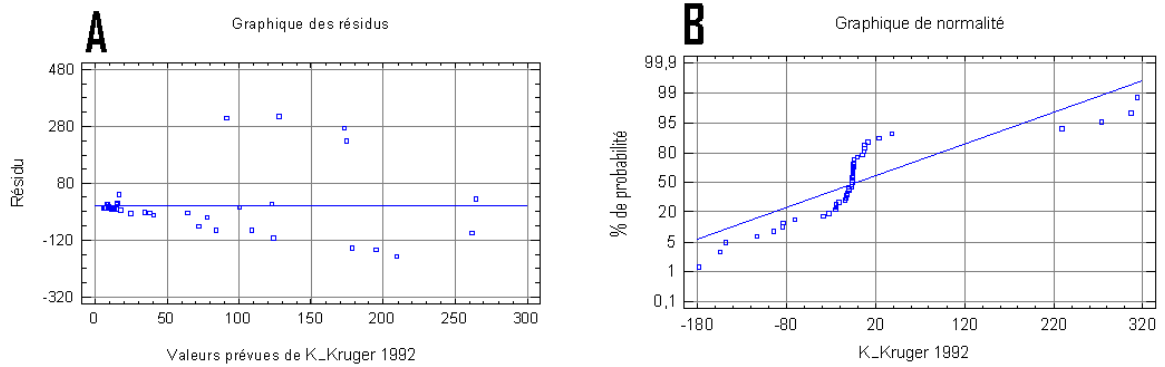


Figure 6.70. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Kruger₁₉₉₂ après accommodation.

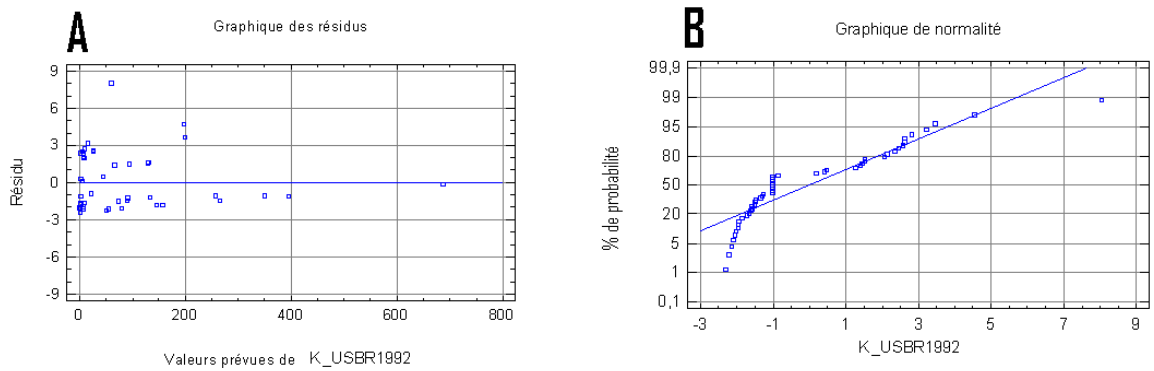


Figure 6.71. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de USBR₁₉₉₂ après accommodation.

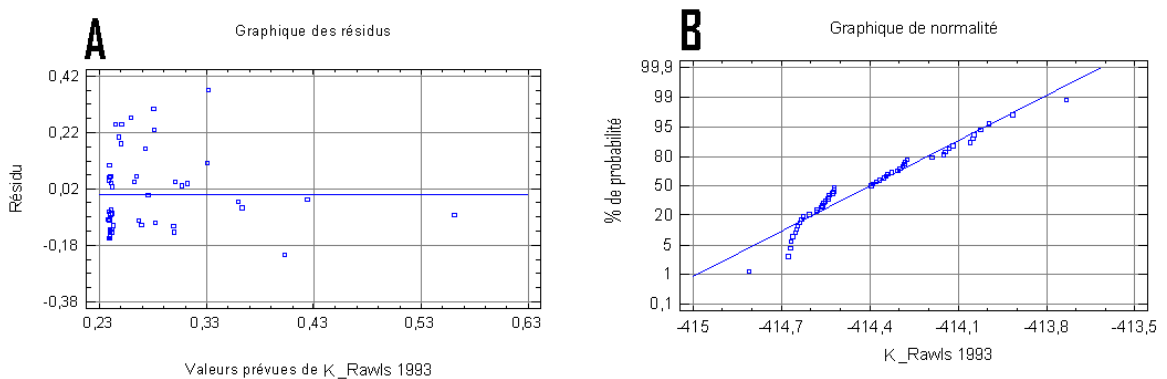


Figure 6.72. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Rawls₁₉₉₃ après accommodation.

Sols sableux

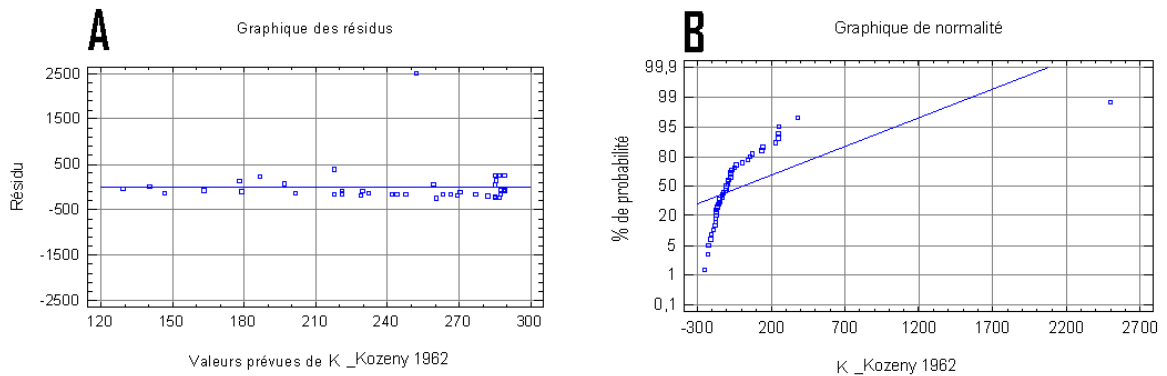


Figure 6.73. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Kozeny₁₉₆₂ après accommodation.

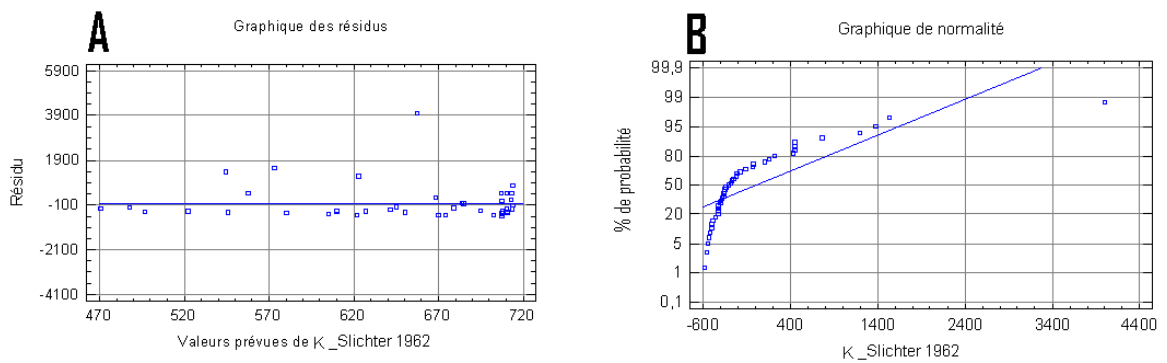


Figure 6.74. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Slichter₁₉₆₂ après accommodation.

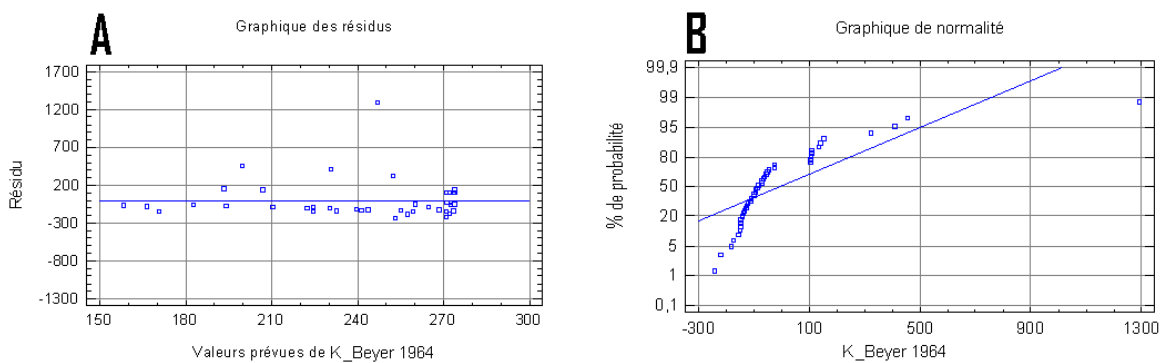


Figure 6.75. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Beyer₁₉₆₄ après accommodation.

Sols sableux

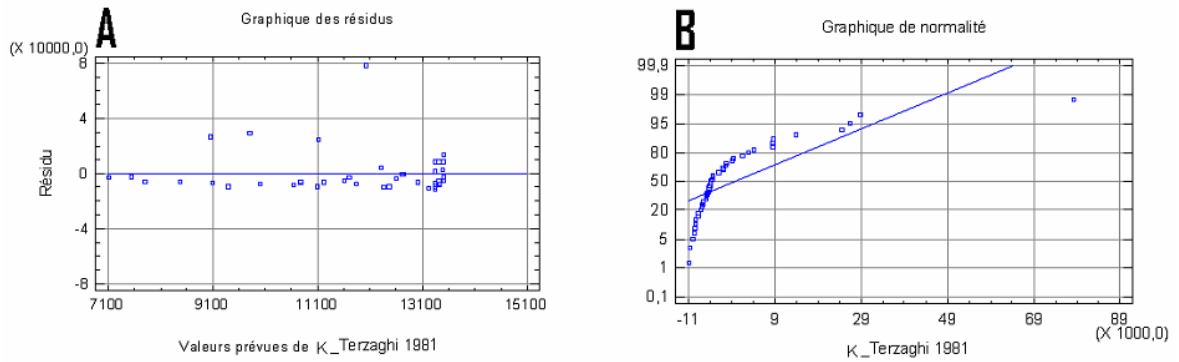


Figure 6.76. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Terzaghi₁₉₈₁ après accommodation.

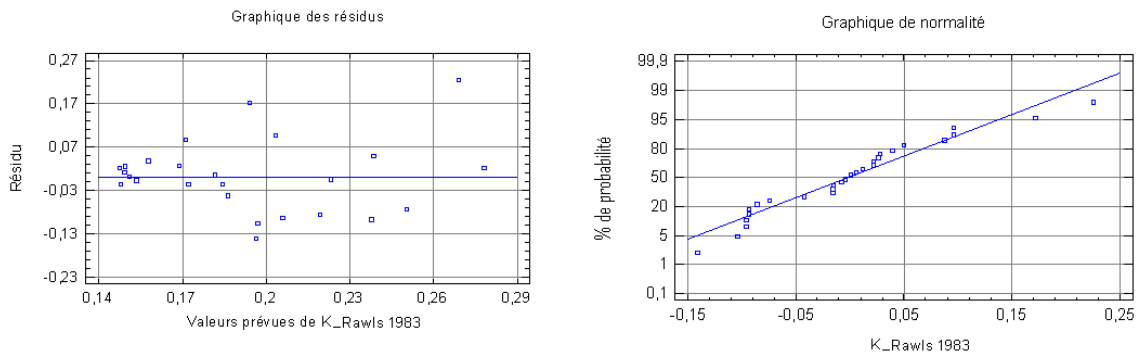


Figure 6.77. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Rawls₁₉₈₃ après accommodation.

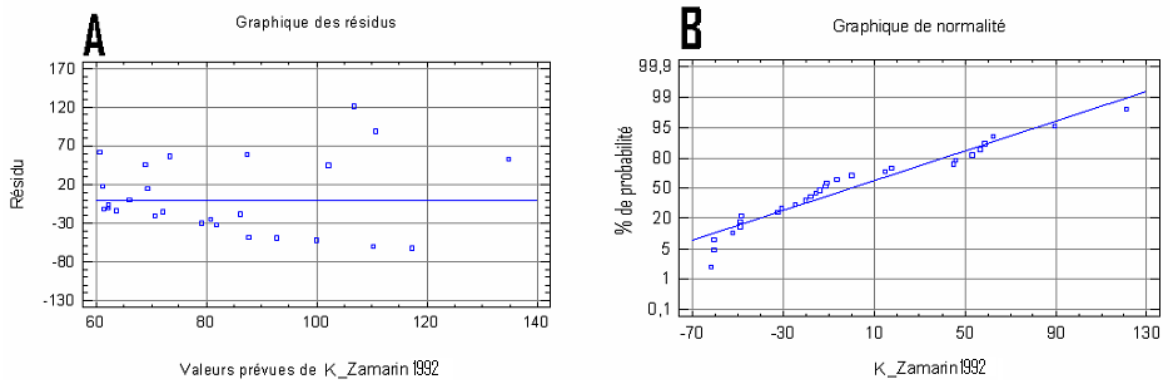


Figure 6.78. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Zamarin₁₉₉₂ après accommodation.

Sols sableux

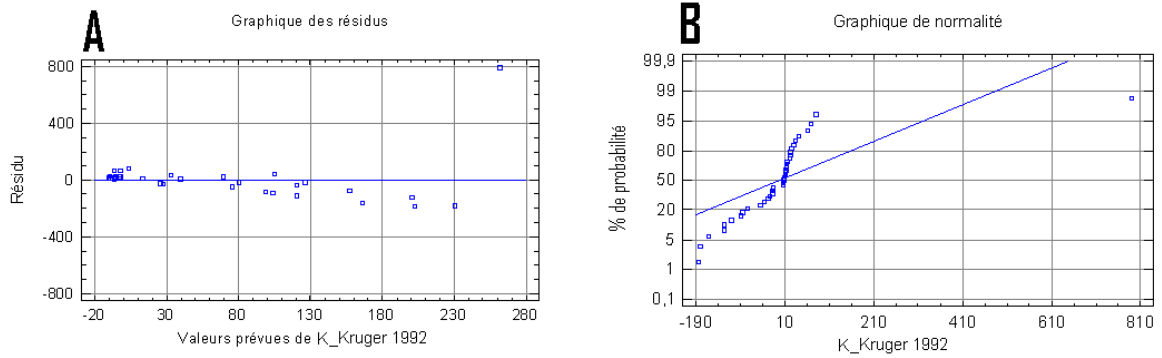


Figure 6.79. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Kruger₁₉₉₂ après accommodation.

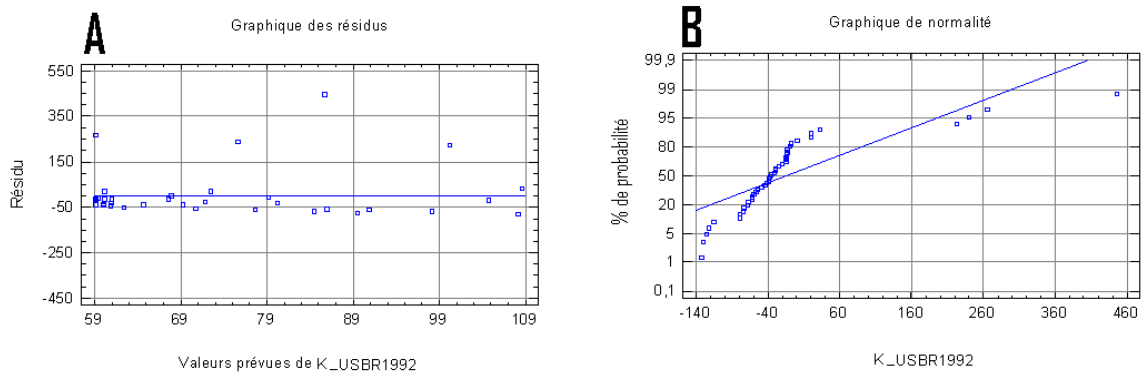


Figure 6.80. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de USBR₁₉₉₂ après accommodation.

