

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE
ALGER - EL-HARRACH
المدرسة الوطنية العليا للفلاحة
الحراش - الجزائر

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister
en Sciences Agronomiques

Ecole doctorale : Science du sol

THEME

***Evaluation de la stabilité structurale des sols
de la Mitidja Ouest***

Présenté par : Chekired Zineeddine

Devant le jury:

| | | |
|-----------------------------|----------------------------|----------------------|
| <i>Président du jury :</i> | M. DJILI K. | Professeur |
| <i>Directeur de thèse :</i> | M. DRIDI B. | Maître de conférence |
| <i>Examineurs :</i> | M ^{me} ZERROUK F. | Chargée de cours |
| | M. DELLAL A. | Professeur |

Le 28 / 09 /2011

Année Universitaire 2010-2011

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE
EL-HARRACH - ALGER
المدرسة الوطنية العليا للفلاحة
الحراش - الجزائر

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister
en Sciences Agronomiques

Ecole doctorale : Science du sol

THEME

***Evaluation de la stabilité structurale des sols
de la Mitidja Ouest***

Présenté par : Chekired Zineeddine

Devant le jury:

| | | |
|-----------------------------|----------------------------|----------------------|
| <i>Président du jury :</i> | M. DJILI K. | Professeur |
| <i>Directeur de thèse :</i> | M. DRIDI B. | Maître de conférence |
| <i>Examineurs :</i> | M ^{me} ZERROUK F. | Chargée de cours |
| | M. DELLAL A. | Professeur |

Année Universitaire 2010-2011

- Dédicaces -

Tout d'abord je tiens à remercier dieu de m'avoir donné la force de pouvoir continuer mes études.

A mes très chers parents.

A mon frère Bilel.

A ma soeur Ibtissem et son mari Abderezak,

A ma cousine Amel.

A Hania.

A la famille Khidere et Ben salem.

A mon ami Housseem eddine.

A mes meilleurs amis sans leur aide ce rêve n'aurais jamais vu la lumière du jour : Lamia B., Amira H., Halim C., Housseem K., Arslan H., Reda L. Idir A. et Fouzi F.

A Karim O. (et ses adorables enfants Samy & Wassim).

Je tiens à remercier particulièrement de tout mon coeur mon ami Abdel halim C. pour sa compréhension, de m'avoir supporté, remonté, corrigé, aidé, conseillé et motivé pour réaliser ce travail. Je te souhaite le meilleur pour ton avenir.

A Mohamed reda L. et sa sœur Assia.

A mon cher ami Bilel H. "Bilalus" pour son amitié et sa présence dans les moments difficiles.

A Lakhdar S. pour son aide, ses conseils et ses encouragements.

A mes amis : Lila, Amina M., Nazim B., Fethi D., Madjid N., Yazid, Karim B., Rachid, Mohamed H., Reda F., Samy.

A mes amis de L'INSID : Nacera D., Karim O., Lila F., Lila T., Djawida, Mohamed H., AbdelGhani K,

La promo de 5^{ème} année 2008 2009.

- Remerciements -

Au terme de ce modeste travail, il m'est agréable d'exprimer toute ma gratitude et ma sympathie à tous ceux qui m'ont aidé.

En particulier, je remercie très sincèrement :

- ❖ **M. Dridi B.**, maître de conférence au département de science du sol à l'ENSA d'El – Harrach, qui a bien voulu accepté de diriger ce travail, en m' accordant son temps précieux pour m'orienter et me corriger.
- ❖ **M. Djili K.**, professeur au département de science du sol à l'ENSA d'El – Harrach, qui m'a fait l'honneur de présider ce jury et qui n'a pas ménagé d'efforts et de patience pour me soutenir, m'orienter et me corriger. Je dois avouer que ses critiques judicieuses et ses conseils ont été pour moi d'un grand bénéfice pour la finalisation de ce travail.
- ❖ **M^{me}. Zerrouk F.** chargée de cours au département science du sol à l'ENSA d'El – Harrach, et **M. Dellal A.**, professeur à l'université de Tiaret, qui m'ont honoré en acceptant d'examiner ce travail.

Ma très grande reconnaissance va également à **M. Daoud Y.**, professeur et **M^{me} Kourgli N.**, chargée de cours au département science du sol à l'ENSA d'El – Harrach, pour l'aide précieuse et leur gentillesse qu'il m'on prodiguée tout au long de ce travail. Qu'ils trouveront ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je tiens également à exprimer mes sincères remerciements à:

- **M. Halimi A.S.**, ingénieur d'état en statistique de l'Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene, pour m'avoir aide et prodigué avec passion ses connaissances en statistique, sans jamais être avare de détails tout au long de mon parcours.

- **M. Ouamer-Ali K.**, pour ses conseils pratiques, techniques et scientifiques ainsi que pour son art de la multi-compétence.

Je tiens également à remercier **M^{me} Chenu C.**, Professeur à l'INA-PG qui m'a fait bénéficier de ses travaux, et pour toute la documentation précieuse qu'elle m'a fait profiter.

Mes vifs remerciements s'adressent également à :

A l'ensemble des enseignants (es) du département de science du sol, qui ont contribué à ma formation. Sans oublier le personnel du département de science du sol de l'E.N.S.A : Rédouane, Amar, Ahmed, Abd-elrahim, Fétouma et Hassiba.

Zineeddine

Abréviations -

- A** : argile (%).
- AFL**: Acides fulviques libre (‰).
- AFP** : Acide fulvique extrait par le pyrophosphate de sodium (‰).
- AFS**: Acide fulvique extrait par la soude (‰).
- AHP** : Acide humique extrait par le pyrophosphate de sodium (‰).
- AHS** : Acide humique extrait par la soude (‰).
- CaCO₃**: Calcaire total (%).
- CE** : Conductivité électrique (dS/m).
- CEC** : Capacité d'échange cationique (Cmol(+)/kg).
- C.P.C.S.** : Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols.
- ddl**: Degré de liberté.
- DM**: Désagrégation mécanique.
- F.A.O.**: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FPT** : Fonction de pédotransfert.
- H** : Humine (‰)
- HL**: Humectation Lente.
- HR**: Humectation Rapide.
- Lf** : Limon fin (%).
- Lg** : Limon grossier (%).
- LT** : Limon total (%).
- ML** : Matière végétale légère (‰).
- MLiée** : Matière organique liée (‰).
- MO** : Matière organique (%).
- MWD_{DM}** : Diamètre moyen pondéral -Désagrégation Mécanique (mm).
- MWD_{HL}**: Diamètre moyen pondéral -Humectation Lente (mm).
- MWD_{HR}** : Diamètre moyen pondéral -Humectation Rapide (mm).
- MWD_{MOY}** : Diamètre moyen pondéral de la moyenne synthétique (mm).
- pH** : Potentiel hydrogène.
- PS** : Polysaccharides (‰).
- r** : Coefficient de corrélation.
- R²** : Coefficient de détermination.
- Sf** : Sable fin (%).
- Sg** : Sable grossier (%).
- SHP** : Substances humique extrait par le pyrophosphate de sodium (‰).
- SHPS** : Substances humique extrait par le pyrophosphate de sodium et la soude (‰).
- SHS** : Substances humique extrait la soude (‰).
- ST** : Sable total (%).

Table des matières

Pages

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

| | |
|---|----|
| 1. Généralités sur la stabilité structurale | 3 |
| 2. Mécanismes de dégradation de la structure | 3 |
| 2.1. Eclatement | 3 |
| 2.2. Gonflement différentiel..... | 4 |
| 2.3. Dispersion physico-chimique..... | 4 |
| 2.4. Désagrégation mécanique | 4 |
| 3. Conséquences de la désagrégation | 5 |
| 3.1. Formation de croûtes de battance | 5 |
| 3.2. Erosion | 7 |
| 4. Différentes méthodes d'évaluation de la stabilité structurale | 8 |
| 5. Facteurs influençant la stabilité structurale | 10 |
| 5.1. Texture du sol | 10 |
| 5.2. Minéralogie des argiles..... | 10 |
| 5.3. Teneurs en sodium, calcium et autres cations..... | 10 |
| 5.4. Oxydes de fer et d'aluminium..... | 10 |
| 5.5. Teneur en calcaire et en gypse..... | 10 |
| 5.6. Matière organique..... | 11 |
| 6. Matière organique et la stabilité structurale dans le sol | 12 |
| 6.1. Rôle de la matière organique du sol sur la formation et la stabilisation des agrégats..... | 13 |
| 7. Caractéristiques des facteurs agrégeant issus de la décomposition des produits organiques | |
| 7.1. Polysaccharides..... | 16 |
| 7.2. Composés humiques..... | 16 |
| 7.3. Micro-organismes..... | 17 |

CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES

| | |
|---|----|
| 1. Matériel | 19 |
| 1.1. Présentation de la région d'étude..... | 19 |
| 1.2. Géomorphologie..... | 19 |
| 1.3. Réseau hydrographique..... | 19 |
| 1.4. Pédogenèse..... | 19 |
| 1.5. Le climat..... | 19 |
| 1.6. La végétation..... | 20 |
| 1.7. Sols de la région d'étude..... | 20 |
| 2. Méthodologie | 20 |
| 3. Les méthodes d'analyses utilisées | 21 |
| 3.1. Analyses physiques..... | 22 |
| 3.2. Analyses chimiques..... | 23 |
| 3.3. Analyses biochimiques..... | 23 |

| | |
|--|----|
| 4. Traitement statistiques des données | 24 |
| 4.1. Réalisation de régressions multiples pour la construction des fonctions de pédotransfert | 24 |
| 4.2. Tests de validation des modèles de régression..... | 25 |

CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

| | |
|---|----|
| 1. Caractéristiques et propriétés des sols étudiés | 26 |
| 1.1. Paramètres chimiques..... | 26 |
| 1.2. Paramètres physiques..... | 27 |
| 1.3. Paramètres biochimiques..... | 29 |
| 1.4. Evaluation de la stabilité structurale..... | 33 |
| 1.4.1. Distribution de la taille des agrégats..... | 33 |
| 1.4.2. Analyse du diamètre moyen pondéral (MWD)..... | 35 |
| 2. Les paramètres influençant la stabilité structurale | 41 |
| 2.1. Test d'humectation rapide (MWD _{HR})..... | 41 |
| 2.2. Test d'humectation lente (MWD _{HL})..... | 49 |
| 2.3. Test de désagrégation mécanique (MWD _{DM})..... | 51 |
| 2.4. Moyenne des trois tests (MWD _{MOY})..... | 55 |
| 3. Réalisation de régressions multiples pour la construction des fonctions de pédotransfert .. | 59 |
| 3.1. Régressions multiples pour le test à l'humectation rapide..... | 59 |
| 3.2. Régressions multiples pour le test à l'humectation lente..... | 62 |
| 3.3. Régressions multiples pour le test de désagrégation mécanique..... | 65 |
| 3.4. Régressions multiples pour la moyenne des trois tests..... | 69 |
| 4. Discussion générale | 73 |
| CONCLUSION GENERALE | 78 |