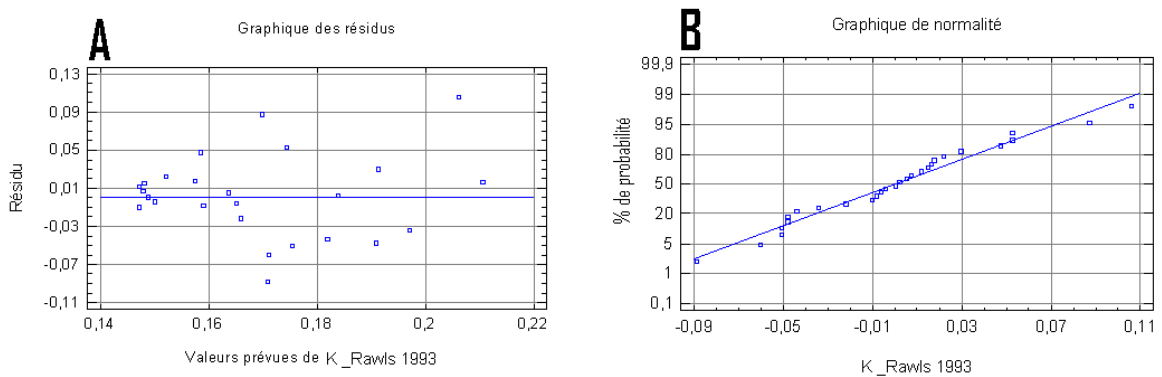


Figure 6.81. Graphique des résidus (A) et de normalité (B) du modèle de régression de Rawls₁₉₉₃ après accommodation.

Les valeurs des probabilités et des R^2 des neuf modèles pour les trois types de sols après accommodation sont résumées dans le tableau 5.

Tableau 5. Modèle de régression, ANOVA et R^2 après accommodation

(* : Significatif ; ** : Hautement significatif ; *** : Très hautement significatif).

| Modèle | Régression | ANOVA | R^2 (%) |
|--------------------------------|---|----------------------------|--------------|
| | | Probabilité -signification | |
| Sols argileux | | | |
| Kozeny ₁₉₆₂ | $2,89232 + 1,23346.K_{mesuré}$ | 0,0031** | 19,39 |
| Slichter ₁₉₆₂ | $0,0000408741 + 0,0000125342.K_{mesuré}$ | 0,0740 | 16,25 |
| Beyer ₁₉₆₄ | $0,267825 - 0,00487479.K_{mesuré}$ | 0,8249 | 0,65 |
| Terzaghi ₁₉₈₁ | $0,0009001 + 0,000700714.K_{mesuré}$ | 0,0318* | 10,75 |
| Rawls ₁₉₈₃ | $1,25485 + 0,14269.K_{mesuré}$ | 0,0545 | 8,71 |
| Zamarin ₁₉₉₂ | $7,82886 + 0,12432.K_{mesuré}$ | 0,2939 | 2,56 |
| Kruger ₁₉₉₂ | $23,1357 + 0,608034.K_{mesuré}$ | 0,0421 | 8,68 |
| USBR ₁₉₉₂ | $0,0000788219 + 0,00000484053.K_{mesuré}$ | 0,2993 | 3,09 |
| Rawls ₁₉₉₃ | $0,617137 + 0,0592065.K_{mesuré}$ | 0,0725 | 7,66 |
| Sols limoneux - sableux | | | |
| Kozeny ₁₉₆₂ | $15,67 + 0,0328579.K_{mesuré}$ | 0,01102* | 13,80 |
| Slichter ₁₉₆₂ | $20,8408 - 0,0247784.K_{mesuré}$ | 0,5980 | 0,58 |
| Beyer ₁₉₆₄ | $22,4746 - 0,169758.K_{mesuré}$ | 0,3941 | 2,21 |
| Terzaghi ₁₉₈₁ | $414,81 - 0,5332272.K_{mesuré}$ | 0,5725 | 0,67 |
| Rawls ₁₉₈₃ | $0,356661 + 0,00105536.K_{mesuré}$ | 0,0062** | 14,60 |
| Zamarin ₁₉₉₂ | $4,73802 + 1,48056.K_{mesuré}$ | 0,0000*** | 57,62 |
| Kruger ₁₉₉₂ | $5,85195 + 1,29742.K_{mesuré}$ | 0,0000*** | 35,19 |
| USBR ₁₉₉₂ | $2,47827 - 0,00337236.K_{mesuré}$ | 0,1825 | 3,6721 |
| Rawls ₁₉₉₃ | $0,238232 + 0,000470844.K_{mesuré}$ | 0,0047** | 15,49 |
| Sols sableux | | | |
| Kozeny ₁₉₆₂ | $289,429 - 2,05746.K_{mesuré}$ | 0,4725 | 1,27 |
| Slichter ₁₉₆₂ | $713,786 - 3,12325.K_{mesuré}$ | 0,5743 | 0,78 |
| Beyer ₁₉₆₄ | $273,9 - 1,48539.K_{mesuré}$ | 0,3954 | 1,77 |
| Terzaghi ₁₉₈₁ | $13513,9 - 82,3657.K_{mesuré}$ | 0,4411 | 1,45 |
| Rawls ₁₉₈₃ | $0,147644 + 0,00167646.K_{mesuré}$ | 0,0320* | 16,50 |
| Zamarin ₁₉₉₂ | $60,2807 + 0,93005.K_{mesuré}$ | 0,0449* | 14,59 |
| Kruger ₁₉₉₂ | $-10,4466 + 3,9266.K_{mesuré}$ | 0,0027** | 22,96 |
| USBR ₁₉₉₂ | $59,0967 + 0,913831.K_{mesuré}$ | 0,3610 | 2,25 |
| Rawls ₁₉₉₃ | $0,14708 + 0,000816169.K_{mesuré}$ | 0,0458* | 14,48 |

6.4. Etude comparative de la prédictivité des modèles en fonction du type de sol.

Pour les sols argileux, les hypothèses de la distribution normale et de l'homoscidasticité sont vérifiées pour tous les modèles étudiés. Donc nous pouvons nous prononcer quant à leur prédictivité ou non, en fonction de leur signification statistique et du R^2 . Les modèles non prédictifs de la perméabilité (K) sont ceux de : Slichter₁₉₆₂, Beyer₁₉₆₄, Rawls₁₉₈₃, Zamarin₁₉₉₂, USBR₁₉₉₂ et Rawls₁₉₉₃.

Concernant les modèles de Slichter₁₉₆₂ et USBR₁₉₉₂, nos résultats rejoignent les conclusions de Vukovic et Soro (1992), Cheng et Chen (2007) et Odong (2007) et Ishaku *et al.* (2011). En effet, la comparaison de K pour différents types de sols estimés à partir des modèles prédictifs, révèle que les prédictions des modèles USBR₁₉₉₂ et Slichter₁₉₆₂ sont, dans tous les cas, inférieures aux autres modèles (Terzaghi₁₉₈₁, Kozeny-Carman, Hazen, Beyer₁₉₆₄). Selon les travaux de Ishaku *et al.* (2011), le modèle USBR₁₉₉₂ peut ne pas convenir pour la détermination de K des matériaux hétérogènes, car ce modèle peut sous-estimer la valeur de K .

Pour les deux autres types de sols, les hypothèses ne sont pas vérifiées pour tous les modèles qui sont statistiquement non significatifs ; à savoir ceux de Slichter₁₉₆₂, de Beyer₁₉₆₄, de Terzaghi₁₉₈₁, USBR₁₉₉₂ pour les sols limoneux-sableux et de Kozeny₁₉₆₂, de Slichter₁₉₆₂, de Beyer₁₉₆₄, de Terzaghi₁₉₈₁ et USBR₁₉₉₂ pour les sols sableux. Donc, nous ne pouvons pas nous prononcer sur l'évaluation de leur prédictivité.

Les modèles de Kozeny₁₉₆₂, de Terzaghi₁₉₈₁ et de Kruger₁₉₉₂ sont prédictifs de la perméabilité K pour les sols argileux (statistiquement significatifs ; distribution normale, homoscidasticité, vérifiées). Concernant les sols limoneux-sableux, les modèles prédictifs sont ceux de Kozeny₁₉₆₂, de Rawls₁₉₈₃, de Zamarin₁₉₉₂, de Kruger₁₉₉₂ et de Rawls₁₉₉₃. Enfin, pour les sols sableux, les modèles prédictifs sont ceux de Rawls₁₉₈₃, de Zamarin₁₉₉₂, de Kruger₁₉₉₂ et de Rawls₁₉₉₃.

Selon les résultats de Ishaku *et al.* (2011), le modèle de Terzaghi₁₉₈₁ a donné la plus haute valeur moyenne. Ce modèle est le plus utile pour les sols limoneux-sableux et sableux. Les valeurs de K calculées par les modèle de Hazen, Kozeny-Carman et Beyer₁₉₆₄ donnent des valeurs similaires. L'utilisation du modèle de Beyer₁₉₆₄ est adaptée à la taille effective des grains, allant de 0,06 à 0,6 mm (sols à tendance sableuse). Les moyennes globales de K estimées par les différents modèles dans l'ordre décroissant sont Terzaghi₁₉₈₁ > Kozeny-Carman > Hazen > Beyer₁₉₆₄ > Slichter₁₉₆₂ > USBR₁₉₉₂. Selon Odong (2007) le modèle de Beyer₁₉₆₄ est le meilleur prédicteur de K en ce qui concerne les sols limoneux-sableux. Dans notre cas, Les modèles prédictifs les plus performants pour chaque type de sol sont : Kozeny₁₉₆₂ pour les sols argileux, Zamarin₁₉₉₂ pour les limoneux-sableux et Kruger₁₉₉₂ pour les sols sableux (figure 6.82).

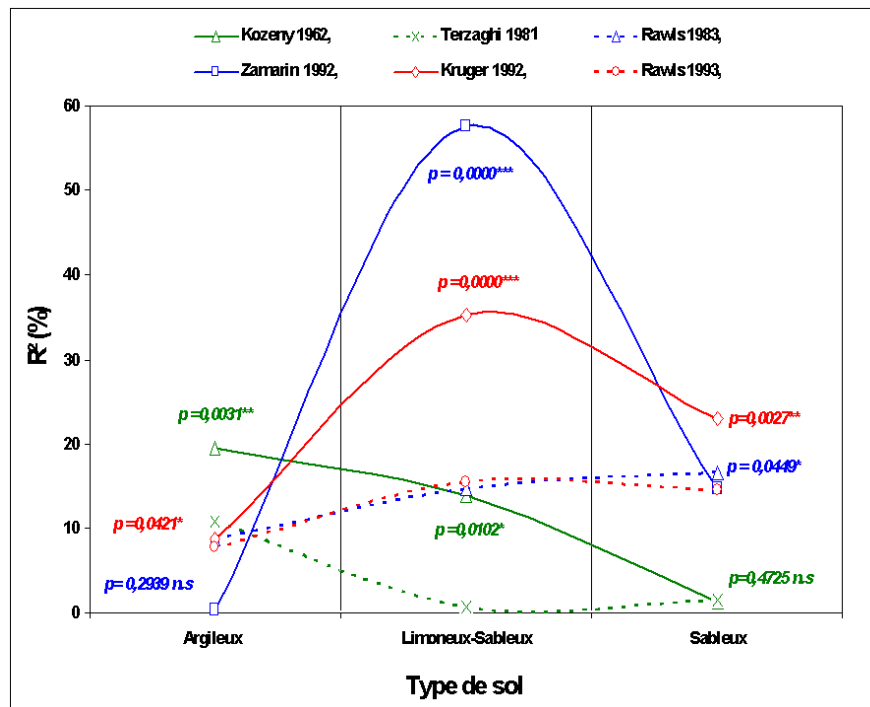


Figure 6.82. Représentation graphique du classement selon R^2 des modèles prédictifs de K en fonction du type de sol.

En comparant l'évolution de la prédictivité des modèles en fonction du type de sol (figure 6.82), nous observons que les mêmes modèles prédictifs (Kozeny₁₉₆₂, Zamarin₁₉₉₂ et Kruger₁₉₉₂) sont les plus performants. Ces trois modèles présentent des caractéristiques communes quant à leur formule mathématique. En effet, les trois modèles tiennent tous compte des prédicteurs : diamètre effectif d_e et porosité n sous la même forme (tableau 6).

Tableau 6. Comparaison des formules des trois meilleurs modèles prédictifs de K .

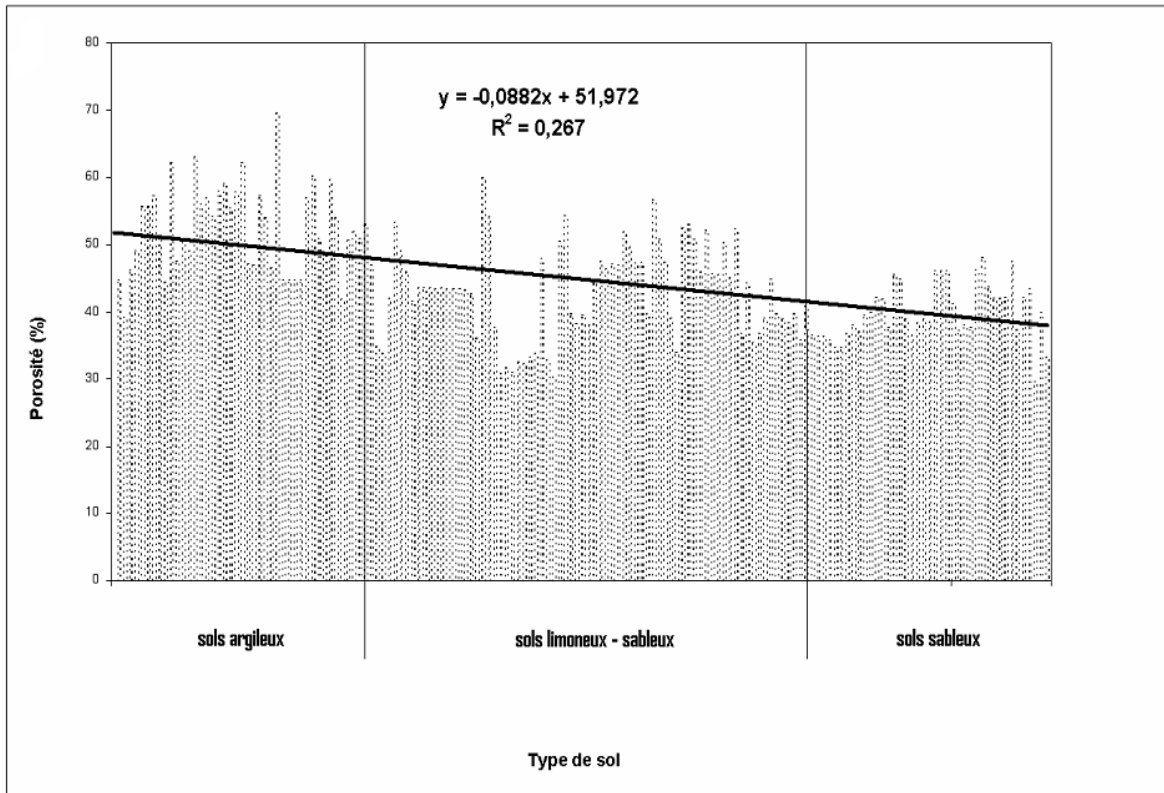
| <i>Modèles prédictif de K</i> | <i>Prédicteurs</i> |
|-------------------------------|---|
| $K_{Kozeny1962} =$ | $[d_e^2/(1-n)] * n * 7,94 * n^2 * \tau$ |
| $K_{Zamarin1992} =$ | $[d_e^2/(1-n)] * n * 8,07 * n^2 * \tau * C_n$ |
| $K_{Kruger1992} =$ | $[d_e^2/(1-n)] * n * 240$ |

n : porosité ; τ : coefficient empirique de température; $C_n=(1,275 - 1,5*n)^2$:coefficient empirique de porosité. $d_e (d_{60}/d_{10})$: Diamètre effectif des grains en (mm).

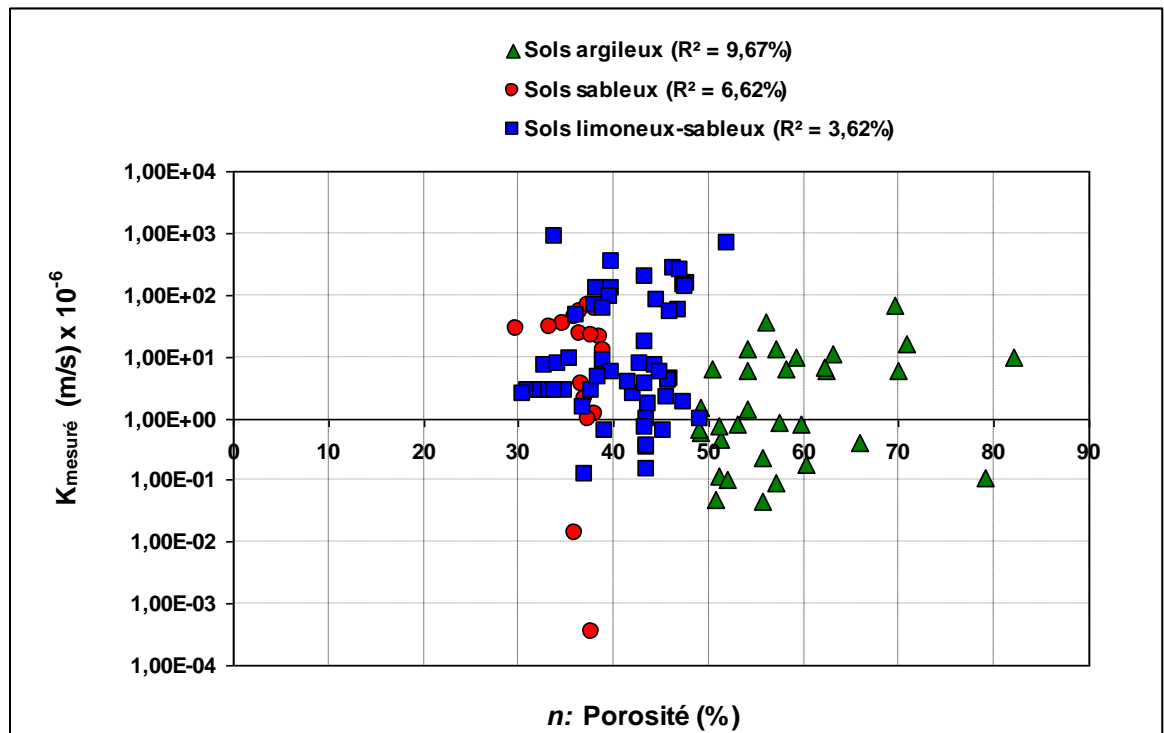
Nous montrons dans la figure 6.83 que contrairement à ce qui est intuitivement admis, les valeurs de la porosité sont plus importantes pour les sols argileux que pour les sols sableux du moins telles qu'elles ressortent des sols de la base de données utilisée. Toutefois, la relation entre la porosité et la perméabilité est faible (figure 6.84). Ce résultat a été trouvé par Detmer (1995). Cependant dans notre cas, cette relation est plus importante pour les sols argileux par rapport aux deux autres prédicteurs ($d_e, d_e^2 \times e$) à en juger par les coefficients de détermination obtenus. En effet, le R^2 est de 9,66% pour n , 1,33% pour d_e et 1,15% pour le produit $d_e^2 \times e$.

D'après la figure 6.85, la relation entre le diamètre effectif (d_e) et la perméabilité est plus prépondérante par rapport aux deux autres concernant les sols sableux. En effet, le R^2 est de 22,56%. L'importance de cette relation a été déjà rapportée par Alaymani et Sen (1993) ainsi que Detmer (1995) concernant les sols limoneux-sableux. Detmer (1995) rajoute que le fait d'élever le d_e au carré, diminue l'importance de cette relation.

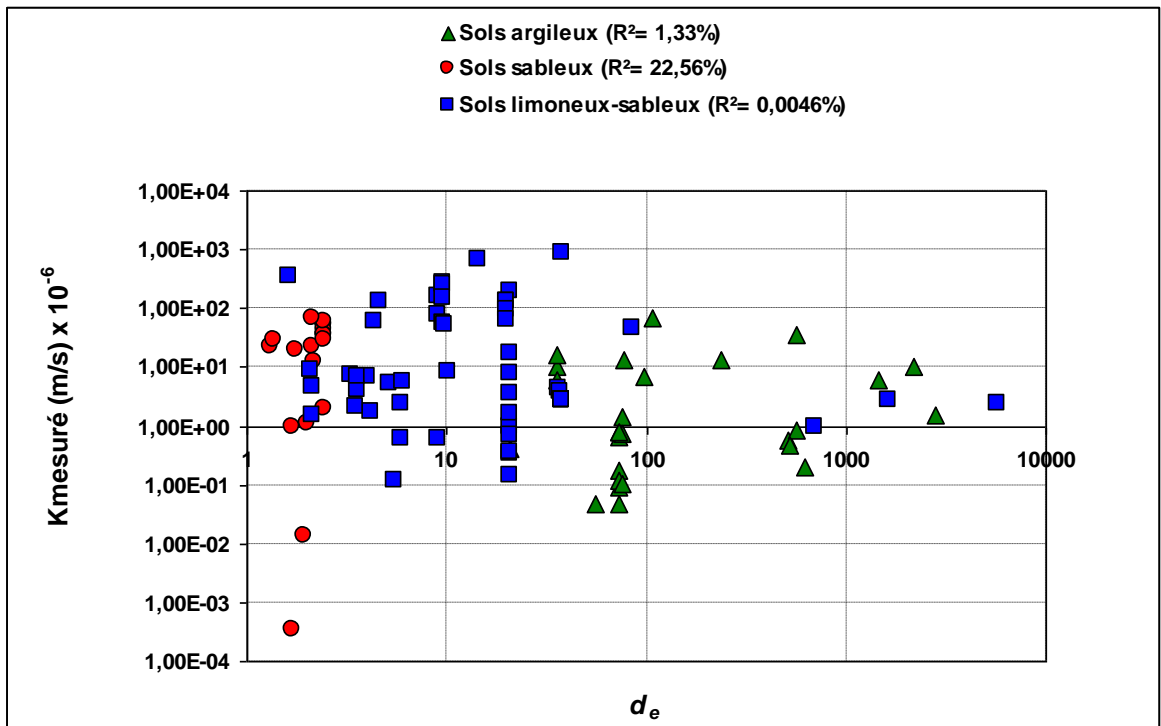
Avec un R^2 égal à 21,12%, le produit $d_e^2 \times e$ a quasiment la même importance que le d_e (figure 6.86).



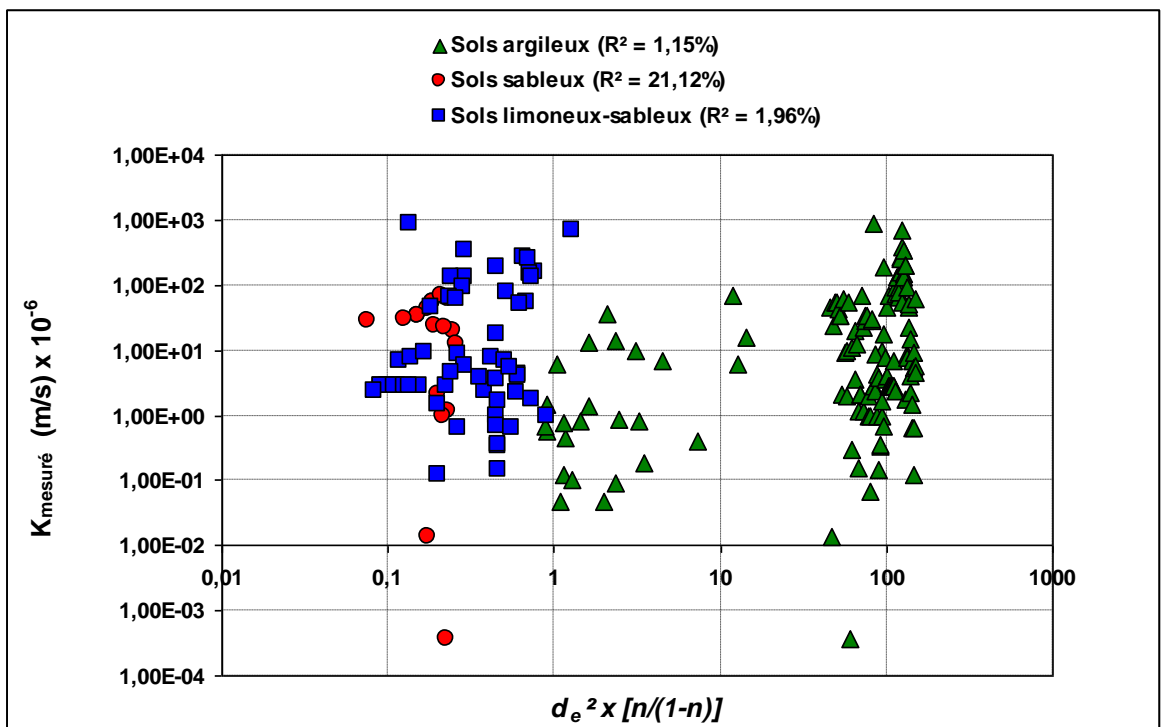
Figures 6.83. Représentation graphique de la relation entre la porosité et le types de sol.



Figures 6.84. Représentation graphique de la relation entre $K_{mesuré}$ et la porosité n .



Figures 6.85. Représentation graphique de la relation entre $K_{mesuré}$ et le diamètre effectif d_e (d_{60}/d_{10}).



Figures 6.86. Représentation graphique de la relation entre $K_{mesuré}$ et le produit $d_e^2 \times [n/(1-n)]$.

Les formules des modèles de Kozeny₁₉₆₂ et Zamarin₁₉₉₂ sont identiques à la différence que le modèle de Zamarin₁₉₉₂ prend en compte C_n (cf. tableau 6). Ceci pourrait expliquer sa prédictivité performante par rapport à Kozeny₁₉₆₂ pour les sols limoneux-sableux. Alors qu'il devient un inconvénient pour la prédictivité de K dans le cas des sols argileux. En effet, le modèle Zamarin₁₉₉₂ est non prédictif pour ce type de sol.

Le modèle de Kruger₁₉₉₂ est le seul à ne pas tenir compte du produit $n^2 * \tau * C_n$. Sa constante est très élevée (240) par rapport aux deux autres (cf. tableau 6). Ceci pourrait expliquer pourquoi ce modèle est le seul qui soit prédictif pour les trois types de sols (cf. figure 6.82).

Detmer (1995) qui a réalisé une étude comparative de cinq modèles prédictifs de K sur des sols limoneux-sableux dans le bassin d'Albuquerque (Nouveau-Mexique, USA), conclut que les modèles de Kruger₁₉₉₂ et de Zamarin₁₉₉₂ sont les meilleurs et que la corrélation entre la perméabilité mesurée et celle prédite par ces deux modèles s'améliore si on exclut les grains de diamètres supérieurs à 2 mm des échantillons analysés. C'est le cas de notre étude qui montre aussi que ces deux modèles sont les meilleurs pour les sols limoneux-sableux et que cette performance s'amenuise en passant aux sols sableux (cf. figure 6.82).

Cette étude fait ressortir que les trois meilleurs modèles (Kozeny₁₉₆₂, Kruger₁₉₉₂ et de Zamarin₁₉₉₂) parmi les neuf étudiés sont les seuls à tenir compte des diamètres de toutes les fractions qui composent la distribution granulométrique des sols (tableau 7). Toutefois, certains auteurs rapportent que le modèle incluant la surface spécifique comme prédicteurs, donne une meilleure prédiction (Chapuis et Aubertin, 2003). Cette surface peut être estimée à partir de la limite de liquidité d'un sol (Mbonimpa *et al.* 2002) {équation 6.1} :

$$\frac{1}{S} = 1,3513 \left[\frac{1}{LL} \right] - 0,0089 \quad \{6.1\}$$

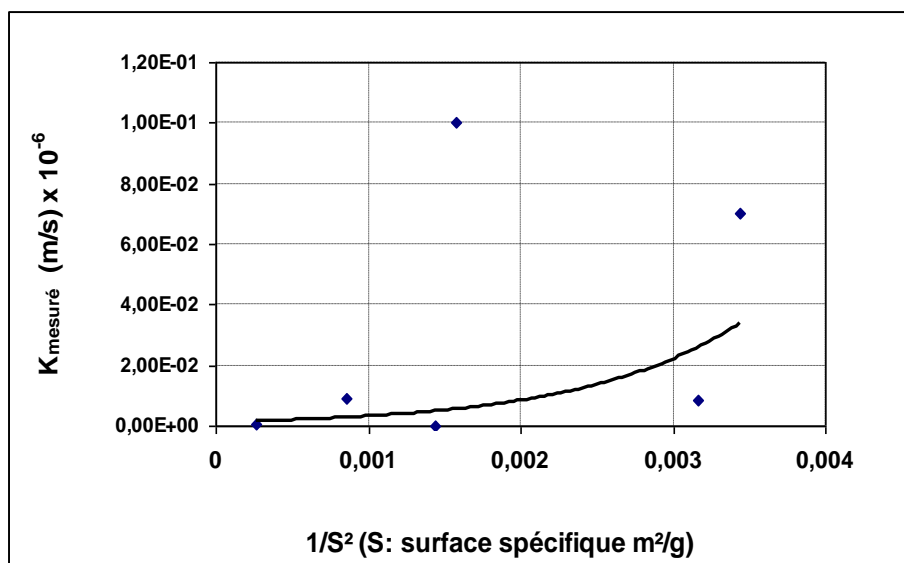
Chapuis et Aubertin (2003) montrent une bonne corrélation entre l'inverse de la surface spécifique et l'inverse de la limite de liquidité des sols argileux.

Tableau 7. Paramètres de sols pris en compte par les modèles étudiés.

| <i>Modèle prédictif</i> | <i>Paramètres de sols</i> |
|---------------------------------|--|
| Kozeny ₁₉₆₂ | Porosité, coefficient de température, diamètre effectif. |
| Slichter ₁₉₆₂ | Porosité, d_{10} . |
| Beyer ₁₉₆₄ | d_{10} , d_{60} . |
| Terzaghi ₁₉₈₁ | Porosité, d_{10} . |
| Rawls ₁₉₈₃ | Porosité, % d'argile, % de sable. |
| Zamarin ₁₉₉₂ | Porosité, coefficient de température, diamètre effectif. |
| Kruger ₁₉₉₂ | Porosité, diamètre effectif. |
| USBR ₁₉₉₂ | d_{20} |
| Rawls ₁₉₉₃ | Porosité, % d'argile, % de sable. |

La figure 6.87 fait ressortir une relation entre l'inverse de la surface spécifique (estimée par l'équation 6.1) et la perméabilité $K_{mesuré}$. En effet, plus la surface spécifique est importante plus il y a de perte de charge due aux frottements ce qui diminue la perméabilité du sol.

Il serait intéressant d'étudier d'autres modèles qui tiennent compte de la surface spécifique des sols tels que celui de Kozeney-Carman.



Figures 6.87. Perméabilité mesurée ($K_{mesuré}$) en fonction de $1/S^2$ (surface spécifique).

Conclusions et recommandations.

Dans ce travail, l'analyse statistique de neuf modèles prédictifs de la perméabilité K des sols saturés a été réalisée selon une approche par modélisation notamment, par l'analyse de régression. Le travail s'est appuyé sur un échantillon de données de sol choisi de la base de données SoilVision 3.0 Cette méthode a permis une comparaison des performances prédictives des modèles étudiés d'une façon fiable et précise grâce entre autres, à l'analyse de la variance (ANOVA) et à l'analyse des résidus.

L'ANOVA des modèles de régression linéaire simple a permis d'apporter une preuve statistique de l'existence ou non d'un lien réel entre les valeurs prédites par les modèles et les valeurs de la perméabilité mesurée. Par la suite, l'analyse des résidus a permis de vérifier si les hypothèses statistiques sont réunies rendant ainsi ces modèles valables. En procédant ainsi, nous avons pu comparer réellement les performances des modèles prédictifs et de sélectionner les meilleurs sur des bases statistiques rigoureuses sans aucun biais.

Selon les résultats obtenus, l'analyse de régression a permis de dégager les trois modèles les plus performants en fonction du type de sol. Conformément à ces résultats, il serait souhaitable de prédire les valeurs de la perméabilité en utilisant le modèle de Kozeny₁₉₆₂ pour les sols argileux, le modèle de Zamarin₁₉₉₂ pour les sols limoneux-sableux et le modèle de Kruger₁₉₉₂ pour les sols sableux. Bien que ces trois modèles surestiment la perméabilité, ils n'en demeurent pas moins que ces surestimations sont négligeables si nous considérons l'intervalle de précision de la mesure de la perméabilité. L'analyse géotechnique de K a permis de montrer que, relativement aux autres modèles analysés, ces trois modèles prennent en compte, en plus de la porosité, les diamètres des fractions de sol composant l'échantillon d'une manière détaillée. Ceci montre l'importance de ces deux prédicteurs pour la simulation de la perméabilité.

L'analyse de la régression linéaire simple des données à partir des données choisies dans SoilVision 3.0 a permis de mettre en évidence des R^2 faibles et ce pour tous les modèles analysés quel que soit le type de sol. Ceci pourrait être expliqué par une variabilité dans les valeurs des données de SoilVision 3.0, mise en évidence par l'analyse statistique, qui est due à la diversité des méthodes utilisées pour la mesure des différents paramètres. En effet, les faibles valeurs de R^2 sont dues probablement à la contribution non négligeable des résidus dans l'estimation de la valeur de K .