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

- Liste des tableaux -

Pages

| | |
|--|----|
| Tableau I. Les principaux mécanismes de désagrégation de la stabilité du sol (Le Bissonnais et Le Souder, 1995)..... | 3 |
| Tableau II. Différentes méthodes d'évaluation de la stabilité structurale (Annabi, 2005)..... | 9 |
| Tableau III. Moyennes mensuelles et annuelles des précipitations (P, mm) (ONM, 2006)..... | 19 |
| Tableau IV. Températures moyennes mensuelles et annuelles (T, °C) (ONM, 2006)..... | 20 |
| Tableau V. Répartition des sols selon la classification CPCS (1967)..... | 20 |
| Tableau VI. Classes de stabilité en fonction des valeurs du diamètre moyen pondéré (MWD) (Le Bissonnais et Le Souder, 1995)..... | 23 |
| Tableau VII. Les étapes de fractionnement de la matière organiques..... | 24 |
| Tableau VIII. Caractéristiques chimiques des échantillons..... | 26 |
| Tableau IX. Caractéristiques chimiques des échantillons par classe de sol..... | 26 |
| Tableau X. Caractéristiques physiques des échantillons..... | 27 |
| Tableau XI. Caractéristiques physiques des échantillons par classe de sol..... | 28 |
| Tableau XII. Caractéristiques biochimiques des échantillons..... | 29 |
| Tableau XIII. Caractéristiques biochimiques des échantillons par classe de sol..... | 30 |
| Tableau XIV. Caractéristiques des polysaccharides et les différents rapports des échantillons..... | 31 |
| Tableau XV. Caractéristiques des polysaccharides et des différents rapports par classe de sol..... | 32 |
| Tableau XVI. Variabilité des caractéristiques du MWD des échantillons..... | 35 |
| Tableau XVII. Variabilité des caractéristiques du MWD par classe de sol..... | 36 |
| Tableau XVIII. Coefficients de corrélations linéaires (r) entre les variables du sol et le MWD..... | 42 |
| Tableau XIX. Régressions multiples pour le test à l'humectation rapide (HR)..... | 59 |
| Tableau XX. Validation des hypothèses stochastiques et structurelles pour le test d'humectation rapide..... | 59 |
| Tableau XXI. Synthèse de la régression pour le test d'humectation rapide..... | 60 |
| Tableau XXII. Analyse de la variance pour le test d'humectation rapide..... | 60 |
| Tableau XXIII. Valeurs vraies et valeurs prévues du test d'humectation rapide..... | 61 |
| Tableau XXIV. Analyse de la variance entre MWD_{HR} et $MWD_{HREstim}$ | 61 |
| Tableau XXV. Régressions multiples pour le test à l'humectation lente (HL)..... | 62 |
| Tableau XXVI. Validation des hypothèses stochastiques et structurelles pour le test à l'humectation lente..... | 62 |
| Tableau XXVII. Synthèse de la régression pour le test d'humectation lente (HL)..... | 63 |
| Tableau XXVIII. Analyse de la variance pour le test d'humectation lente (HL)..... | 63 |
| Tableau XXIX. Valeurs vraies et valeurs prévues du test d'humectation lente..... | 64 |

| | |
|--|----|
| Tableau XXX. Régressions multiples pour le test de désagrégation mécanique..... | 65 |
| Tableau XXXI. Validation des hypothèses stochastiques et structurale pour le test de désagrégation mécanique..... | 65 |
| Tableau XXXII. Synthèse de la régression pour le test de désagrégation mécanique..... | 66 |
| Tableau XXXIII. Analyse de la variance pour le test de désagrégation mécanique..... | 67 |
| Tableau XXXIV. Les valeurs vraies et valeurs prévues pour le test de désagrégation mécanique avant l'ajustement..... | 67 |
| Tableau XXXV. Les valeurs vraies et valeurs prévues pour le test de désagrégation mécanique après l'ajustement | 68 |
| Tableau XXXVI. Régressions multiples pour la moyenne des trois tests..... | 69 |
| Tableau XXXVII. Synthèse de la régression pour la moyenne des trois tests..... | 69 |
| Tableau XXXVIII. Synthèse de la régression pour la moyenne des trois tests après réestimation du modèle grâce aux variables corrigées de l'autocorrélation..... | 69 |
| Tableau XXXVIX. Validation des hypothèses stochastiques et structurale pour la moyenne des trois tests..... | 70 |
| Tableau XL. Analyse de la variance pour la moyenne synthétique..... | 71 |
| Tableau XLI. Les valeurs vraies et valeurs prévues pour la moyenne des trois tests..... | 72 |

- Liste des figures -

| | <i>Pages</i> |
|---|--------------|
| Figure 1. Les mécanismes de désagrégation (Le Bissonnais, 1996a)..... | 5 |
| Figure 2. Formation d'une croûte de battance (Y. Le Bissonnais et <i>al.</i> , 2002)..... | 5 |
| Figure 3. Différentes phases de la dégradation structurale de la surface du sol sous l'action des pluies (adapté de Boiffin, 1984 et de Le Souder, 1990 in Annabi, 2005)..... | 6 |
| Figure 4. Stabilité structurale et sa relation avec les propriétés liées aux constituants organo-minéraux (C. Legout, 2006)..... | 11 |
| Figure 5. Le modèle conceptuel de Monnier (1965 in Abivan, 2009)..... | 12 |
| Figure 6. Structuration d'un macro-agrégat selon le modèle hiérarchique (adapté de Jastrow et Miller, 1997 in Abiven, 2004)..... | 13 |
| Figure 7. Schéma d'organisation hiérarchique de la structure des sols de Tisdall et Oades (1982 in Calvet, 2003)..... | 14 |
| Figure 8. Modèle conceptuel du turn-over des micro-agrégats (adapté de Golchin et <i>al.</i> , 1994)..... | 15 |
| Figure 9. Localisation des prélèvements (extrait de la carte des sols au 1/50000 établie par Ecrement, 1971)..... | 21 |
| Figure 10. Textures des sols étudiés (USDA)..... | 29 |
| Figure 11. Distribution moyenne de la taille des particules après humectation rapide..... | 33 |
| Figure 12. Distribution moyenne de la taille des particules après humectation lente..... | 34 |
| Figure 13. Distribution moyenne de la taille des particules après désagrégation mécanique..... | 35 |
| Figure 14. MWD des différents types de sols pour le test humectation rapide..... | 37 |
| Figure 15. MWD des différents types de sols pour le test humectation lente..... | 38 |
| Figure 16. MWD des différents types de sols pour le test désagrégation mécanique..... | 39 |
| Figure 17. La moyenne des trois tests (MWD _{MOY}) pour les différents types de sols..... | 40 |
| Figure 18. Relation MWD _{HR} - Calcaire total..... | 41 |
| Figure 19. Relation MWD _{HR} - Sable..... | 43 |
| Figure 20. Relation MWD _{HR} - Taux de matière organique..... | 43 |
| Figure 21. Relation MWD _{HR} - Taux de matière liée..... | 44 |
| Figure 22. Relation MWD _{HR} - Taux de matière légère..... | 44 |
| Figure 23. Relation MWD _{HR} - Taux des acides fulviques libres..... | 45 |
| Figure 24. Relation MWD _{HR} - Taux des substances humiques (Pyrophosphate de sodium)..... | 45 |
| Figure 25. Relation MWD _{HR} - Taux des acides humiques (Pyrophosphate de sodium)..... | 45 |
| Figure 26. Relation MWD _{HR} - Taux des substances humiques (Soude)..... | 46 |
| Figure 27. Relation MWD _{HR} - Taux des acides humiques (Soude)..... | 46 |

| | |
|--|----|
| Figure 28. Relation MWD _{HR} - Taux des substances humiques (Pyrophosphate de sodium et la soude)..... | 47 |
| Figure 29. Relation MWD _{HR} - Taux des acides fulviques..... | 47 |
| Figure 30. Relation MWD _{HR} - Taux des acides humiques..... | 47 |
| Figure 31. Relation MWD _{HR} - Taux d'humine..... | 48 |
| Figure 32. Relation MWD _{HL} - Polysaccharides (‰)..... | 49 |
| Figure 33. Relation MWD _{HL} - Argile (%)..... | 50 |
| Figure 34. Relation MWD _{DM} - Calcaire total (%)..... | 51 |
| Figure 35. Relation MWD _{DM} - CEC (Cmoles/kg de terre)..... | 52 |
| Figure 36. Relation MWD _{DM} - Ca+Mg (Cmoles/kg de terre)..... | 52 |
| Figure 37. Relation MWD _{DM} - Argile (%)..... | 53 |
| Figure 38. Relation MWD _{DM} - Sable (%)..... | 53 |
| Figure 39. Relation MWD _{DM} - Taux de matière organique..... | 54 |
| Figure 40. Relation MWD _{DM} - Taux de matière liée..... | 54 |
| Figure 41. Relation MWD _{MOY} - Calcaire total..... | 55 |
| Figure 42. Relation MWD _{MOY} - Argile (%)..... | 55 |
| Figure 43. Relation MWD _{MOY} - Sable (%)..... | 56 |
| Figure 44. Relation MWD _{MOY} - Taux de matière organique (%)..... | 56 |
| Figure 45. Relation MWD _{MOY} - Taux de matière liée (‰)..... | 56 |
| Figure 46. Relation MWD _{MOY} - Taux des acides fulviques..... | 57 |
| Figure 47. Relation MWD _{MOY} - Taux des substances humiques (Pyrophosphate de sodium et la soude) ... | 57 |
| Figure 48. Relation MWD _{MOY} - Taux des substances humiques (La soude)..... | 57 |
| Figure 49. Relation MWD _{MOY} - Taux d'humine..... | 58 |
| Figure 50. Valeurs vraies et valeurs prévues pour le test d'humectation rapide..... | 61 |
| Figure 51. Valeurs vraies et valeurs prévues pour le test d'humectation lente..... | 64 |
| Figure 52. Valeurs vraies et valeurs prévues pour le test désagrégation mécanique avant l'ajustement..... | 67 |
| Figure 53. Valeurs vraies et valeurs prévues pour le test désagrégation mécanique après ajustement..... | 68 |
| Figure 54. Valeurs vraies et valeurs prévues pour la moyenne des trois tests..... | 71 |
| Figure 55. Schéma représentatif de la stabilisation des agrégats du sol par les agents agrégeants au cours des différents traitement de désagrégation (HL, HR, DR) et la moyenne des trois tests..... | 76 |

Résumé

L'objectif principal de ce travail est l'évaluation de la stabilité structurale des sols de la plaine de la Mitidja Ouest. Il s'agit, dans un premier temps, de faire une caractérisation générale sur l'ensemble des données obtenues (statistiques descriptives).

La deuxième partie de cette étude consiste à faire ressortir les relations entre les valeurs de la stabilité structurale (MWD) mesurée selon la procédure proposée par Le Bissonais (1996) et les différentes caractéristiques du sol (physico-chimique et biochimique).

La stabilité structurale montre une relation, en fonction du test utilisé, plus ou moins marquée avec les différents paramètres du sol. La matière organique est particulièrement corrélée avec la stabilité structurale pour le test à l'humectation rapide. La concentration en polysaccharides est particulièrement corrélée avec la stabilité structurale pour le test à l'humectation lente. L'effet maximum de l'argile est observé avec le test de désagrégation mécanique.

Dans la dernière partie, nous proposons des modèles de prédiction de la stabilité structurale pour les trois tests à partir des caractéristiques du sol. Ces modèles prennent en comptes la matière organique, le calcaire total, l'argile et les concentrations en polysaccharides.

Mots clés: stabilité structurale, matière organique, calcaire total, argile, polysaccharides et régressions.

Abstract

The main objective of this work is to evaluate the structural stability of West Mitidja's plain soils. It is about; firstly, to make a general characterization on the set of the data obtained (descriptive statistics).

The second part of this study consists in establishing the relationship between the values of structural stability (MWD) measured according to the procedure proposed by Le Bissonais (1996) and the different soil characteristics (physico-chemical and biochemical).

The structural stability shows a relation, according to the used test, more or less marked with the different parameters of soil. The organic matter is especially correlated with the structural stability for the test to the fast humectation. The concentration in polysaccharides is especially correlated with the structural stability for the test to the slow humectation. The maximum effect of the clay is observed with the mechanical disaggregation test.

In the last part, we propose models of prediction of the structural stability for the three tests from soil characteristics. These models take in accounts the organic matter, the total calcareous, the clay and the concentrations in polysaccharides.

Keywords: structural stability, organic matter, total calcareous, clay, polysaccharides and regressions.

ملخص

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تقييم الاستقرار البنيوي لأراضي سهل متيجة الغربي. قمنا أولاً، بلجراء وصف عام لجميع البيانات التي تم الحصول عليها (الإحصاء الوصفي).

في الجزء الثاني من هذه الدراسة تطرقنا إلى تحديد العلاقة بين قيم الاستقرار البنيوي (MWD) التي تقاس حسب المنهجية التي اقترحها Le Bissonais (1996)، وبين الخصائص المختلفة للتربة أي الفيزيائية، الكيميائية والبيوكيميائية.

يبين الاستقرار البنيوي علاقة، وفقاً للاختبار المستخدم لقياس الاستقرار البنيوي، مع مختلف خصائص التربة. و ترتبط المادة العضوية خصوصاً مع الاستقرار البنيوي في الترطيب السريع. تركيز السكريات يرتبط خصوصاً مع الاستقرار البنيوي في الترطيب البطيء. أكبر قدر من التأثير لوحظ مع الطين في اختبار النفخ الميكانيكي.

في الجزء الأخير من هذه الدراسة، نقترح نماذج للتنبؤ بالاستقرار البنيوي للاختبارات الثلاثة من خلال الخصائص المختلفة للتربة. هذه النماذج تأخذ في الاعتبار المواد العضوية، و الكلس الإجمالي والطين وتركيز السكريات.