La richesse des données de SoilVision 3.0 permet à l'utilisateur de faire une étude préliminaire en exploitant ces données dans la simulation de la perméabilité avant toute autre étude approfondie en géotechnique, ce qui permet une économie et de temps aux projets. Toutefois, son utilisation n'est pas aisée pour la manipulation et la recherche des données. De plus, l'apprentissage de ce logiciel à l'aide du didacticiel nécessite beaucoup de temps afin de se familiariser avec le logiciel.

Afin de remédier aux problèmes rencontrés lors ce travail (variabilités des résultats, difficultés d'exploitation des données de SoilVision), il serait souhaitable de mettre au point une base de donnée Algérienne en prenant le soin d'homogénéiser, le plus possible, les méthodes de mesure et de les introduire dans un logiciel didactique pour en faciliter l'exploitation.

D'autres modèles de prédiction de K méritent d'être analysés tels que ceux de Hazen₁₉₁₁, Kozney-Carman₁₉₈₉, Chapuis₂₀₀₄ (Demter, 1995 ; Chapuis et Aubertin, 2003 ; Odong, 2007 ; Ishaku, 2011). Nous pouvons déjà envisager de mettre au point un modèle s'inspirant des trois meilleurs modèles mis en évidence par notre étude.

Une autre perspective intéressante serait de réaliser une Analyse en Composante Principale (ACP) pour déterminer les paramètres du sol (porosité, surface spécifique...etc) les plus influents sur la perméabilité pour chaque type de sol. Par la suite, déterminer le poids et l'influence de chaque prédicteur retenus après l'ACP sur l'estimation de la perméabilité moyennant une analyse de régression multiple. Ces modèles de régression multiple seront valider par des mesures.

8. Bibliographie.

Ait Saadi, L. (2003) - Méthodologie de contrôle de l'homogénéité et de la perméabilité des barrières argileuses. Thèse de Doctorat - *Institut National des Sciences Appliquées de Lyon*. 302 p.

Alyamani, M.S. and Sen. Z. (1993). Determination of hydraulic conductivity from complete grain-size distribution curves. *Ground Water* 31, no. 4: 551-555.

Boadu, F. K. (2000) - Hydraulic Conductivity of Soils from Grain-Size Distribution: New Models. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. vol 126 no. 8, pp. 739 – 746.

Bourssier, P. (2002) – Base de données. Note de cours. Université Larochele. 33 p. http://perso.univ-lr.fr/pboursie/BD_NotesCours_Niv1.PDF.

Chapuis, R.P., Aubertin M. (2003) – on the use of the Kozeny-Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils. *Can. Geotech. J.*40:616-628.

Cheng, C., Chen, X. (2007) - Evaluation of methods for determination of hydraulic properties in an aquifer-aquitard system hydrologically connected to a river. *Hydrogeol. J.*, 15: 669-678.

Chrisment, C., Pujolle, G., Ravat, F., Tests, O., et Zurfluh G. (2005) - Bases de données. *Techniques de l'ingénieur*, H3870.

Colombani, J., Lamgat, J.P., Thiebaut, J. (1973) – Mesure de la perméabilité des sols en place: un nouvel appareil pour la méthode Muntz une extension de la méthode porchet aux sols hétérogènes. *Hydrological Sciences –Bulltin des Sciences hydrologique XVII*, pp. 197 -235.

Cornillon, P.A., Matzner-Løber, E. (2007) – Régression Théorie et applications. *Collection Statistiques et probabilités appliquées*. Paris, France 302 p.

Debiche, F. (2003) - Elaboration du modèle conceptuel de la base de données géotechniques « Géo-Base ». Thèse de Magistère en génie civil, ENP, Alger.

Dehon, C., Driesbeke, J.J. et Vermandele, C. (2008) - *Eléments de Statistique. – Statistique et mathématique appliquées*. 5^{ème} édition de l'université de Bruxelles. Belgique, 666p.

Detmer, D. M. (1995) - Permeability, porosity, and grain-size distribution of selected Pliocene and Quaternary sediments in the Albuquerque Basin. *New Mexico Geology*, vol. 17, no. 4, pp. 79-87.

Dodge, Y. (1993) - *Statistique : Dictionnaire encyclopédique*. Edition DUNOD, Paris 409 p.

Freeze, R.A., Cherry J.A. (1979) - *Groundwater*. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 604 p.

Gardner, W.R. (1974). The permeability problem. *Soil Science*, vol. 117, N° 5, pp. 243-248.

Goupy, J., Creighton, L. (2006) - Introduction aux plans d'expériences. Ed. Dunod.

Hana, H., Giménez, A. (2008) -Textural averages of saturated soil hydraulic conductivity predicted from water retention data. *Geoderma* Volume 146, issue 1-2, 2008.

Hansbo, S. (1960) - Consolidation of clay with special reference to influence of vertical drains. *Swedish geotechnical institute Proc.*, N° 18, 159 p.

Hubbert, M.K., and Rubey, W.W. (1959) - Role of fluid pressure in mechanical overthrust faulting. *Bulletin of geological society of America*. Vol. 70, pp. 115.

Hwang, S.H. (2002) – re-evaluation of hydraulic conductivity estimation of unsaturated soils with particle size distribution models. *Environ. Eng. Res.* Vol. 7, N° 3 : 159 -167.

Ishaku, J.M., Gadzama, E.W. and Kaigama, U. (2011) - Evaluation of empirical formulae for the determination of hydraulic conductivity based on grain-size analysis. *Journal of Geology and Mining Research* Vol. 3(4) pp. 105-113.

Kovacs G. (1981) – Development in water science. Ed Elsevier.

Kramarz, F., et Perrault, O. (1986) - Bases de données et SGBD. De la conception à la mise en œuvre. Démarche pratique. Edition Masson Paris.

Lion, M. (2004) – Influence de la température sur le comportement poromécanique ou hydraulique d'une roche carbonatée et d'un mortier, études expérimentales. Thèse de Doctorat, Université des sciences et technologie de Lille.

Lutz, J.F., Kemper, W.D. (1959) - Intrinsic permeability of clay as affected by clay-water interaction. *Soil Science*, vol. 88, pp. 83-90.

M'hamdi, F. (2009) - Apport des bases de données dans les études de sols. Thèse de Magistère en génie civil, ENP, Alger.

Mason, R.L.; Gunst, R.F.; Hess, J.L. (2003) - *Statistical Design and Analysis of Experiments with Applications to Engineering and Science*, 2nd ed.; John Wiley & Sons, Inc.: New York, NY, USA.

Mbonimpa, M., Aubertin M., Chapuis R.P., Bussiére B. (2002) - Practical pedotransfer functions for estimating the saturated hydraulic conductivity. *Geotechnical and Geological Engineering* 20: 235–259.

Milan, V., Andjelko S. (1992) – Determination of hydraulic conductivity of porous media from grain-size distribution. *Water Resources Publications*.

Miller, R.J., and Low, P.F. (1963). Threshold gradient for ground water studies. *Geotechnical and Environment Geophysics*, vol. 27, N° 6, pp. 605-609.

- Mitchel, J.K. Soga, K. (2005) –fundamental of soil behavior. Edit John Wiley & Sons. 577 p.
- Mouchiroud, D. (2003). Analyse de variance. Mathématiques : Outils pour la Biologie – Deug SV – UCBL – Chapitre 9 :11p.
- Myers, R.H. & Montgomery D.C. (2009) - Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments. Nex York: John Wiley & Sons, Inc. 704 p.
- Odong J (2007). Evaluation of Empirical Formulae for Determination of Hydraulic Conductivity based on Grain-Size Analysis. *J. Am. Sci.*, 3(3): 54-60.
- Olsen, H.W. (1965) - Deviation from Darcy's law in saturated Clays. *Soil Science Society Proceedings*, vol. 29, pp. 135-140.
- Olsen, H.W. (1972) - Liquid movement through kaolinite under hydraulic, electric, and osmotic gradients. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, vol. 56, N° 10, pp. 2020-2028.
- Olsen, H.W. (1985) - Osmosis : A cause of apparent deviations from Darcy's law. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 22, pp. 238-241.
- Olsen, R.E., Daniel, D.E. (1981) - Measurement of the hydraulic conductivity of finegrained soils, permeability and groundwater contaminant transport. In T.F. Zimmie, and C.O. Riggs Eds., Philadelphia : American Society for Testing and Materials, pp. 18-64.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., Logsdon, S.D. (1993) - Predicting saturated hydraulic conductivity utilizing fractal principles. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 57:1193-1197.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., Soni B. (1983) - Agricultural management effects of soil water processes: Part I - Soil water retention and Green ampt infiltration parameters. *Trans., Amer. Soc. of Agric. Engin.* 26(6): 1752 1753.
- Rigaux, P. (1999). On the Orthographic Dimension of Constraint Databases - In Proc. Intl. Conf. on Database Theory (ICDT'99).
- Scheller, H. (1962) – les eaux souterraines. Ed Masson, Paris.
- Schwartz, FW., Zhang, H. (2003) - Fundamentals of groundwater. John Wiley & Sons, Inc.,583 p.
- Sri Ranjan, R., Karthigesu, T. (1996) - A capillary flow meter for measuring the hydraulic conductivity of clay under gradients. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 33, pp.504-509.
- Taylor, D.W. (1948) - Fundamentals of soil mechanics. N. Y., Wiley. 700 p. : to soil water retention estimation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53, 987–996.

Todd, D. K., Mays L.W. (2005) - Groundwater Hydrology. John Wiley & Sons, New York, 636 p.

Uma, K.O., Egboka B.C.E., Onuoha K.M.(1989) - New Statistical Grain-Size Method for Evaluating the Hydraulic Conductivity of Sandy Aquifers. Journal of Hydrology, Amsterdam, Volume 108, 1989, p 343-366.

SoilVision user's guide (2002) - A knowledge-based database system for soil properties. ED-3B, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, 94 p.

Vukovic, M., Soro, A. (1992) - Determination of Hydraulic Conductivity of Porous Media from Grain-Size Composition. Water Resources Publications, Littleton, Colorado.

Zacharias, S., Wessolek, G. (2007) - Excluding Organic Matter Content from Pedotransfer Predictors of Soil Water Retention. Volume 71: Number 1 • January – February : 43- 50.

Zou, Y. (1996). A non-linear permeability relation depending on the activation energy of pore liquid. Geotechnique, vol. 46, N° 4, pp. 769-774.

Annexes

Tableau 1. Résultats bruts de K tirées de la base de données SoilVision 3.0. ($\times 10^{-6}$)

| N° | Sols | $K_{mesuré}$ | Beyer 1964 | Kruger 1992 | Zamarin 1992 | Slichter 1962 | Terzaghi 1981 | Kozeny 1962 | USBR 1992 | Rawls 1983 | Rawls 1993 |
|-------|----------|--------------|---------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|----------------|--------------|---------------|---------------|
| 10831 | Argileux | 3,01E-02 | 1,81E-01 | 4,13E+00 | 2,56E+00 | 1,23E-05 | 2,28E-04 | 1,58E+00 | 6,02E-08 | 3,97E-01 | 2,71E-01 |
| 10838 | Argileux | 1,97E-01 | | 2,99E+00 | 2,90E+00 | 1,25E-05 | 2,34E-04 | 5,18E+00 | 6,11E-08 | 4,16E-01 | 2,81E-01 |
| 10847 | Argileux | 5,56E-02 | 1,40E-01 | 5,62E-01 | 5,50E-01 | 2,35E-05 | 4,32E-04 | 7,69E-01 | 8,81E-06 | 2,09E-01 | 1,81E-01 |
| 10851 | Argileux | 5,79E-02 | 4,34E-01 | 1,73E+00 | 1,68E+00 | 1,36E-05 | 2,59E-04 | 3,28E+00 | 5,56E-08 | 4,90E-01 | 3,12E-01 |
| 10910 | Argileux | 1,09E-01 | 8,38E-02 | 3,93E+01 | | 9,12E-05 | 5,70E-03 | 4,13E+01 | 1,02E-07 | 9,51E+00 | 4,22E+00 |
| 10980 | Argileux | 5,79E-01 | | 3,40E+00 | 3,05E+00 | 1,69E-05 | 3,32E-04 | 6,99E+00 | 6,03E-08 | 6,89E-01 | 3,94E-01 |
| 10981 | Argileux | 2,31E-01 | 3,13E-01 | 2,75E+00 | 1,91E+00 | 2,37E-05 | 5,21E-04 | 6,78E+00 | 4,60E-08 | 1,38E+00 | 6,55E-01 |
| 10982 | Argileux | 4,63E-02 | 5,88E-01 | 3,01E+00 | 2,28E+00 | 3,13E-05 | 6,89E-04 | 7,99E+00 | 1,24E-07 | 1,38E+00 | 6,52E-01 |
| 11039 | Argileux | 2,70E-01 | 4,25E-01 | | | | | | 5,08E-04 | | |
| 11087 | Argileux | 8,70E-01 | | 4,58E+01 | 1,32E+01 | 2,46E-05 | 5,64E-04 | 5,26E+00 | 3,80E-08 | 1,64E+00 | 7,49E-01 |
| 11088 | Argileux | 4,60E-01 | | 3,67E+01 | 1,29E+01 | 1,65E-05 | 3,34E-04 | 3,36E+00 | 3,44E-08 | 8,68E-01 | 4,64E-01 |
| 11089 | Argileux | 6,60E-02 | | 2,92E+01 | 1,12E+01 | 1,06E-05 | 1,99E-04 | 2,00E+00 | 3,78E-08 | 3,97E-01 | 2,71E-01 |
| 11099 | Argileux | 6,01E+00 | 2,30E-01 | 1,11E+02 | 2,32E+01 | 2,87E-05 | 7,55E-04 | 1,49E+01 | 2,64E-08 | 2,60E+00 | 1,09E+00 |
| 11100 | Argileux | 6,49E-01 | | 2,55E+01 | 9,59E+00 | 1,54E-05 | 2,97E-04 | 2,00E+00 | 6,59E-08 | 5,75E-01 | 3,48E-01 |
| 11105 | Argileux | 6,20E+00 | | 4,34E+01 | 1,55E+01 | 1,77E-05 | 3,54E-04 | 3,78E+00 | 5,45E-08 | 7,87E-01 | 4,32E-01 |
| 11106 | Argileux | 1,51E+00 | | 8,10E+01 | 2,92E+01 | 1,63E-05 | 3,19E-04 | 6,51E+00 | 5,51E-08 | 6,78E-01 | 3,89E-01 |
| 11141 | Argileux | 1,13E+01 | | 3,60E+00 | 1,72E+00 | 1,03E-04 | 2,77E-03 | 9,65E+00 | 6,25E-06 | 2,80E+00 | 1,17E+00 |
| 11142 | Argileux | 3,67E+01 | | 9,93E+00 | 6,73E+00 | 4,86E-05 | 1,08E-03 | 1,80E+01 | 1,41E-06 | 1,43E+00 | 6,69E-01 |
| 11143 | Argileux | 1,36E+01 | | 2,25E+00 | 1,40E+00 | 6,84E-05 | 1,56E-03 | 3,65E+00 | 1,93E-06 | 1,59E+00 | 7,29E-01 |
| 11159 | Argileux | 4,05E-01 | 1,30E-01 | 9,57E+00 | 2,19E+00 | 1,61E-04 | 4,83E-03 | 7,09E+00 | 1,24E-05 | 3,62E+00 | 1,47E+00 |
| 11306 | Argileux | 5,88E+00 | 7,59E-02 | 4,85E+00 | 3,65E+00 | 2,11E-05 | 4,49E-04 | 8,88E+00 | 4,34E-08 | 1,17E+00 | 5,79E-01 |
| 11307 | Argileux | 6,16E+00 | 4,10E-01 | 4,16E+00 | 2,60E+00 | 8,45E-05 | 1,97E-03 | 8,17E+00 | 2,34E-06 | 1,76E+00 | 7,92E-01 |
| 10975 | Argileux | 1,01E+01 | | 1,53E+01 | 1,01E+01 | 2,45E-05 | 5,88E-04 | 4,68E+01 | 2,69E-08 | 1,94E+00 | 8,55E-01 |
| 11409 | Argileux | 4,45E+02 | | 4,53E+00 | 3,57E+00 | 2,38E-05 | 5,21E-04 | 1,21E+01 | 4,93E-08 | 1,36E+00 | 6,47E-01 |
| 11410 | Argileux | 1,93E+02 | 3,29E-01 | 5,96E+00 | 4,25E+00 | 2,56E-05 | 5,93E-04 | 1,73E+01 | 4,00E-08 | 1,71E+00 | 7,71E-01 |
| 10841 | Argileux | 6,83E+00 | | 7,22E+00 | 3,98E+00 | 1,66E-04 | 4,36E-03 | 2,47E+01 | 2,70E-04 | 2,60E+00 | 1,09E+00 |
| 10947 | Argileux | 2,70E+02 | | 3,993E+01 | 2,218E+01 | 2,106E-05 | 3,971E-04 | 1,251E+01 | 3,628E-06 | 4,446E-01 | 2,931E-01 |
| 10948 | Argileux | 1,28E+02 | | 4,210E+01 | 2,322E+01 | 2,246E-05 | 4,269E-04 | 1,372E+01 | 3,628E-06 | 4,946E-01 | 3,146E-01 |
| 10949 | Argileux | 3,91E+01 | | 4,44E+01 | 2,43E+01 | 2,39E-05 | 4,59E-04 | 1,50E+01 | 3,63E-06 | 5,50E-01 | 3,38E-01 |
| 10950 | Argileux | 1,55E+01 | | 4,36E+01 | 2,39E+01 | 2,34E-05 | 4,48E-04 | 1,46E+01 | 3,63E-06 | 5,31E-01 | 3,30E-01 |
| 11077 | Argileux | 2,70E+01 | | 3,36E+01 | 9,85E+00 | 5,42E-05 | 1,24E-03 | 3,82E+00 | 1,92E-05 | 1,64E+00 | 7,47E-01 |
| 11078 | Argileux | 1,30E+01 | | 2,63E+01 | 8,77E+00 | 5,42E-05 | 1,15E-03 | 2,66E+00 | 1,03E-04 | 1,17E+00 | 5,78E-01 |
| 11107 | Argileux | 4,11E+00 | | 5,65E+01 | 2,12E+01 | 1,49E-05 | 2,85E-04 | 4,14E+00 | 7,62E-08 | 5,16E-01 | 3,23E-01 |
| 11125 | Argileux | 6,90E+01 | | 9,32E+01 | 6,28E+00 | 1,15E-04 | 4,03E-03 | 1,56E+01 | 6,52E-05 | 4,90E+00 | 1,97E+00 |
| 11372 | Argileux | 5,48E+00 | | 1,40E+00 | 1,55E+00 | 2,80E-05 | 5,25E-04 | 3,58E+00 | 3,68E-05 | 4,17E-01 | 2,83E-01 |
| 11373 | Argileux | 2,90E+00 | | 1,40E+00 | 1,55E+00 | 2,80E-05 | 5,25E-04 | 3,58E+00 | 3,68E-05 | 4,17E-01 | 2,83E-01 |
| 11374 | Argileux | 1,62E+01 | | 1,40E+00 | 1,55E+00 | 2,80E-05 | 5,25E-04 | 3,58E+00 | 3,68E-05 | 4,17E-01 | 2,83E-01 |
| 11375 | Argileux | 1,82E+00 | | 1,40E+00 | 1,55E+00 | 2,80E-05 | 5,25E-04 | 3,58E+00 | 3,68E-05 | 4,17E-01 | 2,83E-01 |
| 11400 | Argileux | 8,91E-02 | | 3,89E+01 | 1,19E+01 | 8,53E-05 | 1,94E-03 | 4,01E+00 | 1,92E-04 | 1,59E+00 | 7,28E-01 |
| 11413 | Argileux | 1,00E+01 | | 9,57E+01 | | 7,84E-04 | 6,36E-02 | 1,14E+02 | 4,39E-04 | 1,15E+01 | 5,49E+00 |
| 11417 | Argileux | 6,11E+00 | | 2,94E+01 | 2,64E+00 | 4,66E-04 | 1,67E-02 | 2,55E+01 | 4,39E-04 | 5,06E+00 | 2,04E+00 |
| 11418 | Argileux | 1,61E+01 | | 3,14E+01 | 1,89E+00 | 4,84E-04 | 1,80E-02 | 2,79E+01 | 4,39E-04 | 5,39E+00 | 2,18E+00 |