الكلمات الأساسية: الاستقرار البنيوي، المواد العضوية، الكلس الإجمالي، الطين، السكريات تحليل و تراجعي إحصائي

Introduction

Introduction générale

Il est connu que le sol remplit des fonctions vitales pour les sociétés humaines et les écosystèmes. Malheureusement, cette ressource non renouvelable semble être soumise à des dégradations plus ou moins irréversibles (Chenu, 2006). Parmi les menaces pesant sur cette ressource, on peut citer les processus qui causent sa dégradation par un déplacement du matériau sol, ou bien sa détérioration interne par l'effet des processus physiques, chimiques et/ou biologiques (Concaret, 1967 ; Quantin P. et Zebrowski C., 1993 ; Le Bissonnais et al., 2002 ; Antoni et al., 2006 et Sall, 2010).

En Algérie, il est admis que le sol est menacé aussi bien par les facteurs naturels que par les pratiques liées à l'activité humaine (Heddadj, 1995). Seulement, l'érosion hydrique reste *indéniablement identifiée* comme l'un des processus majeurs de la dégradation des sols (Antoni et al., 2006). Ce phénomène très prononcé affecte la ressource sol touchant près de 12 millions d'hectares, à cause de la régression quantitative et qualitative du couvert végétal (surpâturage, incendie, pratiques culturales inadaptées, etc....) (Mezali, 2003).

Le Bissonnais (1996b) estime que l'érosion hydrique est la résultante de quatre processus à savoir la dispersion physico-chimique, l'éclatement des agrégats par augmentation de la pression interne de l'air emprisonné, la microfissuration et la désagrégation, et l'éclatement sous l'impact des gouttes de pluies. La susceptibilité d'un sol à l'érosion hydrique est souvent déterminée par l'état de sa structure. De nombreux auteurs (Boiffin, 1984 ; Le Bissonnais, 1988 ; Auzet et al., 1990 ; Barthès et Roose, 2001) ont décrits ces processus et expliquèrent que le détachement des particules est essentiellement lié à la stabilité structurale des sols au regard de critères plus dépendants du climat (intensité des pluies, humidité du sol ainsi que l'histoire hydrique du sol).

A cet effet, différentes méthodes d'évaluation de la stabilité des agrégats ont été utilisées (Yoder, 1936 ; Kemper, 1965 ; Kemper et Chepil, 1965 ; Kemper et Rosenau, 1986 ; Angers et Mehuys, 1993). Ces méthodes sont basées en même temps sur un traitement à l'immersion à l'eau, et à un tamisage pendant le traitement. Hénin et al (1958) ont utilisé une méthode basée sur la combinaison de trois traitements : immersion à l'eau sans prétraitement (*Age*), immersion à l'eau du sol prétraité avec l'éthanol (*Aga*) et l'immersion à l'eau du sol prétraité au benzène (*Agb*). De plus, chaque traitement nécessite un tamisage.

Toutefois, il est utile d'indiquer que les tests de stabilité structurale mis au point successivement par Hénin et al. (1958) et par Kemper et Rosenau (1986) ont été à la base de nombreux travaux, et ils servaient de méthodes de références pour porter un jugement sur la stabilité structurale des sols pendant de longues années. Amézketa (1999) estime que le principe de ces méthodes tend à expliquer la sensibilité des sols à l'érosion sur la base de l'étude de l'aspect stabilité structurale.

En 1996, Le Bissonnais propose un cadre méthodologique unifié pour la mesure de la stabilité des agrégats du sol incluant les aspects les plus intéressants des méthodes préexistantes. Cette méthode est une modification de celle de Hénin et al. (1958) avec des aspects de Yoder (1936), Grieve (1980), et de Kemper et Rosenau (1986). Elle propose de mesurer le diamètre moyen pondéré (MWD) des agrégats tamisés à l'éthanol après avoir appliqué les trois traitements indépendants suivants : par réhumectation rapide, par réhumectation lente et par agitation mécanique dans l'eau après réhumectation à l'éthanol.

Aussi, l'évaluation de la stabilité structurale des sols vis-à-vis des stress externes est une propriété clé pour le fonctionnement du sol (Le Bissonnais et Le Souder, 1995). Dans le but d'apprécier l'intensification de la dégradation physique des sols, et pour pouvoir prévoir et améliorer cette propriété, il est important de disposer d'un outil *de prévision et/ou de modélisation* (Antoni et al., 2006).

Il est connu que la modélisation consiste en une présentation formalisée d'un phénomène sous forme d'équation (modèle) dont les variables sont par exemple des mesures agronomiques (Denis et Ritz, 2005). En effet, le modèle a pour objectif de présenter les traits les plus marquants d'une réalité qu'il cherche à styliser, il est donc l'outil que le modélisateur utilise lorsqu'il cherche à comprendre et à expliquer des phénomènes. Pour ce faire, il émet des hypothèses et explicite des relations. Autrement dit, c'est une présentation schématique et partielle d'une réalité naturellement plus complexe (Bourbonnais, 1998 ; Matta et al. ,2009).

La difficulté de la modélisation consiste dans le fait de ne retenir que la ou les représentations intéressantes pour le problème que le modélisateur cherche à expliciter. Ce choix dépend de la nature du problème et du type de décision ou de l'étude à effectuer. La même réalité peut ainsi être formalisée de diverses manières en fonction des objectifs (Toutain et Bousquet-Mélou, 2007).

Le présent travail a pour objectif principal de développer des modèles prédictifs de la stabilité structurale des sols en fonction des caractéristiques pédologiques et les différentes fractions de la matière organiques du sol. Ainsi deux principales étapes ressortent :

- identifier les paramètres pédologiques susceptibles d'avoir un effet sur les variations de la stabilité structurale ;
- utiliser les caractéristiques pédologiques en tant que critère de prévision d'un niveau général de la stabilité structurale et de développer des fonctions de pédotransfert prédictives, par la méthode de régression pas à pas ascendante et comme variable de sortie, indépendamment du temps, la stabilité structurale des sols. L'objectif est donc de développer des modèles prédictifs de la stabilité structurale pour chaque test à coupe instantanée et en fonction des différentes caractéristiques du sol.

Les sols qui font l'objet de cette étude sont les sols de la plaine de la Mitidja Ouest d'Algérie. Le choix de cette zone d'étude repose sur l'importance et l'implication de certains facteurs qui ont contribué au devenir de cette plaine. Cette dernière est classée comme *à très haut potentiel agricole*. Il est généralement fait référence au climat, au sol et à l'histoire (Messahel et Benhafid, 2008).

Le présent document est structuré en trois chapitres. Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique relative à la stabilité structurale et aux différents paramètres qui l'influencent. Le deuxième chapitre porte sur la méthodologie adoptée et les différentes approches choisies pour la réalisation de ce travail. Dans le troisième chapitre, les résultats obtenus sont présentés et discutés.

Synthèse
Bibliographique

Chapitre I. Synthèse bibliographique

1. Généralités sur la stabilité structurale

La structure du sol n'est pas nécessairement permanente, elle peut se modifier en fonction de diverses circonstances (pluie, vent, tassement par les engins et piétinement par les animaux...).

Ainsi, la stabilité de la structure exprime l'intensité de la résistance opposée par les agrégats d'un sol aux agents qui tendent à les détruire (Kay, 1990).

La stabilité structurale est une caractéristique importante de la structure du sol. Elle est le plus souvent évaluée à l'échelle des agrégats. Cette stabilité peut être appréhendée selon deux approches complémentaires : les facteurs stabilisants qui conditionnent la formation et la stabilité des agrégats et les processus de désagrégation auxquels s'oppose la stabilité (Le Bissonnais, 1996a).

2. Mécanismes de dégradation de la structure

Les mécanismes de dégradation de la structure des sols sont nombreux, le tableau I résume ceux mis en évidence par Le Bissonnais et Le Souder (1995).

Tableau I. Les principaux mécanismes de désagrégation de la stabilité du sol (Le Bissonnais et Le Souder, 1995).

| Mécanismes | Eclatement | Désagrégation mécanique | Désagrégation par gonflement différentiel | Dispersion physico-chimique |
|-------------------------------|---|--|--|--|
| Nature des forces en jeu | Pression interne de l'air piégé lors de l'humectation | Impact des gouttes de pluie | Pression interne par gonflement différentiel de l'argile | Réduction des forces d'attraction entre les particules |
| Intensité de la désagrégation | Totale | Cumulative | Partielle | Totale |
| Propriétés du sol en jeu | Porosité Mouillabilité Cohésion interne | Cohésion humide (Argile, MO, oxydes) | Gonflement différentiel cohésion, conditions d'humectation | Statut ionique, minéralogie de l'argile |
| Particules résultantes | Petits microagrégats (<500µm) | Particules élémentaires et microagrégats | Macro et microagrégats | Particules élémentaires |

2.1. Eclatement

L'immersion de l'eau et la réhumectation rapide des agrégats secs provoquent leur éclatement (Yoder, 1936 ; Hénin *et al.*, 1958 ; Emerson, 1967). Il se produit avec ou sans agitation, bien que celle-ci augmente la désagrégation.

Selon Le Bissonnais (1996a), l'intensité de l'éclatement correspondant à la désagrégation par compression de l'air piégé lors de l'humectation (figure 1). Les sols argileux sont donc moins sujets à l'éclatement du fait de leur porosité réduite et aussi parce qu'ils retiennent plus d'humidité pour une contrainte hydrique donnée.

Ce phénomène produit des particules élémentaires et des micro-agrégats de petite taille (< 500µm). Un éclatement partiel peut intervenir lorsque les agrégats sont partiellement saturés ou que la vitesse d'humectation est lente, dans ce cas, les particules produites sont plus grossières.

Hénin (1976), a proposé un modèle pour expliquer le mécanisme d'éclatement. L'eau pénètre dans les pores capillaires en débutant par les plus gros ; elle exerce une pression (Pa) sur l'air qui s'y trouvait. La rupture du capillaire se produit lorsque la pression de l'air (Pa) est supérieure à la cohésion de l'agrégat (C).

$$P_a = \frac{2\Theta \cos a}{R}$$

Avec: P_a : pression à l'intérieure du capillaire (atmosphère),
 a : indice
 Θ : la tension superficielle de l'eau (75 dyne/cm à 20°C),
 a : l'angle de raccordement sol-eau (0°) et
 R : le rayon des capillaires les plus gros (cm).

La stabilité structurale persistera tant que $C - P_a > 0$.

2.2. Gonflement différentiel

Le gonflement différentiel intervient suite à l'humectation de la surface des agrégats, entraînant leur fissuration (Boiffin, 1984). L'importance de ce mécanisme dépend en grande partie de la teneur en argile des sols (figure 1). Ce processus ne se distingue pas du phénomène de l'éclatement précédent par la nature du mécanisme intervenant, qui est toujours l'éclatement, mais par l'intensité plus faible de son action.

Dans les sols très argileux, la structure naturelle mécanique apparaît à la dessiccation par la formation de fentes de retrait. Au moment de la réhumectation, celles-ci se referment sans cesser d'exister. Elles pourront s'ouvrir au même endroit à la sécheresse suivante, la matière organique peut réduire ces processus de gonflement (Chamayou et legros, 1989).

Hénin (1976) a démontré qu'il y a une corrélation entre la nature des cations échangeables et le délitement des agglomérats terreux. Les terres ayant fixé Li^{3+} , gonflant beaucoup plus que les terres ayant fixé Fe^{3+} , cependant, il y a une contradiction flagrante entre la stabilité des agrégats et le gonflement, il faudrait en effet que les tests utilisés soient suffisamment précis sur de gros agrégats ayant tendance à être fissurés contrairement aux petits qui ne le sont que peu ou pas.

2.3. Dispersion physico-chimique

Elle correspond à la réduction des forces d'attraction entre particules colloïdales lors de l'humectation, dépend essentiellement de la taille et de la valence des cations particulièrement du sodium (Emerson, 1967 ; Keren et Ben-Hur, 2003 ; Blume et al., 2005), pouvant lier les charges négatives dans le sol. C'est le mécanisme de désagrégation le plus efficace, car il concerne les particules élémentaires et décuple les autres mécanismes (Bresson et Boiffin, 1990).

2.4. Désagrégation mécanique

L'impact des gouttes de pluie sur le sol peut briser les mottes ou les agrégats et projeter les particules sur des distances plus ou moins longues (figure 1). L'efficacité d'une pluie est liée à l'énergie cinétique des gouttes d'eau qui ne sont plus absorbées mais transformées en force de cisaillement, elle même fonction de la vitesse et de la masse des gouttes. Celle-ci n'est pas directement connue, elle est difficile à évaluer, de ce fait on a recours à des formules empiriques pour la déterminer (Boardman, 1998).

Le défrichement des sols provoque également la dégradation de la structure. D'après Roose (1984), les méthodes mécaniques de défrichement entraînent souvent une dégradation des terres car elles seront privées du stock organique, en effet, les couches superficielles les plus riches en nutriments et en organismes vivants sont décapées, exposant alors la terre au soleil et à la battance des pluies, la désagrégation mécanique peut aussi être provoquée par le passage d'outil de travail du sol.

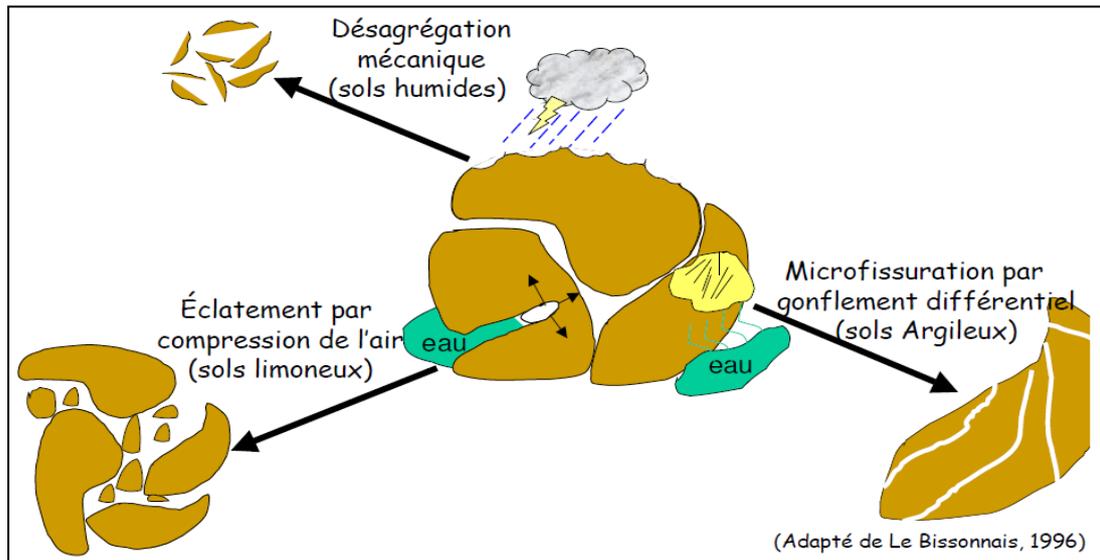


Figure 1. Les mécanismes de désagrégation (Le Bissonnais, 1996a).

3. Conséquences de la désagrégation

3.1. Formation de croûtes de battance

La destruction de la structure d'un sol ou sa désagrégation se traduit par une perte de porosité, de perméabilité, par une prise en masse, et par un état de dispersion, aboutissant à la formation d'une pellicule ou d'une mince couche superficielle, continue et consistante à la surface du sol, dite croûte de battance (figure 2).

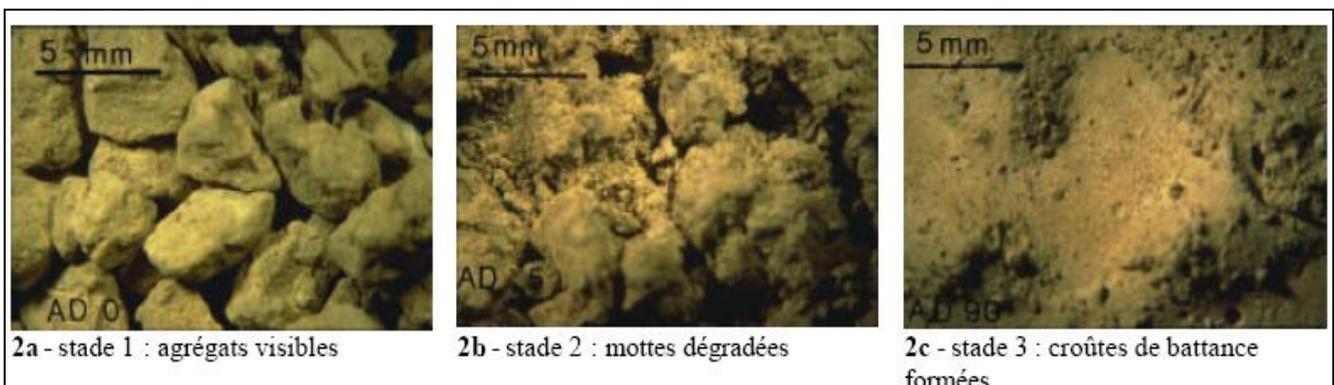


Figure 2. Formation d'une croûte de battance (Le Bissonnais et al., 2002).

La croûte de battance se forme sous l'action des pluies. Elle est le résultat de la désagrégation de la surface du sol. A partir de l'état fragmentaire résultant des opérations de travail du sol et de semis, elle se forme progressivement en passant par plusieurs étapes caractéristiques (Boiffin, 1984).

Selon Casenave et Valentin (1988), Fies et Panini (1995) et par Leonard et al. (2006), la croûte de battance se forme en deux étapes :

Au cours de la première étape, les agrégats initialement présents à la surface du sol et les particules de terre détachées et projetées à partir de ces agrégats initiaux, sont réorganisés de manière a

comblent les espaces laissés par la porosité de la surface. Ils forment progressivement une couche continue à la surface du lit de semence de porosité réduite. Cette croûte dite structurale conserve la même organisation texturale que les agrégats initiaux. Au fur et à mesure de la dégradation, les interstices se remplissent et la densité augmente sous l'impact des gouttes de pluie.

Dans une seconde étape, la perméabilité de la surface diminue, des conditions d'excès d'eau finissent par apparaître à la surface du sol. Elles entraînent un déplacement et un tri granulométrique des particules qui se déposent ensuite à la surface du sol au moment du ressuyage de la surface pour former une croûte sédimentaire (figure 3).

En réduisant l'infiltration de l'eau dans le sol, les croûtes de battance favorisent le ruissellement de l'eau à la surface du sol qui conduit à l'érosion hydrique (Boiffin, 1984).

| | |
|---|--|
| <p>Etat initial</p>  | <p>Morphologie de la surface du sol :</p> <ul style="list-style-type: none"> - état fragmentaire, hétérogène |
| <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">Croûte structurale</p>  <p style="text-align: center;">↓</p> | <p>Morphologie de la surface du sol :</p> <ul style="list-style-type: none"> - apparition de plaques continues et extension de ces plaques - incorporation à la croûte de fragments de taille croissante - diminution de l'infiltrabilité - diminution de la rugosité <p>Processus :</p> <ul style="list-style-type: none"> - détachement des particules solides selon trois modalités (éclatement, désagrégation mécanique et microfissuration) - déplacement des particules - colmatage des interstices de surface - tassement de la surface sous l'impact des gouttes d'eau <p>Facteurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> - agressivité des pluies (énergie cinétique, intensité) - stabilité structurale du sol, teneurs en argile et en matière organique - histoire hydrique du sol - taille et état hydrique des agrégats à la surface du sol |
| <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">Croûte sédimentaire</p>  | <p>Morphologie de la surface du sol :</p> <ul style="list-style-type: none"> - apparition et développement de croûtes stratifiées. - signes importants de dispersion, avec ségrégation des particules <p>Processus :</p> <ul style="list-style-type: none"> - détachements des particules solides - déplacement en phase liquide, opérant ainsi un tri granulométrique <p>Facteurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> - identiques à ceux de la formation de la croûte structurale |

Figure 3. Différentes phases de la dégradation structurale de la surface du sol sous l'action des pluies (adapté de Boiffin, 1984 et de Le Souder, 1990 in Annabi, 2005).

La surface du sol a alors un aspect lisse et glacé. La nature et l'intensité de cette évolution dépendent de nombreux facteurs (Le Bissonnais, 1988 ; Le Bissonnais et Gascuel-Oudou, 1998) :

- l'énergie des gouttes de pluies, conditionnée par la masse et la vitesse de leur chute et par le potentiel hydrique à la surface du sol,
- le taux de couverture du sol par les plantes qui ralentissent l'impact des gouttes de pluie en les interceptant,
- la stabilité structurale des agrégats de la surface du sol, qui dépend de plusieurs caractéristiques intrinsèques du sol (teneurs en argiles, en carbone organique...),

La formation d'une croûte de battance a des conséquences négatives sur le sol et sur les cultures. En effet, elle peut causer des nuisances sur plusieurs plans :

- chimique et biologique : en réduisant l'aération du sol (Rathore et *al.*, 1982), cela peut conduire à un ralentissement de la germination ou à la mort par hypoxie des graines (Richard, 1988),
- physique : en gênant ou empêchant l'émergence des plantules (Guerif, 1988).

3.2. Erosion

L'érosion résulte de la dégradation des couches superficielles de la couverture pédologique et du déplacement des matériaux. Ce processus généré sous l'action d'agents climatiques naturels (eau, vent, rivières, glaciers) est souvent renforcé par les pressions anthropiques exercées sur les sols (intensification de l'agriculture, surpâturage, déforestation, culture à faible recouvrement, artificialisation et imperméabilisation des surfaces).

L'érosion hydrique due à l'eau est la plus visible et la plus étudiée du fait qu'elle a un impact fort sur la qualité des eaux, l'envasement des barrages ou des fossés, ... (Le Bissonnais et *al.*, 2002).

L'étude de la stabilité de la structure prend de l'importance, puisque les stress externes les plus importants (la pluie, le vent, l'irrigation, les pratiques culturales) ont un impact sur les macro-agrégats. Ainsi, l'étude des agrégats de taille millimétriques devient importante du fait de leur grande sensibilité au mode d'occupation du sol. La désagrégation à cette échelle est responsable de la formation de la croûte de battance, du ruissellement et de l'érosion. Donc la réduction de la vitesse d'infiltration de l'eau dans les sols est associée à l'instabilité de la structure (Concaret, 1967).

En effet, la rupture de la structure est responsable de la production de micro-agrégats et de particules qui sont facilement transportés par le *splash* et l'érosion hydrique (Le Bissonnais, 1996b; Leguedois et Bissonnais, 2004).

Amézketa (1999), considère que pour une caractérisation complète de l'agrégation du sol, la structure et sa stabilité doivent être analysées au niveau des macro et micro-agrégats (> ou < 250 μm) car leur stabilité dépend de leur dimensions et répondent alors différemment aux conditions environnementales et aux pratiques culturales. Par ailleurs, les macro-agrégats stables séquestrent plus de carbone que les micro-agrégats ou les macro-agrégats instables (Elliot, 1986 ; Cambardella et Elliot, 1993; Puget et *al.*, 1995). Cette échelle du macro-agrégat est donc plus sensible à la désagrégation mais néanmoins très importante dans la hiérarchie de la structure du sol.

Dans le cas de l'érosion hydrique, les principaux mécanismes de détachement sont la désagrégation par éclatement, fissuration ou dispersion, et l'arrachement de particules par les gouttes de pluie et les eaux de ruissellement.

D'après Yoder (1936) et Hénin et *al.* (1958), l'éclatement résulte de la pression de l'air piégé dans les agrégats humectés brutalement, la fissuration résulte de leur gonflement différentiel, et la dispersion, de la réduction des forces de cohésion entre particules humectées (Le Bissonnais, 1996a). Généralement, c'est l'énergie cinétique des gouttes de pluie et des eaux de ruissellement qui explique l'arrachement et le transport (Roose, 1977 ; Casenave et Valentin, 1988). Les contraintes physiques de la stabilité structurale des agrégats déterminent leur sensibilité à l'érosion (Le Bissonnais, 1996b).

4. Différentes méthodes d'évaluation de la stabilité structurale

Les méthodes les plus utilisées pour expliquer la sensibilité des sols à l'érosion par leur stabilité structurale, sont celles qui déterminent la distribution de la taille des agrégats après l'application d'un stress à l'eau, mécanique ou les deux (Amézketa, 1999). A cette effet, différentes méthodes d'évaluation de la stabilité des agrégats on été utilisées depuis 1930 (tableau II).