| | | | | | | | | | | | |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 11458 | Argileux | 1,81E-01 | | 4,79E+01 | 1,24E+01 | 1,02E-04 | 2,52E-03 | 5,52E+00 | 1,92E-04 | 2,17E+00 | 9,35E-01 |
| 11459 | Argileux | 1,19E-01 | | 2,80E+01 | 1,03E+01 | 5,93E-05 | 1,19E-03 | 2,32E+00 | 1,91E-04 | 8,47E-01 | 4,56E-01 |
| 11460 | Argileux | 6,67E-01 | | 2,48E+01 | 9,50E+00 | 5,20E-05 | 1,02E-03 | 1,90E+00 | 1,91E-04 | 6,77E-01 | 3,90E-01 |
| 11461 | Argileux | 8,06E-01 | | 4,64E+01 | 1,23E+01 | 9,94E-05 | 2,42E-03 | 5,25E+00 | 1,92E-04 | 2,07E+00 | 8,99E-01 |
| 11462 | Argileux | 1,39E+00 | | 3,36E+01 | 1,15E+01 | 7,15E-05 | 1,52E-03 | 3,13E+00 | 1,91E-04 | 1,17E+00 | 5,76E-01 |
| 11463 | Argileux | 4,44E-01 | | 1,64E+01 | 6,61E+00 | 3,13E-05 | 5,78E-04 | 9,26E-01 | 1,91E-04 | 2,94E-01 | 2,25E-01 |
| 11464 | Argileux | 4,72E-02 | | 2,63E+01 | 9,75E+00 | 5,81E-05 | 1,17E-03 | 2,15E+00 | 1,92E-04 | 8,19E-01 | 4,45E-01 |
| 11465 | Argileux | 1,03E-01 | | 2,97E+01 | 1,07E+01 | 6,32E-05 | 1,29E-03 | 2,57E+00 | 1,91E-04 | 9,44E-01 | 4,93E-01 |
| 11466 | Argileux | 7,50E-01 | | 2,80E+01 | 1,03E+01 | 5,93E-05 | 1,19E-03 | 2,32E+00 | 1,91E-04 | 8,47E-01 | 4,56E-01 |
| 11467 | Argileux | 8,06E-01 | | 3,03E+01 | 1,06E+01 | 6,72E-05 | 1,40E-03 | 2,70E+00 | 1,92E-04 | 1,05E+00 | 5,33E-01 |
| 11468 | Argileux | 2,22E+00 | | 2,11E+01 | 8,28E+00 | 4,53E-05 | 8,66E-04 | 1,48E+00 | 1,92E-04 | 5,39E-01 | 3,34E-01 |
| 10819 | Sableux | 4,50E+01 | 3,43E+02 | 1,31E+02 | 1,47E+02 | 2,11E+03 | 3,87E+04 | 2,70E+02 | 3,23E+02 | 2,19E-01 | 1,86E-01 |
| 10820 | Sableux | 1,39E-02 | 4,16E+02 | 1,19E+02 | 1,30E+02 | 1,48E+03 | 2,74E+04 | 2,13E+02 | 3,25E+02 | 1,32E-01 | 1,37E-01 |
| 10827 | Sableux | 1,40E+01 | 1,33E+01 | 3,67E+02 | 1,30E+02 | 1,27E+02 | 2,34E+03 | 1,42E+01 | 4,72E+01 | 2,59E-01 | 2,06E-01 |
| 10857 | Sableux | 2,31E+01 | 1,29E+02 | 5,00E+01 | 4,95E+01 | 3,35E+02 | 6,18E+03 | 6,58E+01 | 5,07E+01 | 1,44E-01 | 1,44E-01 |
| 10924 | Sableux | 5,37E+01 | 1,22E+02 | 4,82E+01 | 4,96E+01 | 1,26E+02 | 2,33E+03 | 7,30E+01 | 2,96E+01 | 1,42E-01 | 1,43E-01 |
| 10925 | Sableux | 5,37E+01 | 1,22E+02 | 4,82E+01 | 4,96E+01 | 1,26E+02 | 2,33E+03 | 7,30E+01 | 2,96E+01 | 1,42E-01 | 1,43E-01 |
| 10926 | Sableux | 4,27E+01 | 1,22E+02 | 4,68E+01 | 4,78E+01 | 1,21E+02 | 2,23E+03 | 6,89E+01 | 2,96E+01 | 1,33E-01 | 1,38E-01 |
| 10927 | Sableux | 3,48E+01 | 1,22E+02 | 4,36E+01 | 4,36E+01 | 1,08E+02 | 2,01E+03 | 6,00E+02 | 2,96E+01 | 1,13E-01 | 1,25E-01 |
| 10928 | Sableux | 3,48E+01 | 1,22E+02 | 4,36E+01 | 4,36E+01 | 1,08E+02 | 2,01E+03 | 6,00E+01 | 2,96E+01 | 1,13E-01 | 1,25E-01 |
| 10929 | Sableux | 2,04E+00 | 1,22E+02 | 4,96E+01 | 5,14E+01 | 1,32E+02 | 2,43E+03 | 7,73E+01 | 2,96E+01 | 1,52E-01 | 1,49E-01 |
| 10930 | Sableux | 6,13E+01 | 1,22E+02 | 5,30E+01 | 5,55E+01 | 1,46E+02 | 2,67E+03 | 8,74E+01 | 2,96E+01 | 1,76E-01 | 1,63E-01 |
| 10974 | Sableux | 1,46E+01 | 5,76E+02 | 2,69E+02 | 2,55E+02 | 8,88E+02 | 1,64E+04 | 3,19E+02 | 9,32E+01 | 1,56E-01 | 1,51E-01 |
| 10977 | Sableux | 9,26E+00 | 2,15E+02 | 1,18E+02 | 1,15E+02 | 6,55E+02 | 1,20E+04 | 1,59E+02 | 5,29E+01 | 2,17E-01 | 1,85E-01 |
| 11062 | Sableux | 3,20E+03 | 6,52E+01 | 7,03E+02 | 1,77E+02 | 9,67E+01 | 2,02E+03 | 9,08E+00 | 2,04E+01 | 3,41E-02 | 6,19E-02 |
| 11067 | Sableux | 6,79E+02 | 1,64E+01 | 1,58E+02 | 4,85E+01 | 7,21E+01 | 1,42E+03 | 3,63E+00 | 1,41E+01 | 5,33E-02 | 8,04E-02 |
| 11163 | Sableux | | 4,47E+01 | 4,56E+01 | 3,91E+01 | 1,98E+02 | 3,63E+03 | 3,40E+01 | 2,84E+01 | 2,07E-01 | 1,80E-01 |
| 11164 | Sableux | 9,68E+00 | 1,09E+02 | 9,44E+01 | 8,43E+01 | 6,60E+02 | 1,21E+04 | 8,34E+01 | 6,84E+01 | 2,28E-01 | 1,91E-01 |
| 11167 | Sableux | | 1,50E+02 | 8,35E+01 | 8,70E+01 | 2,13E+02 | 3,93E+03 | 1,42E+02 | 2,63E+01 | 2,63E-01 | 2,09E-01 |
| 11169 | Sableux | | 5,52E+01 | 5,54E+01 | 4,88E+01 | 4,12E+02 | 7,58E+03 | 4,72E+01 | 4,17E+01 | 2,51E-01 | 2,02E-01 |
| 11175 | Sableux | 2,00E+00 | 5,25E+01 | 6,35E+01 | 5,57E+01 | 2,21E+02 | 4,08E+03 | 5,73E+01 | 3,15E+01 | 3,03E-01 | 2,28E-01 |
| 11187 | Sableux | 5,42E+01 | 3,48E+02 | 1,94E+02 | 2,00E+02 | 1,92E+03 | 3,55E+04 | 3,13E+02 | 1,41E+02 | 2,89E-01 | 2,21E-01 |
| 11188 | Sableux | | 6,34E+01 | 6,11E+01 | 5,52E+01 | 3,71E+02 | 6,85E+03 | 5,94E+01 | 5,24E+01 | 2,76E-01 | 2,15E-01 |
| 11216 | Sableux | 3,59E-04 | 3,80E+02 | 1,21E+02 | 1,33E+02 | 6,03E+02 | 1,11E+04 | 2,22E+02 | 4,61E+01 | 1,70E-01 | 1,59E-01 |
| 11257 | Sableux | 3,00E-01 | 1,37E+02 | 1,29E+02 | 1,23E+02 | 8,70E+02 | 1,64E+04 | 1,97E+02 | 5,07E+01 | 4,54E-01 | 2,96E-01 |
| 11272 | Sableux | 1,11E+01 | 7,37E+01 | 4,94E+01 | 5,03E+01 | 4,62E+02 | 8,68E+03 | 9,44E+01 | 3,13E+01 | 4,18E-01 | 2,80E-01 |
| 11273 | Sableux | 6,08E+00 | 1,73E+02 | 6,07E+01 | 6,61E+01 | 3,58E+02 | 6,57E+03 | 1,13E+02 | 2,75E+01 | 1,97E-01 | 1,74E-01 |
| 11290 | Sableux | 3,58E+00 | 1,48E+02 | 4,67E+01 | 4,97E+01 | 1,44E+02 | 2,66E+03 | 7,84E+01 | 1,43E+01 | 1,46E-01 | 1,46E-01 |
| 11313 | Sableux | 2,03E+01 | 1,18E+02 | 4,57E+01 | 4,86E+01 | 2,28E+02 | 4,18E+03 | 7,70E+01 | 1,83E+01 | 1,87E-01 | 1,69E-01 |
| 11315 | Sableux | 1,27E+01 | 1,21E+02 | 5,39E+01 | 5,65E+01 | 1,58E+02 | 2,91E+03 | 8,80E+01 | 1,66E+01 | 1,97E-01 | 1,75E-01 |
| 11354 | Sableux | 5,00E+01 | 6,55E+02 | 2,03E+02 | 2,28E+02 | 9,94E+02 | 1,87E-01 | 4,16E+02 | 8,52E+01 | 1,87E-01 | 1,69E-01 |
| 11368 | Sableux | 1,54E-01 | 3,80E+02 | 1,97E+02 | 2,18E+02 | 1,16E+03 | 2,20E+04 | 5,36E+02 | 4,61E+01 | 4,78E-01 | 3,06E-01 |
| 11369 | Sableux | 1,17E+00 | 3,80E+02 | 1,97E+02 | 2,18E+02 | 1,16E+03 | 2,20E+04 | 5,36E+02 | 4,61E+01 | 4,78E-01 | 3,06E-01 |
| 11370 | Sableux | 2,10E+00 | 3,80E+02 | 1,97E+02 | 2,18E+02 | 1,16E+03 | 2,20E+04 | 5,36E+02 | 4,61E+01 | 4,78E-01 | 3,06E-01 |
| 11371 | Sableux | 2,07E+00 | 3,80E+02 | 1,49E+02 | 1,67E+02 | 8,11E+02 | 1,49E+04 | 3,27E+02 | 4,61E+01 | 2,68E-01 | 2,11E-01 |
| 11399 | Sableux | 6,94E+01 | 2,19E+01 | 2,03E+01 | 1,70E+01 | 1,01E+02 | 1,86E+03 | 1,60E+01 | 7,70E+01 | 1,60E-01 | 1,54E-01 |
| 11401 | Sableux | 1,13E+00 | 9,81E+01 | 5,15E+01 | 5,00E+01 | 4,38E+02 | 8,05E+03 | 6,60E+01 | 8,09E+01 | 1,76E-01 | 1,63E-01 |
| 11402 | Sableux | 2,20E+01 | 1,13E+02 | 5,83E+01 | 5,63E+01 | 4,73E+02 | 8,71E+03 | 7,29E+01 | 7,25E+01 | 1,69E-01 | 1,59E-01 |
| 11403 | Sableux | 7,24E+01 | 8,17E+01 | 7,92E+01 | 7,67E+01 | 2,79E+02 | 5,30E+03 | 1,48E+02 | 5,57E+01 | 4,94E-01 | 3,12E-01 |