Initialement, des méthodes multi-tamis on été utilisées pour la détermination de la stabilité structurale. Mais Kemper et Rosenau (1986) ont montré que les résultats obtenus avec un seul tamis étaient aussi bien corrélés avec les données en plein champ, que les méthodes multi-tamis. L'avantage des méthodes à un seul tamis est leur simplicité et donc la possibilité de traiter un grand nombre d'échantillons en peu de temps.

C'est ainsi que la méthode de Kemper Rosenau (1986) est devenue la méthode la plus utilisée pour l'évaluation de la stabilité de la structure (Amézketa, 1999). Même en utilisant cette dernière, les résultats pouvaient être affectés par des variations. La principale limite de cette méthode est l'impossibilité de distinguer entre différents mécanismes de désagrégation.

Selon Cosentino (2006), le test de stabilité structurale mis au point par Hénin et *al.* (1958) a été à la base à de nombreux travaux, et servait de méthode de référence pour porter un jugement sur la stabilité structurale des sols. Cette méthode n'est plus utilisée aujourd'hui dans les laboratoires (abandon du benzène comme prétraitement, développement de recherches montrant la nécessité de faire évoluer ce test).

Le Bissonnais (1996) a proposé une méthode pour la mesure de la stabilité des agrégats des sols incluant les aspects les plus intéressants des méthodes préexistantes. Celle-ci constitue une modification de celle de Hénin et *al.* (1958) avec quelques aspects relevant des méthodes de Yoder (1936), Kemper et Rosenau (1986) et autres.

Ainsi, le principe de la méthode propose de mesurer le diamètre moyen pondéré (MWD) des agrégats tamisés à l'éthanol après avoir appliqué trois prétraitements indépendants : réhumectation rapide, réhumectation lente et agitation mécanique dans l'eau après réhumectation à l'éthanol.

En raison sa faible tension superficielle et de sa constante diélectrique vis-à-vis de l'eau, l'éthanol évite l'éclatement et le gonflement des agrégats de sol. C'est grâce à cet effet que la méthode peut séparer l'impact des différents mécanismes de désagrégation sur la stabilité de la structure (Amézketa, 1999).

En outre, l'utilisation de l'éthanol empêchera la réagrégation qui se produit pendant le séchage de sols préhumectés à l'eau et permet d'éviter aussi l'implication d'énergie externe.

Tableau II. Différentes méthodes d'évaluation de la stabilité structurale (Annabi, 2005).

| Référence | Echantillons de départ | | Traitement | Expression du résultat | Remarques |
|---|------------------------|----------|--|---|------------------------------------|
| | Taille (mm) | Humidité | | | |
| Yoder (1936) | 3-5 | Sec | Immersion à l'eau, tamisage pendant le traitement | MWD (mm) | |
| Kemper (1965) | 1-2 | Humide | Immersion à l'eau, tamisage pendant le traitement | Proportion d'agrégats stables > 0,20 mm | Correction par rapport aux sables |
| Kemper et Chepil (1965) | <4,7 | Humide | Immersion à l'eau, tamisage pendant le traitement | MWD (mm) | Correction par rapport aux sables |
| Kemper et Rosenau (1986) | 1-2 | Humide | Immersion à l'eau, tamisage pendant le traitement | Proportion d'agrégats stables > 0,25 mm | |
| Angers et Mehuys (1993), cité par Angers et al (1999) | 1-2 | Humide | Immersion à l'eau, tamisage pendant le traitement | Proportion d'agrégats stables > 0,25 mm | Correction par rapport aux sables |
| Hénin et al (1958) | <2 | Sec | -Combine trois traitements : * immersion à l'eau sans prétraitement (Ag _e), * immersion à l'eau du sol prétraité avec l'éthanol (Ag _a), * immersion à l'eau du sol prétraité au benzène (Ag _b). -Tamisage pendant les traitements. | Proportion d'agrégats stables > 0,20 mm | -Correction par rapport aux sables |
| Le Bissonnais (1996) | 3-5 | Sec | -Combine trois traitements : *humectation rapide d'agrégats secs, *humectation d'agrégats prétraités avec l'éthanol, *humectation par capillarité. - Tamisage post-traitement | MWD (mm) | |

5. Facteurs influençant la stabilité structurale

5.1. Texture du sol

Plusieurs auteurs (Monnier, 1984 ; Henin *et al.*, 1958 ; Chamayou et Legros, 1989) ont démontré que les sols limoneux et sableux possèdent une stabilité structurale nettement inférieure à celle des sols argileux. La stabilité structurale augmente avec la teneur en argile, sans toutefois qu'il soit possible d'établir de corrélations significatives généralisables à tous les types de sols (Le Bissonnais, 1996a).

5.2. Minéralogie des argiles

Selon Chamayou et Legros (1989), la nature des argiles influe sur la stabilité structurale puisque contrairement aux argiles 1/1, type Kaolinite, les argiles 2/1 du type montmorillonite ont une surface « d'accrochage » importante qui favorise les liaisons structurales.

5.3. Teneurs en sodium, calcium et autres cations

La nature et la teneur en cations échangeables influencent la stabilité structurale par leur effet sur les processus de dispersion / floculation des argiles. Cette caractéristique est fortement liée à la texture du sol et au type d'argile. Les agglomérats deviennent de moins en moins stables en fonction des cations fixés suivant l'ordre : Ba, Ca, Mg, K, Na (Héning, 1976).

5.4. Oxydes de fer et d'aluminium

Les oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium sont les principaux agents de la formation d'agrégats stables dans les sols riches en ces minéraux (Lamar et Bresson, 1989).

Ces oxydes jouent le rôle de flocculants dans le sol et contribuent ainsi à augmenter la stabilité structurale en servant de "ponts" entre les différentes composantes de la structure. Leur effet est particulièrement efficace, ce comportement a été observé dans les sols tropicaux où les teneurs en argiles sont importantes (Six *et al.*, 2002).

D'après Jamet (1986), la structure des oxydisols est fine et très stable. Même sous culture intensive, malgré les multiples travaux et l'exposition aux intempéries, sa dégradation est limitée et lente. Le fer (et surtout la magnétite) y joue vraisemblablement, avec la matière organique, un rôle important.

Dans ces sols à charges variables, la coexistence de charges positives et négatives provoque des liens de nature électrostatique entre les différents constituants et entre les constituants de même type, contribuant à la stabilité des agrégats. Cette stabilité d'origine électrostatique est dépendante du pH (El swaify et Emerson, 1975).

5.5. Teneur en calcaire et en gypse

Sidi et Pansu (1990) ont montré qu'en associant un apport de matière organique avec du gypse, ce dernier améliore plus nettement l'effet de la matière organique par l'augmentation de la stabilité structurale résultant de l'interaction gypse-matière organique. L'apport du CaCO_3 a un effet favorable sur la stabilité structurale. Cependant, son action n'est significative que lorsque la teneur en argile est suffisante. L'effet du calcaire est principalement dû à l'effet de l'ion Ca^{2+} (Abiven, 2004).

En raison de la grande solubilité du gypse, sa dissolution rapide, libère le Ca^{2+} qui améliore la stabilité structurale du sol. On peut également améliorer la stabilité structurale d'un sol qui n'est pas calcique, en le saturant en Ca^{2+} par un apport de CaO ou CaSO_4 (Chamayou et Legros, 1989).

5.6. Matière organique

La matière organique (MO) a un rôle essentiel dans l'amélioration de la structure du sol. Cette influence est expliquée par le rôle que joue la MO dans les liaisons entre les particules minérales du sol d'une part (Chenu, 1989) et l'hydrophobicité des surfaces des particules minérales d'autre part, ce qui a pour effet de ralentir la vitesse d'humectation des agrégats et donc de réduire l'éclatement (Churchman et Tate, 1987 ; Jouany *et al.*, 1992 ; Le Bissonais et Arrouays, 1997).

D'après Roose (1984), la réduction des apports de résidus végétaux, engendre une détérioration de toutes les propriétés étroitement liées à la matière organique : dégradation de la stabilité structurale, de la capacité d'infiltration, de la macroporosité, augmentation de la densité apparente, de la compaction et de la cohésion des horizons supérieurs (sur 30 à 50 cm). En outre, Marshall et Holmes (1988) rapportent que sur 500 sols étudiés, on remarque qu'à partir de 2 % de matière organique, la stabilité structurale commence à s'améliorer.

La matière organique influence la stabilité structurale par plusieurs mécanismes. Elle joue le rôle de liant entre les particules et modifie les propriétés hydriques du sol. Certaines études montrent une relation directe entre la teneur en carbone total et la stabilité structurale (Dutartre *et al.*, 1993 ; Le Bissonais *et al.*, 2002). Mais ce n'est pas toujours le cas, ainsi, selon le type de sol (Martens, 2000) ou le test de mesure de la stabilité structurale utilisé (Le Bissonais et Le Souder, 1995 ; Le Bissonais et Arrouays, 1997 ; Chenu *et al.*, 2000), certains auteurs suggèrent que la relation n'est probablement pas linéaire et dépend de la nature des interactions particules de sol et matière organique (Le Bissonais, 1996a).

Baize (1988) et Legout (2006), estiment que les produits élaborés par synthèse microbienne fournissent des ciments dont la fonction structurante est des plus élevée (complexes argilo-humiques) (figure 4).

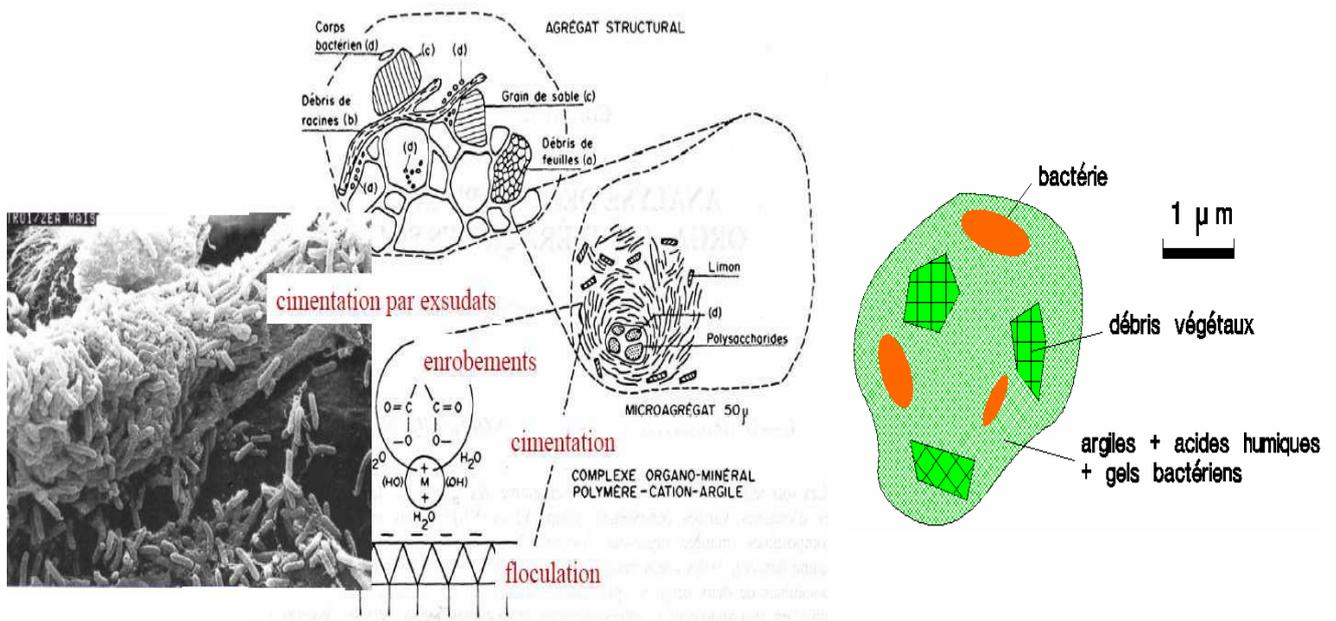


Figure 4. Stabilité structurale et sa relation avec les propriétés liées aux constituants organo-minéraux (Legout, 2006).

6. Matière organique et la stabilité structurale dans le sol

Depuis le début du dernier siècle, de nombreuses études ont mis en évidence les effets favorables des apports organiques sur la stabilité des agrégats du sol. En 1965, Monnier a proposé un modèle conceptuel qui considère les différents modèles d'effets temporels sur la stabilité globale selon la nature des apports organiques (Abiven *et al.*, 2009).

Ce modèle décrit l'effet de différents produits de référence sur la stabilité des agrégats du sol à travers des durées variant de semaines, des mois aux années après l'addition de trois apports organiques (engrais vert, paille enterrée et fumier décomposé) par rapport à la dynamique des facteurs agrégatifs (cadavres microbiens, substances pré humiques et substances humiques). Monnier (1965) a identifié trois périodes (zones A, B et C) au cours desquels les processus agrégatifs majeurs se déroulent (figure 5).

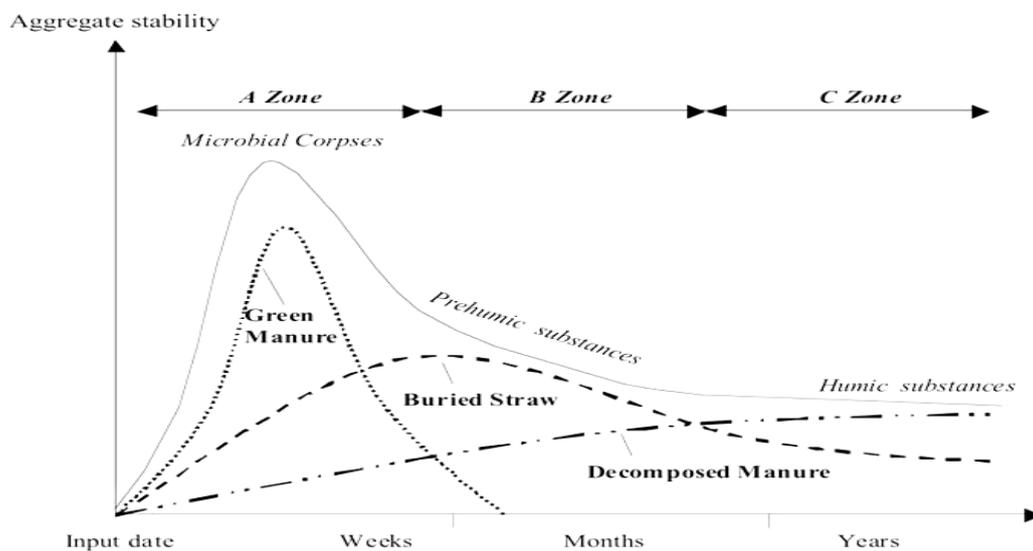


Figure 5. Le modèle conceptuel de Monnier (1965 in Abivan, 2009)

Quelques produits, comme l'engrais vert, avaient des effets intenses durant le premier mois sur la stabilité des agrégats, tandis que moins aisément décomposable, le fumier, avait de faibles effets initiaux, mais relativement important à l'échelle annuelle. Monnier (1965) a proposé qu'à court terme, les effets de la matière organique sur la stabilité des agrégats étaient dus aux cellules et produits microbiens tandis que les effets à long terme résultaient des composés humiques.

En résumé, les produits facilement décomposables ont un effet intense et passager sur la stabilité globale, tandis que les produits dont la biodégradation est lente ont un faible effet instantané mais efficace à plus long terme.

6.1. Rôle de la matière organique du sol sur la formation et la stabilisation des agrégats

Dans un modèle proposé par Tisdall et Oades (1982) pour des sols rouges bruns australiens et qui a été généralisé par la suite, notamment par (Dexter, 1988 ; Kay, 1990 ; Oades et Water, 1991 et par Jastrow et Miller, 1997 cités par Abiven, 2004), la contribution des différentes fractions organiques a été décrite au sein d'un agrégat (figure 6) :

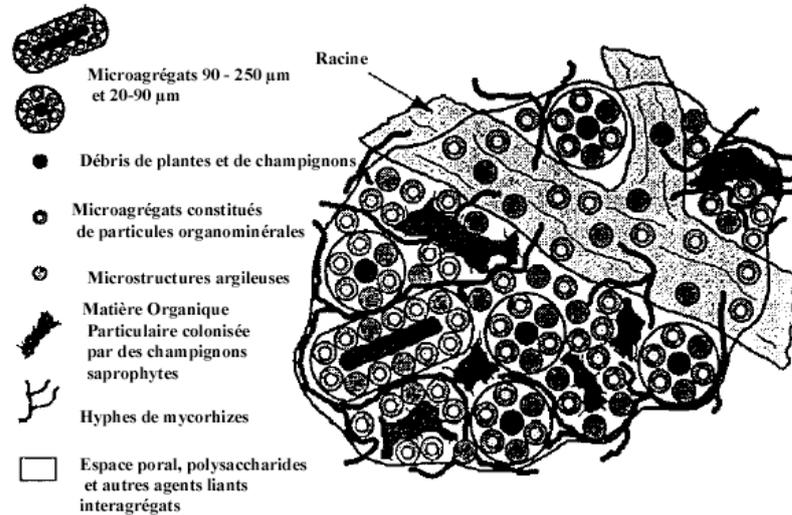


Figure 6. Structuration d'un macro-agrégat selon le modèle hiérarchique (adapté de Jastrow et Miller, 1997 in Abiven ,2004)

- 1- Agents agrégeants *transitoires*, comme par exemple des polysaccharides, qui peuvent être décomposés rapidement par les micro-organismes du sol,
- 2- Agents agrégeants *temporaires*, comme les racines et les hyphes mycéliens,
- 3- Agents agrégeants *persistants*, comme des composés humiques associés à des cations métalliques.

Dans ce modèle, les agents persistants sont associés à la cohésion des micro-agrégats (< 250 µm). Les agents transitoires et temporaires permettraient de regrouper ces micro-agrégats pour former des macro-agrégats (> 250 µm). A chaque taille d'agrégats, est associé un type spécifique de matière organique du sol qui stabilise la structure (figure 7).

Compte tenu du type de liaison des structures entre elles, la stabilité des micro-agrégats est considérée comme très importante (la dispersion par ultrasons est souvent nécessaire pour désagréger ces particules) (Christiensen 1992). En revanche, les macro-agrégats peuvent être désagrégés par des contraintes physiques liées à des pratiques agricoles ou par des pluies.

C'est à cette échelle qu'une grande partie de la qualité physique du sol se joue. L'état structural influe sur l'ensemble des facteurs et des conditions physiques qui conditionnent la germination, la levée des cultures (Richard et Boiffin, 1990) et l'enracinement (Tardieu, 1990).

La désagrégation pouvant déboucher sur la battance et l'érosion se situe aussi à l'échelle du macro-agrégat (Le Bissonnais, 1996b). Cette échelle du macro-agrégat est donc plus sensible à la désagrégation mais néanmoins très importante dans la hiérarchie de la structure du sol.

L'étude de la structure du sol est souvent limitée aux échelles des assemblages des particules élémentaires en agrégats et en mottes (Calvet, 2003). En effet, les particules élémentaires d'un sol peuvent rester individualisées, en raison d'absence de liens entre elles, ou s'assembler en des unités plus grandes relativement cohérentes et plus ou moins fragmentées, appelées agrégats. A chaque taille d'agrégat, est associé un type spécifique de matière organique du sol qui stabilise la structure.

Agents de stabilisation

Matières organiques transitoires et temporaires (racines et hyphes fongiques).

Matières organiques persistantes (débris racinaires et fongiques couverts par les particules inorganiques).

Matières organiques persistantes (débris microbiens et fongiques couverts par les particules inorganiques).

Agents inorganiques permanents. (aluminosilicates amorphes, oxydes et polymères organiques adsorbés sur la surface des argiles, liaison électrostatique, floculation)

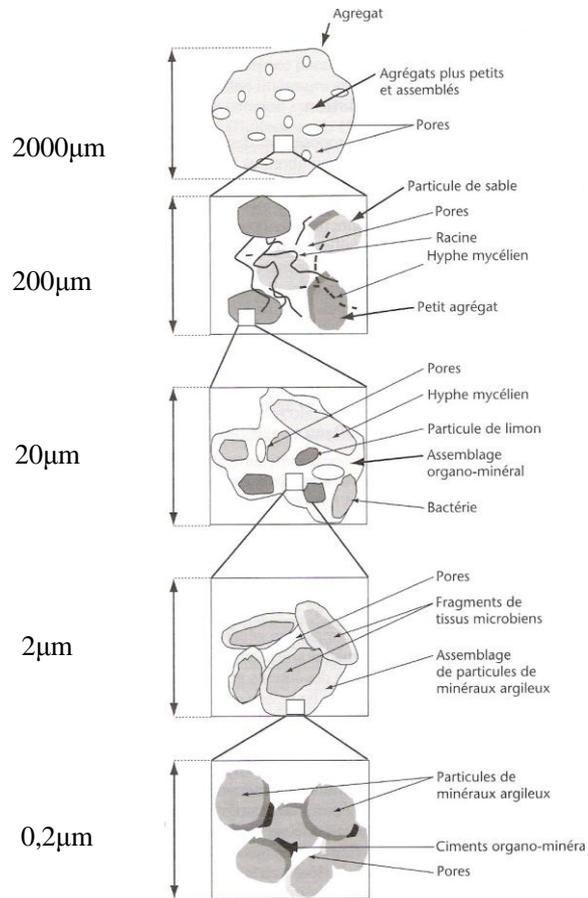


Figure 7. Schéma d'organisation hiérarchique de la structure des sols de Tisdall et Oades (1982 in Calvet, 2003).

Tisdall et Oades (1982) ont proposé un modèle de l'organisation des agrégats (figure 7), qui montre une hiérarchisation des agrégats selon leur taille : les macro-agrégats (>250 µm) sont constitués de micro-agrégats, eux-mêmes résultant de l'assemblage d'unités de tailles inférieures.

D'après Oades (1993), la hiérarchie des agrégats se développerait sous la dépendance des caractéristiques physico-chimiques des sols, ainsi dans les sols riches en argiles, les interactions électrostatiques entre les argiles et les matières organiques favorisent la structuration.

L'apport de matières organiques correspond à l'entrée d'un grand nombre de molécules carbonées dans un sol. Celles-ci peuvent modifier la stabilité structurale soit directement par leurs actions physico-chimiques avec les particules du sol, soit indirectement, au cours de la décomposition de la matière organique apportée par les microorganismes du sol (facteurs biologiques).

L'activité biologique générée par la présence de la matière organique exogène permet de former de nouveaux agrégats et de consolider les agrégats existants. La décomposition de la matière organique induit une augmentation de la biomasse microbienne, le développement d'hyphes mycéliens et la sécrétion de molécules capables d'agréger les particules solides à l'échelle du macro-agrégat (Gaillard *et al.*, 1999).

Une matière organique fraîche, lorsque elle est incorporée au sol devient un noyau pour la formation et la stabilisation des agrégats car elle stimule localement l'activité microbienne et ainsi, les mécanismes agrégeants sont activés (Angers et Chenu, 1998; Golchin *et al.*, 1998 ; Jastrow *et al.*, 1998; Balesdent *et al.*, 2000 ; Six *et al.*, 2002 et par Six *et al.*, 2004 cités par Cosentino, 2006).

Toujours dans le même ordre d'idée, Guckert *et al.*, (1975) proposent une élaboration des unités structurales stables en deux étapes qui peut être mise en parallèle avec le modèle hiérarchique décrit par Tisdall et Oades (1982), où les éléments considérés dans la phase agrégative étaient décrits respectivement comme des agents agrégeant temporaires et transitoires (figure 6).

Une première phase agrégative liée à l'activité des micro-organismes et certains produits de leur métabolisme comme les polysaccharides. La seconde phase de stabilisation principalement caractérisée par une minéralisation partielle des molécules carbonées préalablement formées ainsi qu'une incorporation dans des composés humiques et un renforcement des mécanismes d'adsorption et des liaisons avec les particules minérales (Abiven, 2004).