| | | | | | | | | | | | |
|-------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 11404 | Sableux | 1,32E+02 | 1,06E+02 | 7,78E+01 | 7,70E+01 | 4,51E+02 | 8,37E+03 | 1,27E+02 | 8,12E+01 | 3,32E-01 | 2,41E-01 |
| 11419 | Sableux | 1,81E+01 | 1,54E+03 | 9,81E+02 | 1,03E+03 | 4,66E+03 | 9,02E+04 | 2,75E+03 | 3,16E+02 | 6,08E-01 | 3,59E-01 |
| 11437 | Sableux | 2,78E+01 | 9,09E+01 | 6,72E+01 | 6,81E+01 | 2,66E+02 | 4,95E+03 | 1,08E+02 | 1,73E+01 | 3,66E-01 | 2,57E-01 |
| 11438 | Sableux | 7,78E+01 | 9,43E+01 | 4,92E+01 | 5,30E+01 | 2,24E+02 | 4,14E+03 | 9,22E+01 | 1,37E+01 | 3,00E-01 | 2,27E-01 |
| 11439 | Sableux | 3,33E+01 | 1,31E+02 | 6,98E+01 | 7,52E+01 | 2,48E+02 | 4,58E+03 | 1,30E+02 | 1,58E+01 | 3,00E-01 | 2,27E-01 |
| 11441 | Sableux | 3,33E+01 | 7,54E+01 | 4,68E+01 | 4,81E+01 | 2,64E+02 | 4,88E+03 | 7,27E+01 | 1,53E+01 | 3,00E-01 | 2,27E-01 |
| 11443 | Sableux | 3,89E-01 | 7,55E+01 | | | | | | 2,32E+01 | | |
| 11444 | Sableux | 1,94E+00 | 1,45E+02 | | | | | | 2,27E+01 | | |
| 11445 | Sableux | 4,63E+00 | 1,54E+02 | | | | | | 1,81E+01 | | |
| 11446 | Sableux | 3,89E+00 | 1,31E+02 | | | | | | 2,08E+01 | | |
| 11447 | Sableux | 3,89E+00 | 7,74E+01 | | | | | | 1,45E+01 | | |
| 11448 | Sableux | 9,17E+00 | 7,11E+01 | | | | | | 1,26E+01 | | |
| 11449 | Sableux | 2,31E+00 | 6,72E+01 | | | | | | 2,19E+01 | | |
| 11454 | Sableux | 1,94E+00 | 2,44E+02 | 1,35E+02 | 1,50E+02 | 3,50E+02 | 6,74E+03 | 4,29E+02 | 1,70E+01 | 5,71E-01 | 3,45E-01 |
| 11455 | Sableux | 9,72E-01 | 2,46E+02 | 7,10E+01 | 7,90E+01 | 2,88E+02 | 5,31E+03 | 1,40E+02 | 2,45E+01 | 1,61E-01 | 1,55E-01 |
| 11456 | Sableux | 1,00E+00 | 2,17E+02 | 8,57E+01 | 9,71E+01 | 3,17E+02 | 5,86E+03 | 2,13E+02 | 1,88E+01 | 3,03E-01 | 2,28E-01 |
| 11457 | Sableux | 6,67E-02 | 2,23E+02 | 9,09E+01 | 1,04E+02 | 4,32E+02 | 8,03E+03 | 2,41E+02 | 2,10E+01 | 3,48E-01 | 2,49E-01 |
| 11474 | Sableux | 2,91E+01 | 6,39E+02 | 1,78E+02 | 1,46E+02 | 1,82E+03 | 3,57E+04 | 1,40E+02 | 5,32E+02 | 5,56E-02 | 8,23E-02 |
| 11475 | Sableux | 2,31E+02 | 6,48E+02 | 2,84E+02 | 2,76E+02 | 3,02E+03 | 5,56E+04 | 3,59E+02 | 3,52E+02 | 1,60E-01 | 1,54E-01 |
| 11476 | Sableux | 1,16E+02 | 2,39E+02 | 1,41E+02 | 1,44E+02 | 1,25E+03 | 2,32E+04 | 2,48E+02 | 8,77E+01 | 3,32E-01 | 2,41E-01 |
| 11477 | Sableux | 8,01E+01 | 3,86E+02 | 1,86E+02 | 1,88E+02 | 1,12E+03 | 2,07E+04 | 2,84E+02 | 1,02E+02 | 2,25E-01 | 1,89E-01 |
| 11486 | Sableux | 2,94E+01 | 1,22E+02 | 4,01E+01 | 3,91E+01 | 9,43E+01 | 1,78E+03 | 5,08E+01 | 2,96E+01 | 9,30E-02 | 1,11E-01 |
| 10846 | Limon – sableux | 2,77E+00 | | 4,08E+00 | 3,74E+00 | 7,73E-06 | 1,44E-04 | 4,31E+00 | 5,89E-07 | 1,16E-01 | 1,26E-01 |
| 10854 | Limon – sableux | 8,91E+02 | | 4,32E+00 | 3,90E+00 | 2,87E-05 | 5,38E-04 | 4,31E+00 | 7,57E-03 | 1,01E-01 | 1,17E-01 |
| 10976 | Limon – sableux | 2,43E+00 | | 3,91E+00 | 3,84E+00 | 1,06E-05 | 1,95E-04 | 6,08E+00 | 7,54E-08 | 2,95E-01 | 2,24E-01 |
| 11090 | Limon – sableux | 8,60E+00 | | 1,08E+02 | 3,59E+01 | 3,35E-05 | 7,03E-04 | 1,01E+01 | 1,92E-06 | 1,08E+00 | 5,41E-01 |
| 11091 | Limon – sableux | 9,80E-01 | | 1,08E+02 | 3,89E+01 | 2,79E-05 | 5,48E-04 | 8,37E+00 | 1,02E-05 | 6,80E-01 | 3,89E-01 |
| 11319 | Limon – sableux | 4,36E+00 | | 1,59E+01 | 1,52E+01 | 4,13E-05 | 7,83E-04 | 2,70E+01 | 6,82E-03 | 4,73E-01 | 3,05E-01 |
| 11322 | sableux | 3,74E+00 | | 1,22E+01 | 1,17E+01 | 2,96E-05 | 5,45E-04 | 1,68E+01 | 6,63E-03 | 2,78E-01 | 2,16E-01 |
| 11342 | Limon – sableux | 1,49E-01 | | 3,41E+01 | 1,57E+01 | 3,61E-05 | 6,72E-04 | 4,58E+00 | 1,78E-02 | 3,55E-01 | 2,53E-01 |
| 11343 | Limon – sableux | 3,29E-01 | | 3,41E+01 | 1,57E+01 | 3,61E-05 | 6,72E-04 | 4,58E+00 | 1,78E-02 | 3,55E-01 | 2,53E-01 |
| 11344 | Limon – sableux | 3,59E-01 | | 3,41E+01 | 1,57E+01 | 3,61E-05 | 6,72E-04 | 4,58E+00 | 1,78E-02 | 3,55E-01 | 2,53E-01 |
| 11345 | Limon – sableux | 9,82E-01 | | 3,40E+01 | 1,56E+01 | 3,59E-05 | 6,67E-04 | 4,54E+00 | 1,78E-02 | 3,52E-01 | 2,51E-01 |
| 11346 | Limon – sableux | 1,66E+00 | | 3,42E+01 | 1,57E+01 | 3,62E-05 | 6,74E-04 | 4,60E+00 | 1,78E-02 | 3,57E-01 | 2,53E-01 |
| 11347 | Limon – sableux | 6,92E-01 | | 3,38E+01 | 1,56E+01 | 3,57E-05 | 6,63E-04 | 4,51E+00 | 1,78E-02 | 3,49E-01 | 2,50E-01 |
| 11348 | Limon – sableux | 1,72E+01 | | 3,38E+01 | 1,56E+01 | 3,57E-05 | 6,63E-04 | 4,51E+00 | 1,78E-02 | 3,49E-01 | 2,50E-01 |
| 11349 | Limon – sableux | 1,92E+02 | | 3,37E+01 | 1,55E+01 | 3,56E-05 | 6,61E-04 | 4,49E+00 | 1,78E-02 | 3,47E-01 | 2,49E-01 |
| 11350 | Limon – sableux | 3,63E+00 | | 3,36E+01 | 1,55E+01 | 3,54E-05 | 6,57E-04 | 4,45E+00 | 1,78E-02 | 3,44E-01 | 2,47E-01 |
| 11351 | Limon – | 7,64E+00 | | 3,26E+01 | 1,50E+01 | 3,41E-05 | 6,31E-04 | 4,23E+00 | 1,78E-02 | 3,24E-01 | 2,38E-01 |

| | | | | | | | | | | | |
|-------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | sableux | | | | | | | | | | |
| 11398 | Limon – sableux | 4,63E+01 | | 4,52E+00 | 3,73E+00 | 1,54E-05 | 2,85E-04 | 3,39E+00 | 7,40E-03 | 1,36E-01 | 1,39E-01 |
| 11415 | Limon – sableux | 4,10E+00 | | 1,53E+02 | 5,87E+01 | 3,95E-05 | 9,68E-04 | 9,61E+01 | 1,90E-07 | 2,10E+00 | 9,08E-01 |
| 11416 | Limon – sableux | 6,94E+01 | | 1,07E+02 | 5,34E+01 | 4,13E-05 | 8,80E-04 | 5,49E+01 | 1,44E-04 | 1,18E+00 | 5,78E-01 |
| 11451 | Limon – sableux | 4,72E+00 | | | | | | | 4,50E-03 | | |
| 11453 | Limon – sableux | 6,67E+01 | | | | | | | 6,45E-08 | | |
| 10733 | Limon – | 2,74E+00 | 1,85E+00 | 3,83E+01 | 1,45E+01 | 2,02E+00 | 3,69E+01 | 1,77E+00 | 1,37E+00 | 1,71E-01 | 1,60E-01 |
| 10734 | sableux | 2,74E+00 | 1,85E+00 | 2,55E+01 | 8,51E+00 | 1,04E+00 | 2,01E+01 | 7,92E-01 | 1,37E+00 | 6,67E-02 | 9,17E-02 |
| 10735 | sableux | 2,74E+00 | 1,85E+00 | 2,66E+01 | 9,05E+00 | 1,12E+00 | 2,15E+01 | 8,65E-01 | 1,37E+00 | 7,38E-02 | 9,73E-02 |
| 10736 | Limon – sableux | 2,74E+00 | 1,85E+00 | 2,56E+01 | 8,55E+00 | 1,05E+00 | 2,02E+01 | 7,98E-01 | 1,37E+00 | 6,73E-02 | 9,22E-02 |
| 10737 | Limon – sableux | 2,74E+00 | 1,85E+00 | 2,82E+01 | 9,82E+00 | 1,24E+00 | 2,35E+01 | 9,74E-01 | 1,37E+00 | 8,46E-02 | 1,05E-01 |
| 10738 | Limon – sableux | 2,74E+00 | 1,85E+00 | 2,78E+01 | 9,60E+00 | 1,21E+00 | 2,29E+01 | 9,41E-01 | 1,37E+00 | 8,14E-02 | 1,03E-01 |
| 10739 | Limon – sableux | 2,74E+00 | 1,85E+00 | 2,95E+01 | 1,04E+01 | 1,33E+00 | 2,51E+01 | 1,06E+00 | 1,37E+00 | 9,36E-02 | 1,12E-01 |
| 10740 | Limon – sableux | 2,74E+00 | 1,85E+00 | 3,05E+01 | 1,09E+01 | 1,41E+00 | 2,64E+01 | 1,14E+00 | 1,37E+00 | 1,01E-01 | 1,17E-01 |
| 10855 | Limon – sableux | 1,01E+03 | 2,16E+01 | 2,27E+01 | 2,15E+01 | 3,54E+01 | 6,85E+02 | 4,46E+01 | 1,73E+00 | 6,07E-01 | 3,61E-01 |
| 10931 | Limon – sableux | 6,99E+00 | 2,59E+02 | 6,23E+01 | 6,55E+01 | 4,43E+01 | 8,38E+02 | 1,03E+02 | 4,74E+00 | 8,70E-02 | 1,08E-01 |
| 10944 | Limon – sableux | 2,40E+00 | 4,87E+00 | 5,18E+01 | 2,39E+01 | 2,38E-02 | 4,63E-01 | 4,96E+00 | 7,36E-01 | 6,16E-02 | 8,71E-02 |
| 10945 | Limon – sableux | 7,28E+01 | 4,87E+00 | 1,70E+02 | 8,62E+01 | 1,26E-01 | 2,53E+00 | 4,50E+01 | 7,36E-01 | 7,98E-01 | 4,35E-01 |
| 10946 | Limon – sableux | 9,02E+01 | 4,87E+00 | 2,15E+02 | 9,86E+01 | 1,60E-01 | 3,43E+00 | 6,56E+01 | 7,36E-01 | 1,20E+00 | 5,84E-01 |
| 10955 | Limon – sableux | 1,29E+02 | | 6,11E+02 | 2,71E+02 | 3,72E-05 | 6,83E-04 | 4,86E+01 | 3,66E+00 | 2,21E-01 | 1,87E-01 |
| 10956 | Limon – sableux | 1,30E+02 | | 5,59E+02 | 2,45E+02 | 3,28E-05 | 6,02E-04 | 4,12E+01 | 3,66E+00 | 1,82E-01 | 1,66E-01 |
| 10957 | Limon – sableux | 9,39E+01 | | 6,04E+02 | 2,68E+02 | 3,66E-05 | 6,71E-04 | 4,75E+01 | 3,66E+00 | 2,16E-01 | 1,84E-01 |
| 10958 | Limon – sableux | 6,61E+01 | | 5,53E+02 | 2,42E+02 | 3,22E-05 | 5,92E-04 | 4,03E+01 | 3,66E+00 | 1,77E-01 | 1,63E-01 |
| 10959 | Limon – sableux | 7,92E+01 | | 6,47E+01 | 3,64E+01 | 5,71E-03 | 1,07E-01 | 1,59E+01 | 1,36E-01 | 4,05E-01 | 2,75E-01 |
| 10960 | Limon – sableux | 1,57E+02 | 6,76E-01 | 7,77E+01 | 4,26E+01 | 7,12E-03 | 1,37E-01 | 2,18E+01 | 1,36E-01 | 5,83E-01 | 3,51E-01 |
| 10961 | Limon – sableux | 2,65E+02 | | 8,68E+01 | 4,78E+01 | 4,28E-03 | 8,13E-02 | 2,21E+01 | 1,53E-01 | 5,01E-01 | 3,17E-01 |
| 10962 | sableux | 2,57E+02 | | 9,05E+01 | 4,95E+01 | 4,49E-03 | 8,60E-02 | 2,37E+01 | 5,43E-01 | 5,43E-01 | 3,34E-01 |
| 10963 | Limon – sableux | 5,54E+01 | | 8,94E+01 | 4,90E+01 | 4,43E-03 | 8,47E-02 | 2,32E+01 | 1,53E-01 | 5,31E-01 | 3,29E-01 |
| 10964 | Limon – sableux | 6,87E+02 | | 1,22E+02 | 6,12E+01 | 5,00E-04 | 1,02E-02 | 3,93E+01 | 5,84E-02 | 9,41E-01 | 4,90E-01 |
| 10965 | Limon – sableux | 3,95E+02 | | 1,06E+02 | 5,57E+01 | 4,28E-04 | 8,45E-03 | 3,09E+01 | 5,84E-02 | 7,23E-01 | 4,06E-01 |
| 10966 | sableux | 1,46E+02 | | 9,15E+01 | 5,00E+01 | 4,55E-03 | 8,74E-02 | 2,42E+01 | 1,53E-01 | 5,56E-01 | 3,40E-01 |
| 11060 | Limon – sableux | 1,33E+02 | 1,46E+00 | 7,47E+01 | 2,81E+01 | 6,27E-01 | 1,21E+01 | 5,44E+00 | 8,53E-01 | 5,70E-01 | 3,45E-01 |