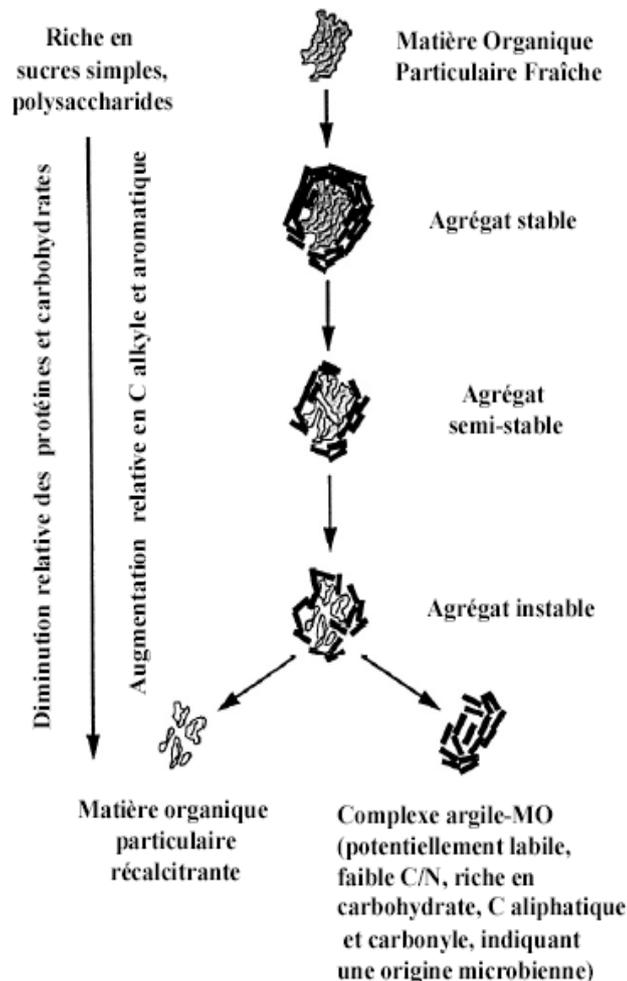


Figure 8. Modèle conceptuel du turn-over des micro-agrégats (adapté de Golchin *et al.*, 1994).

Golchin et *al.*, (1994) expliquèrent ce modèle pour les micro-agrégats (figure 8) en caractérisant la matière organique associée par fractionnement granulométrique. Il apparaissait que la matière organique particulaire incluse à l'intérieur des agrégats, composée de fragments végétaux en cours de décomposition, se trouvait être au centre d'agrégats stables dans un premier temps. Puis, ces agrégats devenaient de moins en moins stables à mesure que la teneur en composés protéiques et en carbohydrates diminuait.

7. Caractéristiques des facteurs agrégeant issus de la décomposition des produits organiques

L'amélioration de la stabilité structurale tient en effet à des points particuliers et qualitatifs de la décomposition de la matière organique.

7.1. Polysaccharides

Selon Cheshire et Haynes (1990), les polysaccharides sont des homopolymères, résultant de la condensation d'un grand nombre de monosaccharides d'origine végétale. Les plus abondants sont la cellulose et les hémicelluloses. Les polysaccharides constituent la forme principale des glucides dans la matière organique en décomposition (Stevenson, 1994).

Les polysaccharides sont considérés comme agents agrégeants et donc favorables à la stabilité de la structure (Acton et *al.*, 1962), toutefois, ils agissent comme des liants de cohésion faible, avec une tendance à s'adsorber aux surfaces minérales grâce à leur réactivité. Ces fonctions hydrophiles permettent d'atténuer l'effet du mécanisme d'éclatement en absorbant une partie de l'eau entrant dans la porosité de l'agrégat, ils établissent aussi des liaisons entre les particules minérales qui dépend de leurs longueurs et du nombre de points de contact qu'ils ont avec les particules de sol (Chenu, 1989 ; Cheshire et *al.*, 2000).

Plusieurs auteurs (Feller et *al.*, 1991 ; Haynes et *al.*, 1991 ; Haynes et Francis, 1993 ; Puget et *al.*, 1995 ; Degens et Sparling, 1996) ont essayé de corréliser les polysaccharides et la stabilité structurale. Les observations obtenues n'étaient pas toujours satisfaisantes. Seulement les polysaccharides extraits à l'eau chaude, correspondant principalement aux polysaccharides extracellulaires des bactéries, des champignons et aux mucilages des racines de caractère microbien sont généralement mieux corrélés à la stabilité structurale que les sucres totaux.

7.2. Composés humiques

Chenu (2003) considère leur présence ou leur abondance comme l'une des qualités des matières organiques. Les mécanismes de formation des composés humiques sont complexes et pas encore bien compris aujourd'hui. (Lichtfouse et *al.*, 1998). De fortes corrélations existent entre les composants des matières organiques (acides humiques) et la stabilité structurale (Chaney et Swift, 1984 ; Capriel et *al.*, 1990).

Selon Martens (2000), ces molécules sont les plus récalcitrantes de la matière organique végétale (lignine, phénoliques). Leur caractère macromoléculaire et leurs propriétés colloïdales assurent la cohésion des particules élémentaires du sol faisant d'eux des matériaux résistants à la dégradation (Mac Carthy et *al.*, 1990). Elles influent sur la fertilité du sol en améliorant sa structure, en augmentant l'activité biologique, la disponibilité des nutriments et en complexant les métaux toxiques (Stevenson, 1985).

Les substances humiques lient les particules du sol sous forme de micro-agrégat, ce qui améliore la stabilité structurale du sol (Balesdent, 1996 ; Chenu, 2003). Leur action est considérée comme plus longue que celle des polysaccharides (Fortun et *al.*, 1989).

Au sein de ces agrégats, la présence de micro-porosités permet de maintenir une structure aérée où l'eau et l'air peuvent circuler. Outre l'aération du sol, la surface d'échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère et sa capacité de rétention d'eau sont augmentées. L'eau pénètre plus facilement dans le sol et limite les risques d'érosion et de compactage (Balesdent, 1996).

Les composés humiques sont majoritairement hydrophobes, ce qui réduit la vitesse d'humectation des agrégats (Chenu et al., 2000).

7.3. Micro-organismes

Les matières organiques jouent un rôle important dans la stabilité structurale des sols (Tisdall et Oades, 1982 ; Lynch et Bragg, 1985 ; Stevenson, 1994). L'efficacité des apports organiques sur l'amélioration de la stabilité structurale est remarquée après leur transformation par les microorganismes du sol (Tisdall, 1996). C'est grâce à la stimulation des micro-organismes que la stabilité de la structure augmente rapidement après apports organiques.

La flore microbienne agissant sur la matière organique incorporée améliore la stabilité structurale à la fois à travers l'action mécanique des hyphes fongiques et des corps bactériens et/ou à travers la synthèse de nouvelles structures moléculaires (Young et Crawford, 2004). En effet, l'agrégation est dominée par des microorganismes (bactéries et champignons) qui exsudent des substances agglutinantes et enrobent la matrice du sol ou par des racines qui lient les agrégats et particules entre eux. Donc, les biomolécules issues de l'activité microbienne jouent un rôle important dans la formation des agrégats stables du sol (Wright et al., 1999 ; Martens, 2002).

Ces composés carbonés, issus de l'activité microbienne du sol, dont les sucres et les lipides, peuvent intervenir dans l'amélioration de la stabilité structurale du sol en interagissant avec les composantes inorganiques du sol (Harris et al., 1966). Dans le sol, des colonies de microorganismes peuvent se mettre en place et créer un réseau capable de stabiliser l'agrégat à l'échelle du millimètre (De Leo et al., 1997 ; Stotzky, 1997).

Selon Chenu (2003), deux types de constituants organiques sont actifs: les colloïdes et les êtres vivants. Les colloïdes organiques, biomolécules produites par les racines, les microorganismes du sol et les substances humiques s'adsorbent sur les particules du sol et les lient entre elles en les rendant moins mouillables. Les champignons filamenteux et les racines retiennent mécaniquement les particules entre leurs filaments. Racines, bactéries, champignons et vers de terre secrètent des polysaccharides qui agrègent les particules minérales entre elles. Même après la mort des microorganismes, les molécules des corps microbiens adsorbées sur la phase minérale continuent à stabiliser la structure (Chantigny et al., 1997).

Les champignons sont souvent majoritaires parmi les micro-organismes de l'horizon labouré (Guillet et al., 2002). Ils peuvent être dominants lors de la décomposition de la cellulose et de la lignine (Disnar et al., 2002). Une partie des composés des hyphes, comme la chitine ou la glomaline, est particulièrement récalcitrante (Zhu et Miller, 2003).

Degens et al., (1996) considèrent que grâce à leurs hyphes, les champignons mycéliens sont un facteur agrégeant à part entière, car ils peuvent relier entre eux un grand nombre de particules dans de larges structures arborescentes, désignées par le terme "*sticky string bags*".

Cependant la relation entre ces facteurs agrégeants et la décomposition globale des matières organiques reste complexe. En effet, la stabilité de la structure est liée à l'activité biologique globale de la décomposition (décomposition quantitative), mais aussi à l'évolution dans le sol de groupes de molécules et de micro-organismes particuliers (décomposition qualitative).

La stabilité structurale apparaît bien corrélée avec la taille de la biomasse microbienne du sol, avec l'abondance des champignons filamenteux, et avec la teneur en polysaccharides (Haynes et *al.*, 1991).

L'effet de chaque facteur reste donc difficile à individualiser, puisque les facteurs sont liés entre eux, car la persistance de l'effet des différents facteurs sur la stabilité structurale est différente. Une autre difficulté pour établir cette relation vient des méthodes d'évaluation de la stabilité structurale elle-même, les résultats pourraient varier selon chacune d'entre elles.

.

*Matériel et
Méthodes*

Chapitre II. Matériel et méthodes

1. Matériel

1.1. Présentation de la région d'étude

Située entre les longitudes est $2^{\circ} 25' 00$ et $3^{\circ} 19' 00$ et les latitudes nord $36^{\circ} 25' 17$ et $36^{\circ} 47' 40$, la Mitidja est une dépression longue d'environ 100 km sur 2 à 20 km de large soit une superficie d'environ 1400 km². Ensermée entre l'Atlas Tellien au sud et une chaîne de collines au nord (le Sahel), elle est d'orientation WSW-ENE. A l'extrême Est, elle est largement ouverte sur la mer sur une trentaine de kilomètres. Dans sa partie Ouest, les collines du Sahel entrent en contact avec le massif montagneux du Chenoua (905 m) et rejoignent, au plateau de Fadjana, les premières hauteurs de l'Atlas (Djebel Thiberrarine au sud, 853 m). A l'ouest, elle est limitée par l'oued Nador et à l'est par l'oued Boudouaou (Mutin, 1977).

1.2. Géomorphologie

Sur le plan géomorphologique, la plaine de la Mitidja présente une relative homogénéité, son contour s'étend du pied de l'Atlas au pied du Sahel, caractérisée principalement par des cônes de déjection, des glacis d'accumulation, des zones d'épandage, des étendues marécageuses et hydromorphes de la basse plaine et la région côtière caractérisée par des matériaux sablo-argileux à sableux, souvent calcaires (Raissi, 1992).

1.3. Réseau hydrographique

La plaine de la Mitidja est traversée du sud au nord par plusieurs oueds nés dans l'Atlas, et qui franchissent le Sahel par des cluses. Les oueds les plus importants sont l'Oued Nador, l'Oued Mazafran, l'Oued El-Harrach, l'Oued Hamiz et l'Oued Reghaia. L'oued Mazafran étant le plus important de la plaine, il est formé par la jonction des oueds Djer-bouroumi et Chiffa. Par ailleurs, les divagations de certains oueds ont créé des cônes de déjection parfois très importants (Raissi, 1992).

1.4. Pédogenèse

Les processus pédogénétiques les plus importants des sols de la Mitidja sont la rubéfaction, la brunification, le lessivage et l'hydromorphie (Raissi, 1992).

1.5. Le climat

Le climat de la Mitidja est de type méditerranéen subhumide, à saisons contrastées. Les informations utilisées concernant les données météorologiques de la station de Dar El Beida (Office National de la Météorologie), ils s'étalent sur une période de 30 ans (1973-2003).

1.5.1. La pluviométrie

La pluviométrie moyenne annuelle est de 645.7 mm, le mois le plus pluvieux est décembre (96.3 mm). Par opposition, le mois de juillet est le mois le plus sec (4.2 mm) (Tableau III).

Tableau III. Moyennes mensuelles et annuelles des précipitations P (mm) (ONM, 2006).

| Mois | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | Année |
|------|------|------|------|------|------|------|----|------|------|-----|-----|-----|-------|
| P | 49,1 | 52,6 | 91,7 | 96,3 | 80,5 | 89,5 | 65 | 57,3 | 40,9 | 9,9 | 4,2 | 8,6 | 645,7 |

1.5.2. Les températures

Les données du tableau IV indiquent que la température moyenne mensuelle la plus basse est celle de janvier avec 10,6 °C et la plus élevée est celle d'août avec 25,4 °C.