| | | | | | | | | | | | |
|-------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 11061 | Limon – sableux | 3,50E+02 | 6,00E+00 | 9,03E+01 | 3,46E+01 | 1,03E+02 | 1,90E+03 | 4,36E+00 | 2,23E-01 | 2,23E-01 | 1,89E-01 |
| 11063 | Limon – sableux | 1,99E+02 | 3,31E+00 | 4,18E+02 | 1,21E+02 | 2,06E+00 | 4,65E+01 | 3,95E+01 | 5,46E+00 | 1,53E+00 | 7,02E-01 |
| 11064 | Limon – sableux | 1,97E+02 | 4,57E+00 | 2,65E+02 | 9,26E+01 | 7,11E+00 | 1,43E+02 | 2,03E+01 | 6,56E+00 | 8,24E-01 | 4,44E-01 |
| 11071 | Limon – sableux | 1,80E+00 | 1,27E+00 | 4,97E+01 | 1,89E+01 | 1,79E+00 | 3,44E+01 | 3,69E+00 | 7,63E-01 | 5,64E-01 | 3,43E-01 |
| 11094 | Limon – sableux | 8,62E+00 | | 1,14E+02 | 4,26E+01 | 1,38E-03 | 2,54E-02 | 5,26E+00 | 7,84E-01 | 2,00E-01 | 1,76E-01 |
| 11098 | Limon – sableux | 7,54E+00 | 4,03E+00 | 6,96E+01 | 2,46E+01 | 3,63E+00 | 6,79E+01 | 2,47E+00 | 4,43E+00 | 1,04E-01 | 1,19E-01 |
| 11133 | Limon – sableux | 9,10E+01 | 1,06E+00 | 4,13E+01 | 1,44E+01 | 1,22E+01 | 2,51E+02 | 3,83E+00 | 9,12E-01 | 1,00E+00 | 5,12E-01 |
| 11134 | Limon – sableux | 4,51E+01 | 2,45E+00 | 9,10E+01 | 3,10E+01 | 5,93E+01 | 1,24E+03 | 8,27E+00 | 2,78E+00 | 1,05E+00 | 5,30E-01 |
| 11135 | Limon – sableux | 2,21E+01 | 1,40E+00 | 4,64E+01 | 1,67E+01 | 2,49E+01 | 5,01E+02 | 4,00E+00 | 1,48E+00 | 8,40E-01 | 4,52E-01 |
| 11137 | Limon – sableux | 5,11E+01 | 1,06E+00 | 3,06E+00 | 2,85E+00 | 6,79E-02 | 1,29E+00 | 4,73E+00 | 6,21E-02 | 4,78E-01 | 3,07E-01 |
| 11139 | sableux | 1,45E+01 | 1,04E+01 | 1,07E+01 | 9,79E+00 | 1,79E+02 | 3,67E+03 | 2,74E+01 | 5,58E+00 | 9,59E-01 | 4,95E-01 |
| 11177 | Limon – sableux | | 1,61E+01 | 4,04E+01 | 3,19E+01 | 4,55E+01 | 9,02E+02 | 4,38E+01 | 5,02E+00 | 7,39E-01 | 4,12E-01 |
| 11200 | Limon – sableux | | 5,71E+00 | 3,74E+01 | 2,44E+01 | 2,82E+00 | 6,13E+01 | 4,22E+01 | 1,36E+00 | 1,31E+00 | 6,22E-01 |
| 11274 | Limon – sableux | 4,05E+00 | 1,94E+01 | 1,88E+01 | 1,89E+01 | 2,26E+01 | 4,29E+02 | 3,65E+01 | 2,58E+00 | 4,71E-01 | 3,04E-01 |
| 11275 | Limon – sableux | 2,18E+00 | 2,49E+01 | 2,24E+01 | 2,30E+01 | 2,18E+01 | 4,11E+02 | 4,64E+01 | 2,80E+00 | 4,60E-01 | 2,99E-01 |
| 11276 | Limon – sableux | 2,48E+01 | 4,86E+01 | 4,69E+01 | 4,56E+01 | 1,62E+02 | 3,23E+03 | 1,22E+02 | 4,96E+00 | 7,88E-01 | 4,30E-01 |
| 11279 | Limon – sableux | 6,30E-01 | 1,30E+00 | 3,81E+00 | 3,63E+00 | 4,64E-02 | 8,73E-01 | 5,98E+00 | 8,17E-02 | 4,34E-01 | 2,88E-01 |
| 11286 | Limon – sableux | 2,67E+01 | 2,99E+01 | 3,70E+01 | 3,36E+01 | 1,47E+02 | 3,03E+03 | 9,36E+01 | 4,92E+00 | 9,68E-01 | 4,98E-01 |
| 11291 | Limon – sableux | 1,50E+00 | 4,20E+01 | 1,78E+01 | 1,81E+01 | 3,01E+01 | 5,54E+02 | 2,55E+01 | 4,85E+00 | 1,51E-01 | 1,49E-01 |
| 11308 | Limon – sableux | 6,95E+00 | 3,16E+01 | 2,84E+01 | 2,86E+01 | 3,40E+01 | 6,35E+02 | 5,08E+01 | 4,52E+00 | 3,93E-01 | 2,70E-01 |
| 11310 | Limon – sableux | 9,23E+00 | 7,52E+01 | 2,57E+01 | 2,64E+01 | 3,57E+01 | 6,61E+02 | 3,80E+01 | 5,19E+00 | 1,26E-01 | 1,33E-01 |
| 11317 | Limon – sableux | 1,23E-01 | 5,93E+00 | 7,31E+00 | 7,00E+00 | 9,74E-02 | 1,80E+00 | 8,58E+00 | 4,28E-01 | 1,52E-01 | 1,50E-01 |
| 11318 | sableux | 6,27E-01 | 5,33E+00 | 8,85E+00 | 8,75E+00 | 5,84E-02 | 1,07E+00 | 1,20E+01 | 3,65E-01 | 2,03E-01 | 1,78E-01 |
| 11320 | Limon – sableux | 5,47E+00 | 7,15E+00 | 1,28E+01 | 1,27E+01 | 2,54E-01 | 4,76E+00 | 2,29E+01 | 5,20E-01 | 4,20E-01 | 2,82E-01 |
| 11321 | Limon – sableux | 5,68E+00 | 4,42E+00 | 8,02E+00 | 7,85E+00 | 5,85E-02 | 1,08E+00 | 1,07E+01 | 3,25E-01 | 2,23E-01 | 1,89E-01 |
| 11397 | Limon – sableux | 6,02E+01 | 1,94E+00 | 6,15E+00 | 5,17E+00 | 3,35E-01 | 6,15E+00 | 5,06E+00 | 1,03E+01 | 1,97E-01 | 1,74E-01 |
| 11478 | Limon – sableux | 4,63E+00 | 2,90E+01 | 1,35E+01 | 1,39E+01 | 4,19E+01 | 7,71E+02 | 2,06E+01 | 5,00E+00 | 1,86E-01 | 1,69E-01 |

Tableau 2. Caractéristiques physiques des sols étudiés (SoilVision).

| N° | sol | porosité | d_{10} | d_{20} | d_{60} | %sable | %Argile | %Limon | $K_{mesuré} (x 10^{-6})$ |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|---------|--------|--------------------------|
| 10831 | Argileux | 44,49 | 0,00001 | 0,00002 | 0,00313 | 5,88 | 54,5 | 39,52 | 3,01E-02 |
| 10838 | Argileux | 44,85 | 0,000001 | 0,00002 | 0,01234 | 16,15 | 43,12 | 40,67 | 1,97E-01 |
| 10847 | Argileux | 39,3 | 0,00002 | 0,00018 | 0,00567 | 6,6 | 41,08 | 52,23 | 5,56E-02 |
| 10851 | Argileux | 46,3 | 0,00001 | 0,00002 | 0,0023 | 10,86 | 58,1 | 31,03 | 5,79E-02 |
| 10910 | Argileux | 79 | 0,00001 | 0,00003 | 0,0042 | 3,73 | 49 | 47,25 | 1,09E-01 |
| 10980 | Argileux | 49,2 | 0,00001 | 0,00002 | 0,01032 | 19,2 | 45,49 | 36,64 | 5,79E-01 |
| 10981 | Argileux | 55,7 | 0,00001 | 0,00002 | 0,00251 | 4,34 | 57,35 | 38,27 | 2,31E-01 |
| 10982 | Argileux | 55,7 | 0,00001 | 0,00003 | 0,00165 | 3,81 | 62,95 | 33,11 | 4,63E-02 |
| 11087 | Argileux | 57,4 | 0,00001 | 0,00002 | 0,01135 | 16,59 | 47,8 | 35,6 | 8,70E-01 |
| 11088 | Argileux | 51,3 | 0,00001 | 0,00002 | 0,01052 | 17,69 | 49,5 | 32,8 | 4,60E-01 |
| 11089 | Argileux | 44,5 | 0,00001 | 0,00002 | 0,011388 | 23,17 | 46,9 | 29,9 | 6,60E-02 |
| 11099 | Argileux | 62,3 | 0,00001 | 0,00002 | 0,0032 | 15,16 | 57,9 | 26,9 | 6,01E+00 |
| 11100 | Argileux | 47,6 | 0,00001 | 0,00002 | 0,0242 | 25,68 | 39,2 | 35,1 | 6,49E-01 |
| 11105 | Argileux | 50,4 | 0,00001 | 0,00002 | 0,02917 | 30,68 | 40,3 | 29 | 6,20E+00 |
| 11106 | Argileux | 49,1 | 0,00001 | 0,00002 | 0,05634 | 41,67 | 38,4 | 19,9 | 1,51E+00 |
| 11141 | Argileux | 63 | 0,00002 | 0,00016 | 0,01322 | 20,72 | 37,33 | 39,31 | 1,13E+01 |
| 11142 | Argileux | 56 | 0,00002 | 0,00008 | 0,04483 | 25,42 | 35,63 | 25,3 | 3,67E+01 |
| 11143 | Argileux | 57,1 | 0,00002 | 0,00009 | 0,02129 | 21,09 | 40,12 | 26,73 | 1,36E+01 |
| 11159 | Argileux | 65,9 | 0,00003 | 0,00021 | 0,00436 | 4,36 | 43,52 | 52,07 | 4,05E-01 |
| 11306 | Argileux | 54,1 | 0,00001 | 0,00002 | 0,00548 | 11 | 50,93 | 37,95 | 5,88E+00 |
| 11307 | Argileux | 58,11 | 0,00002 | 0,0001 | 0,00309 | 7,6 | 53,03 | 38,86 | 6,16E+00 |
| 10975 | Argileux | 59,25 | 0,00001 | 0,00001 | 0,02194 | 35,4 | 52,51 | 12 | 1,01E+01 |
| 11409 | Argileux | 55,5 | 0,00001 | 0,00002 | 0,0079 | 12,55 | 47,41 | 39,97 | 4,45E+02 |
| 11410 | Argileux | 57,8 | 0,00001 | 0,00002 | 0,0039 | 10,8 | 54,15 | 34,74 | 1,93E+02 |
| 10841 | Argileux | 62,2 | 0,00003 | 0,0008 | 0,07731 | 46,12 | 26 | 27,21 | 6,83E+00 |
| 10949 | Argileux | 47,2 | 0,00002 | 0,00012 | 0,0578 | 44 | 26,33 | 29,66 | 3,91E+01 |
| 10950 | Argileux | 46,9 | 0,00002 | 0,00012 | 0,0578 | 44 | 26,33 | 29,66 | 1,55E+01 |
| 11077 | Argileux | 57,3 | 0,00002 | 0,00025 | 0,03856 | 32,68 | 26,2 | 41,1 | 2,70E+01 |
| 11078 | Argileux | 54 | 0,00002 | 0,00053 | 0,04086 | 38,88 | 24,3 | 41,8 | 1,30E+01 |
| 11107 | Argileux | 46,7 | 0,00001 | 0,00002 | 0,05691 | 42,18 | 35,5 | 22,3 | 4,11E+00 |
| 11125 | Argileux | 69,6 | 0,00002 | 0,00043 | 0,0457 | 37,38 | 24,6 | 38 | 6,90E+01 |
| 11372 | Argileux | 44,81 | 0,00002 | 0,00034 | 0,02 | 22,43 | 27,16 | 50,36 | 5,48E+00 |
| 11373 | Argileux | 44,81 | 0,00002 | 0,00034 | 0,02 | 22,43 | 27,16 | 50,36 | 2,90E+00 |
| 11374 | Argileux | 44,81 | 0,00002 | 0,00034 | 0,02 | 22,43 | 27,16 | 50,36 | 1,62E+01 |
| 11375 | Argileux | 44,81 | 0,00002 | 0,00034 | 0,02 | 22,43 | 27,16 | 50,36 | 1,82E+00 |
| 11400 | Argileux | 57 | 0,00002 | 0,00069 | 0,05038 | 39,25 | 24,11 | 35,74 | 8,91E-02 |
| 11413 | Argileux | 82 | 0,00004 | 0,00099 | 0,03516 | 31,98 | 23,97 | 42,42 | 1,00E+01 |
| 11417 | Argileux | 70 | 0,00004 | 0,00099 | 0,03516 | 31,98 | 23,97 | 42,42 | 6,11E+00 |
| 11418 | Argileux | 70,8 | 0,00004 | 0,00099 | 0,03516 | 31,98 | 23,97 | 42,42 | 1,61E+01 |
| 11458 | Argileux | 60,2 | 0,00002 | 0,00069 | 0,05038 | 39,25 | 24,11 | 35,74 | 1,81E-01 |
| 11459 | Argileux | 51 | 0,00002 | 0,00069 | 0,05065 | 32,52 | 24,11 | 34,88 | 1,19E-01 |
| 11460 | Argileux | 49 | 0,00002 | 0,00069 | 0,05065 | 32,52 | 24,11 | 34,88 | 6,67E-01 |
| 11461 | Argileux | 59,7 | 0,00002 | 0,00069 | 0,05038 | 39,25 | 24,11 | 35,74 | 8,06E-01 |
| 11462 | Argileux | 54 | 0,00002 | 0,00069 | 0,05265 | 39,93 | 24,11 | 34,88 | 1,39E+00 |
| 11463 | Argileux | 42 | 0,00002 | 0,00069 | 0,05265 | 39,93 | 24,11 | 34,88 | 4,44E-01 |
| 11464 | Argileux | 50,7 | 0,00002 | 0,00069 | 0,05038 | 39,25 | 24,11 | 35,74 | 4,72E-02 |
| 11465 | Argileux | 52 | 0,00002 | 0,00069 | 0,05265 | 39,93 | 24,11 | 34,88 | 1,03E-01 |
| 11466 | Argileux | 51 | 0,00002 | 0,00069 | 0,05265 | 39,93 | 24,11 | 34,88 | 7,50E-01 |
| 11467 | Argileux | 53 | 0,00002 | 0,00069 | 0,05038 | 39,25 | 24,11 | 35,74 | 8,06E-01 |

| N° | sol | porosité | d ₁₀ | d ₂₀ | d ₆₀ | %sable | %Argile | %Limon | K _{mesuré} (x 10 ⁻⁶) |
|-------|---------------------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|---------|--------|---|
| 11468 | Argileux | 47 | 0,00002 | 0,00069 | 0,05038 | 39,25 | 24,11 | 3,74 | 2,22E+00 |
| 10819 | sableux | 39,72 | 0,21111 | 0,3502 | 0,6696 | 95,67 | 1,07 | 2,25 | 4,50E+01 |
| 10820 | sableux | 35,85 | 0,20949 | 0,35169 | 0,67518 | 95,55 | 1,12 | 2,3 | 1,39E-02 |
| 10827 | sableux | 41 | 0,04923 | 0,15186 | 0,33987 | 89,93 | 4,3 | 5,77 | 1,40E+01 |
| 10857 | sableux | 36,5 | 0,09671 | 0,15676 | 0,20732 | 93,7 | 2,55 | 3,75 | 2,31E+01 |
| 10924 | sableux | 36,4 | 0,05966 | 0,12396 | 0,29974 | 90,97 | 2,29 | 6,49 | 5,37E+01 |
| 10925 | sableux | 36,4 | 0,05966 | 0,12396 | 0,29974 | 90,97 | 2,29 | 6,49 | 5,37E+01 |
| 10926 | sableux | 35,9 | 0,05966 | 0,12396 | 0,29974 | 90,97 | 2,29 | 6,49 | 4,27E+01 |
| 10927 | sableux | 34,7 | 0,05966 | 0,12396 | 0,29974 | 90,97 | 2,29 | 6,49 | 3,48E+01 |
| 10928 | sableux | 34,7 | 0,05966 | 0,12396 | 0,29974 | 90,97 | 2,29 | 6,49 | 3,48E+01 |
| 10929 | sableux | 36,9 | 0,05966 | 0,12396 | 0,29974 | 90,97 | 2,29 | 6,49 | 2,04E+00 |
| 10930 | sableux | 38 | 0,05966 | 0,12396 | 0,29974 | 90,97 | 2,29 | 6,49 | 6,13E+01 |
| 10974 | sableux | 37,1 | 0,15329 | 0,20414 | 0,34975 | 98,34 | 0,16 | 1,34 | 1,46E+01 |
| 10977 | sableux | 39,62 | 0,11821 | 0,15968 | 0,284 | 97,73 | 0,17 | 1,96 | 9,26E+00 |
| 11164 | sableux | 40 | 0,1168 | 0,17849 | 0,26709 | 95,24 | 1,47 | 3,29 | 9,68E+00 |
| 11175 | sableux | 42,25 | 0,06173 | 0,12774 | 0,25467 | 91,33 | 2,68 | 5,99 | 2,00E+00 |
| 11187 | sableux | 41,89 | 0,18483 | 0,24439 | 0,34411 | 97,76 | 0,58 | 1,65 | 5,42E+01 |
| 11216 | sableux | 37,74 | 0,12286 | 0,15031 | 0,25414 | 99,53 | 0 | 0,24 | 3,59E-04 |
| 11257 | sableux | 45,6 | 0,1081 | 0,15664 | 0,31264 | 96,43 | 0,31 | 2,82 | 3,00E-01 |
| 11272 | sableux | 44,91 | 0,08083 | 0,12703 | 0,18554 | 93,52 | 1,89 | 4,59 | 1,11E+01 |
| 11273 | sableux | 38,87 | 0,9012 | 0,12014 | 0,17,643 | 95,9 | 0,63 | 3,46 | 6,08E+00 |
| 11290 | sableux | 36,6 | 0,6319 | 0,09046 | 0,15275 | 93 | 0,79 | 6,2 | 3,58E+00 |
| 11313 | sableux | 38,49 | 0,07307 | 0,10063 | 0,17556 | 94,91 | 0,39 | 4,69 | 2,03E+01 |
| 11315 | sableux | 38,87 | 0,05999 | 0,09635 | 0,20789 | 91,91 | 0,92 | 7,02 | 1,27E+01 |
| 11354 | sableux | 38,5 | 0,15264 | 0,19639 | 0,31654 | 98,72 | 0,12 | 1,11 | 5,00E+01 |
| 11368 | sableux | 46,04 | 0,12286 | 0,15031 | 0,25414 | 99,53 | 0 | 0,24 | 1,54E-01 |
| 11369 | sableux | 46,04 | 0,12286 | 0,15031 | 0,25414 | 99,53 | 0 | 0,24 | 1,17E+00 |
| 11370 | sableux | 46,04 | 0,12286 | 0,15031 | 0,25414 | 99,53 | 0 | 0,24 | 2,10E+00 |
| 11371 | sableux | 41,3 | 0,12286 | 0,15031 | 0,25414 | 99,53 | 0 | 0,24 | 2,07E+00 |
| 11399 | sableux | 37,3 | 0,05126 | 0,18792 | 0,39814 | 90,09 | 4,93 | 4,99 | 6,94E+01 |
| 11401 | sableux | 38 | 0,10348 | 0,19205 | 0,38439 | 94 | 1,82 | 4,08 | 1,13E+00 |
| 11402 | sableux | 37,7 | 0,10903 | 0,18301 | 0,38861 | 94,71 | 1,05 | 3,73 | 2,20E+01 |
| 11403 | sableux | 46,3 | 0,05971 | 0,16327 | 0,37039 | 90,79 | 3,69 | 5,49 | 7,24E+01 |
| 11419 | sableux | 48,1 | 0,2292 | 0,3433 | 0,55014 | 96,99 | 1,03 | 1,95 | 1,81E+01 |
| 11437 | sableux | 43,8 | 0,06383 | 0,09829 | 0,18366 | 92,67 | 1,01 | 6,3 | 2,78E+01 |
| 11438 | sableux | 42,18 | 0,06238 | 0,08879 | 0,15429 | 93,1 | 0,66 | 6,33 | 7,78E+01 |
| 11439 | sableux | 42,18 | 0,06555 | 0,09446 | 0,18021 | 93,57 | 0,47 | 5,91 | 3,33E+01 |
| 11441 | sableux | 42,19 | 0,06768 | 0,09295 | 0,15562 | 94,15 | 0,49 | 5,36 | 3,33E+01 |
| 11454 | sableux | 47,55 | 0,06403 | 0,09739 | 0,18622 | 92,83 | 0,85 | 6,29 | 1,94E+00 |
| 11455 | sableux | 37,36 | 0,08638 | 0,11417 | 0,19186 | 96,68 | 0,2 | 3,1 | 9,72E-01 |
| 11456 | sableux | 42,26 | 0,07393 | 0,10174 | 0,17593 | 94,98 | 0,4 | 4,61 | 1,00E+00 |
| 11457 | sableux | 43,4 | 0,08266 | 0,10687 | 0,17643 | 96,84 | 0,14 | 3,01 | 6,67E-02 |
| 11474 | sableux | 29,7 | 0,3161 | 0,43562 | 0,59639 | 97,74 | 0,88 | 1,38 | 2,91E+01 |
| 11477 | sableux | 39,9 | 0,15305 | 0,21227 | 0,30322 | 96,82 | 0,9 | 2,28 | 8,01E+01 |
| 11486 | sableux | 33,3 | 0,05966 | 0,12396 | 0,29974 | 90,97 | 2,29 | 6,49 | 2,94E+01 |
| 10846 | Limoneux sableux | 34,9 | 0,00002 | 0,00006 | 0,09845 | 51,92 | 27,78 | 20,12 | 2,77E+00 |
| 10854 | Limoneux sableux | 33,9 | 0,00003 | 0,00304 | 0,11403 | 58,78 | 18,34 | 22,56 | 8,91E+02 |
| 10976 | Limoneux sableux | 42,11 | 0,00001 | 0,00002 | 0,11502 | 50,6 | 34,25 | 15,06 | 2,43E+00 |
| 11090 | Limoneux sableux | 53,3 | 0,00002 | 0,00009 | 0,10128 | 54,99 | 25,8 | 19,2 | 8,60E+00 |

| <i>N°</i> | <i>sol</i> | <i>porosité</i> | <i>d₁₀</i> | <i>d₂₀</i> | <i>d₆₀</i> | <i>%sable</i> | <i>%Argile</i> | <i>%Limon</i> | <i>K_{mesuré} (x 10⁻⁶)</i> |
|-----------|------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|----------------|---------------|---|
| 11091 | Limoneux sableux | 49,1 | 0,00002 | 0,00019 | 0,13311 | 58,98 | 24,3 | 16,7 | 9,80E-01 |
| 11319 | Limoneux sableux | 45,94 | 0,00002 | 0,00325 | 0,11878 | 64,39 | 18,88 | 16,73 | 4,36E+00 |
| 11322 | Limoneux sableux | 41,57 | 0,00002 | 0,00321 | 0,11878 | 64,38 | 18,91 | 16,72 | 3,74E+00 |
| 11342 | Limoneux sableux | 43,56 | 0,00002 | 0,00494 | 0,1018 | 66 | 18 | 16 | 1,49E-01 |
| 11343 | Limoneux sableux | 43,56 | 0,00002 | 0,00494 | 0,1018 | 66 | 18 | 16 | 3,29E-01 |
| 11344 | Limoneux sableux | 43,56 | 0,00002 | 0,00494 | 0,1018 | 66 | 18 | 16 | 3,59E-01 |
| 11345 | Limoneux sableux | 43,48 | 0,00002 | 0,00494 | 0,1018 | 66 | 18 | 16 | 9,82E-01 |
| 11346 | Limoneux sableux | 43,6 | 0,00002 | 0,00494 | 0,1018 | 66 | 18 | 16 | 1,66E+00 |
| 11347 | Limoneux sableux | 43,41 | 0,00002 | 0,00494 | 0,1018 | 66 | 18 | 16 | 6,92E-01 |
| 11348 | Limoneux sableux | 43,41 | 0,00002 | 0,00494 | 0,1018 | 66 | 18 | 16 | 1,72E+01 |
| 11349 | Limoneux sableux | 43,37 | 0,00002 | 0,00494 | 0,1018 | 66 | 18 | 16 | 1,92E+02 |
| 11350 | Limoneux sableux | 43,3 | 0,00002 | 0,00494 | 0,1018 | 66 | 18 | 16 | 3,63E+00 |
| 11351 | Limoneux sableux | 42,8 | 0,00002 | 0,00494 | 0,1018 | 66 | 18 | 16 | 7,64E+00 |
| 11398 | Limoneux sableux | 36,1 | 0,00002 | 0,00337 | 0,28753 | 70,65 | 19,05 | 1,3 | 4,63E+01 |
| 11415 | Limoneux sableux | 60 | 0,00001 | 0,00003 | 0,18008 | 63,56 | 26,88 | 9,56 | 4,10E+00 |
| 11416 | Limoneux sableux | 54,2 | 0,00002 | 0,0061 | 0,16668 | 66,34 | 21,8 | 11,86 | 6,94E+01 |
| 10733 | Limoneux sableux | 37,76 | 0,00708 | 0,003261 | 0,123 | 72,96 | 7 | 20 | 2,74E+00 |
| 10734 | Limoneux sableux | 30,94 | 0,00708 | 0,003261 | 0,123 | 72,96 | 7 | 20 | 2,74E+00 |
| 10735 | Limoneux sableux | 31,65 | 0,00708 | 0,003261 | 0,123 | 72,96 | 7 | 20 | 2,74E+00 |
| 10736 | Limoneux sableux | 31 | 0,00708 | 0,003261 | 0,123 | 72,96 | 7 | 20 | 2,74E+00 |
| 10737 | Limoneux sableux | 32,61 | 0,00708 | 0,003261 | 0,123 | 72,96 | 7 | 20 | 2,74E+00 |
| 10738 | Limoneux sableux | 32,33 | 0,00708 | 0,003261 | 0,123 | 72,96 | 7 | 20 | 2,74E+00 |
| 10739 | Limoneux sableux | 33,33 | 0,00708 | 0,003261 | 0,123 | 72,96 | 7 | 20 | 2,74E+00 |
| 10740 | Limoneux sableux | 33,89 | 0,00708 | 0,003261 | 0,123 | 72,96 | 7 | 20 | 2,74E+00 |
| 10855 | Limoneux sableux | 48 | 0,02005 | 0,03609 | 0,10382 | 70,11 | 1,63 | 27,95 | 1,01E+03 |
| 10931 | Limoneux sableux | 32,8 | 0,04195 | 0,0559 | 0,22249 | 79,18 | 0 | 15,74 | 6,99E+00 |
| 10944 | Limoneux sableux | 30,4 | 0,001 | 0,02488 | 0,14767 | 72,99 | 10,98 | 16,02 | 2,40E+00 |
| 10945 | Limoneux sableux | 50,5 | 0,001 | 0,02488 | 0,14767 | 72,99 | 10,98 | 16,02 | 7,28E+01 |
| 10946 | Limoneux sableux | 54,3 | 0,001 | 0,2488 | 0,14767 | 72,99 | 10,98 | 16,02 | 9,02E+01 |
| 10955 | Limoneux sableux | 39,8 | 0,00003 | 0,04997 | 1,00144 | 79,99 | 15,01 | 4,99 | 1,29E+02 |
| 10956 | Limoneux sableux | 38,3 | 0,00003 | 0,04997 | 1,00144 | 79,99 | 15,01 | 4,99 | 1,30E+02 |
| 10957 | Limoneux sableux | 39,6 | 0,00003 | 0,04997 | 1,00144 | 79,99 | 15,01 | 4,99 | 9,39E+01 |
| 10958 | Limoneux sableux | 38,1 | 0,00003 | 0,04997 | 1,00144 | 79,99 | 15,01 | 4,99 | 6,61E+01 |
| 10959 | Limoneux sableux | 44,6 | 0,00029 | 0,01194 | 0,10806 | 63,97 | 13,33 | 22,67 | 7,92E+01 |
| 10960 | Limoneux sableux | 47,7 | 0,00029 | 0,01194 | 0,10806 | 63,97 | 13,33 | 22,67 | 1,57E+02 |

| <i>N°</i> | <i>sol</i> | <i>porosité</i> | <i>d₁₀</i> | <i>d₂₀</i> | <i>d₆₀</i> | <i>%sable</i> | <i>%Argile</i> | <i>%Limon</i> | <i>K_{mesuré} (x 10⁻⁶)</i> |
|-----------|------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|----------------|---------------|---|
| 10961 | Limoneux sableux | 46,4 | 0,00023 | 0,01255 | 0,11974 | 65,97 | 13,47 | 20,53 | 2,65E+02 |
| 10962 | Limoneux sableux | 47,1 | 0,00023 | 0,01255 | 0,11974 | 65,97 | 13,47 | 20,53 | 2,57E+02 |
| 10963 | Limoneux sableux | 46,9 | 0,00023 | 0,01255 | 0,11974 | 65,97 | 13 | 20,53 | 5,54E+01 |
| 10964 | Limoneux sableux | 52 | 0,00007 | 0,00827 | 0,11779 | 63,97 | 15,35 | 20,65 | 6,87E+02 |
| 10965 | Limoneux sableux | 49,6 | 0,00007 | 0,0027 | 0,11779 | 63,97 | 15,35 | 20,65 | 3,95E+02 |
| 10966 | Limoneux sableux | 47,3 | 0,00023 | 0,01255 | 0,11974 | 65,97 | 13,47 | 20,53 | 1,46E+02 |
| 11060 | Limoneux sableux | 47,5 | 0,00271 | 0,02653 | 0,12234 | 71,59 | 9,4 | 19 | 1,33E+02 |
| 11061 | Limoneux sableux | 39,8 | 0,04658 | 0,05692 | 0,09188 | 87,1 | 0,01 | 12,89 | 3,50E+02 |
| 11063 | Limoneux sableux | 56,7 | 0,00368 | 0,05947 | 0,27933 | 81,28 | 9,1 | 9,59 | 1,99E+02 |
| 11064 | Limoneux sableux | 50,8 | 0,00819 | 0,06442 | 0,24327 | 82,28 | 7,6 | 10,1 | 1,97E+02 |
| 11071 | Limoneux sableux | 47,4 | 0,0046 | 0,02527 | 0,10643 | 68,26 | 8 | 23,7 | 1,80E+00 |
| 11094 | Limoneux sableux | 39 | 0,00018 | 0,02558 | 0,25988 | 75,86 | 12,9 | 11,2 | 8,62E+00 |
| 11098 | Limoneux sableux | 34,1 | 0,01126 | 0,05427 | 0,17984 | 80,98 | 6,5 | 12,5 | 7,54E+00 |
| 11133 | Limoneux sableux | 52,5 | 0,1014 | 0,02731 | 0,085 | 64,07 | 5 | 30,9 | 9,10E+01 |
| 11134 | Limoneux sableux | 53 | 0,02205 | 0,04433 | 0,10994 | 76,87 | 2,8 | 20,3 | 4,51E+01 |
| 11135 | Limoneux sableux | 50,9 | 0,01527 | 0,03367 | 0,09145 | 68,87 | 3,6 | 27,5 | 2,21E+01 |
| 11137 | Limoneux sableux | 46 | 0,00094 | 0,00849 | 0,08353 | 67,5 | 11,55 | 20,95 | 5,11E+01 |
| 11139 | Limoneux sableux | 52,17 | 0,03928 | 0,06001 | 0,8353 | 86,03 | 2,26 | 11,71 | 1,45E+01 |
| 11274 | Limoneux sableux | 45,86 | 0,01728 | 0,04294 | 0,15255 | 75,62 | 5,22 | 19,16 | 4,05E+00 |
| 11275 | Limoneux sableux | 45,67 | 0,01706 | 0,04448 | 0,15505 | 76,21 | 5,84 | 17,95 | 2,18E+00 |
| 11276 | Limoneux sableux | 50,38 | 0,0396 | 0,05702 | 0,16329 | 85,3 | 2,61 | 12,1 | 2,48E+01 |
| 11279 | Limoneux sableux | 45,19 | 0,0008 | 0,00957 | 0,08595 | 68,14 | 11,3 | 20,56 | 6,30E-01 |
| 11286 | Limoneux sableux | 52,26 | 0,3556 | 0,05686 | 0,17526 | 83,88 | 2,62 | 13,5 | 2,67E+01 |
| 11291 | Limoneux sableux | 36,84 | 0,2854 | 0,05647 | 0,11972 | 82,77 | 2,85 | 14,37 | 1,50E+00 |
| 11308 | Limoneux sableux | 44,36 | 0,02235 | 0,05478 | 0,19469 | 81,79 | 5,23 | 12,95 | 6,95E+00 |
| 11310 | Limoneux sableux | 35,47 | 0,03307 | 0,05819 | 0,12216 | 83,79 | 1,98 | 14,22 | 9,23E+00 |
| 11317 | Limoneux sableux | 36,9 | 0,0162 | 0,01966 | 0,10763 | 67 | 10,42 | 22,55 | 1,23E-01 |
| 11318 | Limoneux sableux | 39,1 | 0,0014 | 0,01834 | 0,10915 | 66,95 | 11,07 | 21,96 | 6,27E-01 |
| 11320 | Limoneux sableux | 44,91 | 0,00189 | 0,02139 | 0,10993 | 68,19 | 10,11 | 21,68 | 5,47E+00 |
| 11321 | Limoneux sableux | 39,8 | 0,00111 | 0,01743 | 0,10564 | 65,91 | 11,15 | 22,93 | 5,68E+00 |
| 11397 | Limoneux sableux | 38,9 | 0,00275 | 0,07838 | 0,33964 | 82,76 | 9,61 | 7,62 | 6,02E+01 |
| 11478 | Limoneux sableux | 38,4 | 0,03149 | 0,05722 | 0,12182 | 83,29 | 2,21 | 14,5 | 4,63E+00 |