Tableau IV. Températures moyennes mensuelles et annuelles T (°C) (ONM, 2006).

| Mois | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|
| T | 23,1 | 19,1 | 14,9 | 11,9 | 10,6 | 11,2 | 12,6 | 14,6 | 17,9 | 21,8 | 24,75 | 25,4 |

1.6. La végétation

Les terres de cette région sont riches et fertiles, et par conséquent favorables à de nombreuses cultures telles que la culture des agrumes, la culture de divers arbres fruitiers, la céréaliculture et le maraîchage en irrigué, et enfin la production fourragère et industrielle (Imache et *al.*, 2006).

1.7. Sols de la région d'étude

La cartographie des sols de la Mitidja au 1/50 000° (Ecrement, 1971) a permis de recenser cinq classes de sols (CPCS, 1967), représentées dans le tableau V :

Tableau V. Répartition des sols selon la classification CPCS (1967).

| Type de sols (CPCS, 1967) | Superficie (ha) | Principales caractéristiques |
|---|-----------------|--|
| Sols peu évolués | 75 000 ha | Non climatique, profil AC, reposant sur un matériau fragmenté très peu altéré |
| Sols à sesquioxyde de fer et de manganèse | 13 500 ha | Représentés par les sols rouges, profil ABC, développés sur matériaux rubéfiés du Soltanien |
| Sols hydromorphes. | 7 000 ha | Occupent la basse plaine de la Mitidja, résulte de la présence d'une nappe permanente à faibles oscillations |
| Vertisols | 6 000 ha | Localisés à l'est et à l'ouest de la plaine, se développent sur les alluvions rharbiennes anciennes |
| Sols calcimagnésiques | 1 500 ha | Rencontrés souvent au pied du Sahel ou bien à l'extrémité orientale de la plaine, développés sur des alluvions limono-argileuses calcaires |

2. Méthodologie

La plaine de la Mitidja constitue l'espace retenu pour mener l'étude relative à l'évaluation de la stabilité structurale des sols. Le choix de cette zone d'étude repose sur la disponibilité de données (le climat, fertilité, l'histoire, diversité des sols et cultures, importance socio-économique) qui offrent à cette plaine un potentiel agricole régional élevé (Messahel et Benhafid, 2008). L'étude a été réalisée sur la base de la carte des sols de la partie ouest établie par Ecrement (1971) (figure 9).

La méthode d'échantillonnage retenue repose sur un mode aléatoire par unité de sol. Les échantillons ont été prélevés en surface sur la couche 0 à 15 cm. Le nombre total d'échantillons est de 50 (annexe 1).

Les quatre classes de sols échantillonnées sont :

- les sols peu évolués (15 prélèvements),
- les sols à sesquioxyde de fer ou de manganèse (les sols rouges) (15 prélèvements),
- les vertisols (16 prélèvements),
- les sols calcimagnésiques (4 prélèvements).

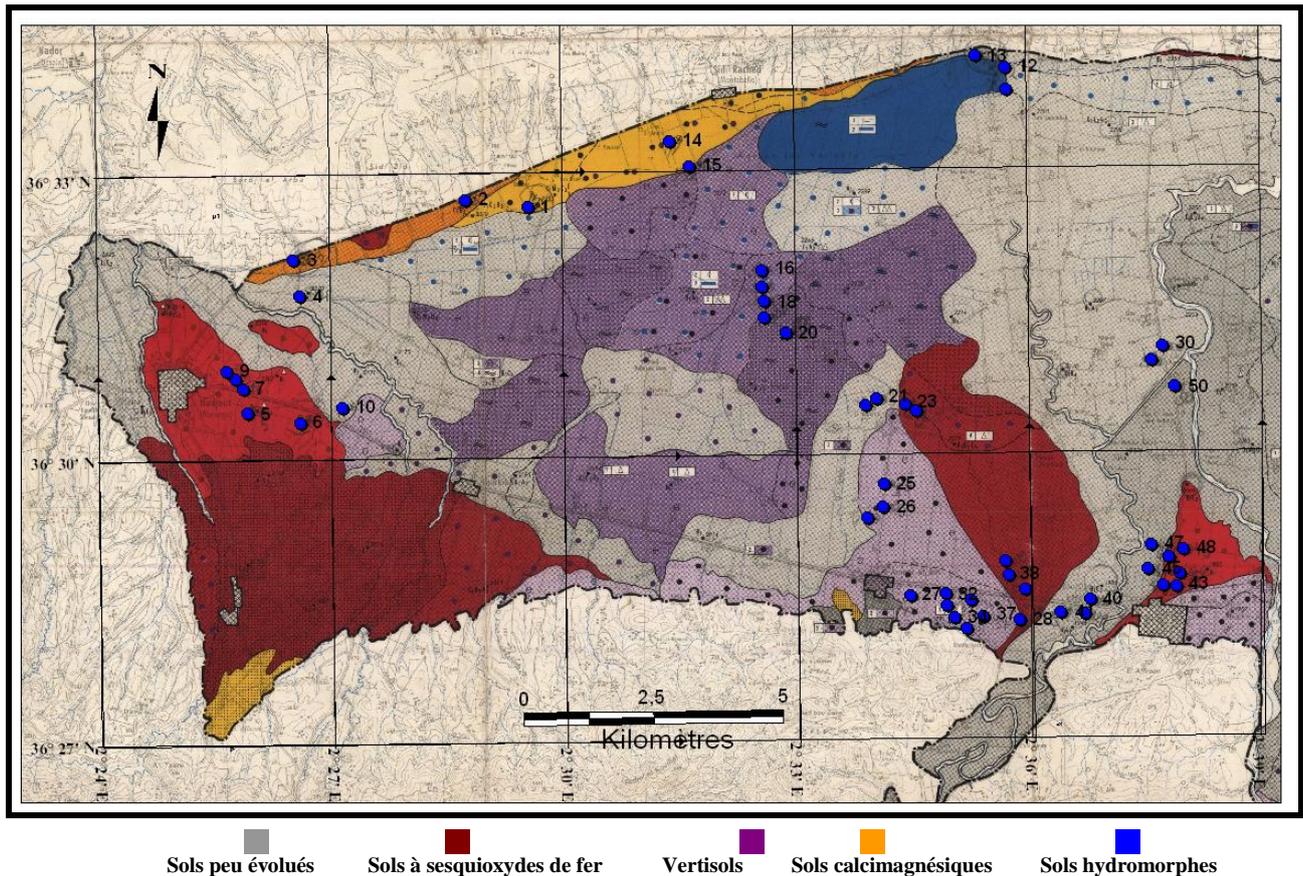


Figure 9. Localisation des prélèvements
(Extrait de la carte des sols au 1/50000 établie par Ecrement, 1971).

Les principales étapes de la recherche sont :

- analyses de caractérisation physico-chimique des sols ; évaluation de la stabilité structurale et fractionnement de la matière organique,
- établissement des régressions linéaires simples, ce sont des relations linéaires entre les variables explicatives (les caractéristiques du sol) et la variable expliquée (stabilité structurale) en utilisant le diamètre moyen pondéral (MWD). Les modèles linéaires statistiques sont les modèles les plus courants et les plus faciles à mettre en œuvre (Crucianu, 2010),
- élaboration des régressions multiples *FPT* (fonction de pédotransfert) établies entre les caractéristiques du sol (taux d'argile, calcaire total, différentes fractions de la matière organique...) et les différents tests de la stabilité structurale. De plus, des hypothèses de validation de ces modèles sont appliquées à la fin.

3. Les méthodes d'analyses utilisées

Après séchage à l'air ambiant, les sols ont été tamisés à 2 mm pour les analyses de caractérisation. Toutefois, seuls les échantillons destinés à la mesure de la stabilité structurale ont été passés entre deux tamis: 3 et 5 mm (trois répétitions pour l'ensemble des analyses chimiques, biochimiques et physiques).

3.1. Analyses physiques

3.1.1. Analyse granulométrique : méthode internationale à la pipette de Robinson.

3.1.2. Stabilité structurale : méthode Le Bissonnais normalisée AFNOR (NF X 31-515, 2005)

Les mesures s'effectuent sur des agrégats de taille comprise entre 3 et 5 mm obtenus par tamisage, avant de les soumettre aux tests.

L'objectif de ce test consiste à évaluer la résistance des sols aux agressions de la pluie et de les classer selon une classification établie par l'auteur de la méthode. Celle-ci comporte trois types de tests :

3.1.2.1. Traitement 1: Humectation rapide par immersion dans l'eau (HR)

L'effet de l'humectation rapide par immersion dans l'eau est le plus destructif parmi les trois tests, ce traitement simule le comportement du sol sous l'action des pluies à partir d'un état initial sec (Le Bissonnais, 1996a).

3.1.2.2. Traitement 2: Humectation lente par capillarité (HL)

Ce traitement permet de tester le comportement de matériaux secs ou peu humides soumis à des pluies modérées. Il est moins destructif que l'humectation rapide et permet donc de discriminer des sols très peu stables (Le Bissonnais et al, 2002).

3.1.2.3. Traitement 3: Désagrégation mécanique après immersion dans l'alcool (DM)

Ce traitement permet de tester le comportement de matériaux humides (périodes hivernales humides). La réhumectation préalable a pour objectif de tester la cohésion des matériaux à l'état humide indépendamment de l'éclatement. Un test qui peut être réalisé soit par réhumectation sous vide soit par l'utilisation d'un liquide non polaire et miscible à l'eau. Pour Hénin et al. (1958), l'éthanol convient très bien dans ce cas.

Les résultats sont exprimés sous deux formes:

—→ En histogrammes des fréquences de distribution des tailles des particules pour chacun des tests. Par la suite, le calcul de la moyenne des différentes classes d'agrégats des sols permet de synthétiser les résultats. Les données sont présentées pour l'ensemble des sols et par classe de sol,

—→ En diamètres moyens pondérés en mm (MWD), par la formule suivante :

$$\text{MWD} = 3,5 * (\% >2 \text{ mm}) + 1,5 * (\% 1-2 \text{ mm}) + 0,75 * (\% 0,5-1 \text{ mm}) + 0,35 * (\% 0,2-0,5 \text{ mm}) + 0,15 * (\% 0,1-0,2 \text{ mm}) + 0,075 * (\% 0,05-0,1 \text{ mm}) + 0,025 * (\% <0,05 \text{ mm}) / 100$$

Pour chacun des tests utilisés un MWD est calculé, MWD_{HR} , MWD_{DM} , MWD_{HL} désignent spécifiquement le MWD calculé après le test d'humectation rapide, de désagrégation mécanique et d'humectation lente. MWD_{moy} désigne la moyenne des trois MWD calculés à partir des trois tests de stabilité structurale.

Cependant, il se trouve que ces trois mécanismes ne se reflètent pas par la même ampleur. Ainsi, la valeur du MWD_{HR} (diamètre moyen pondéral - humectation rapide) est souvent masquée par les valeurs élevées du MWD_{HL} (diamètre moyen pondéral - humectation lente) et MWD_{DM} (diamètre moyen pondéral - désagrégation mécanique). De ce fait, il serait opportun de travailler sur des données centrées réduites (valeurs de standardisation) pour la moyenne des trois MWD, calculées selon la formule suivante : $(x_i - m / \sigma) = (\text{valeur du test} - \text{moyenne du test} / \text{écart type du test})$.

Les valeurs de MWD peuvent être interprétées selon le tableau VI.

Tableau VI. Classes de stabilité en fonction des valeurs du diamètre moyen pondéré (MWD) (Le Bissonnais et Le Souder, 1995).

| <i>MWD (mm)</i> | <i>Stabilité</i> | <i>Principales conséquences</i> |
|-----------------|--------------------|--|
| > 2,0 | Très stable | - Battance et érosion très rares. |
| 1,3 – 2,0 | Stable | - Battance occasionnelle. - Risque d'érosion limité. |
| 0,8 - 1,3 | Moyennement stable | - Battance fréquente. - Risque d'érosion variable selon les paramètres climatiques et topographiques. |
| 0,4 - 0,8 | Instable | - Battance très fréquente. - Risque d'érosion fréquent en toute situation. |
| <0,4 | Très instable | - Battance systématique. - Risque d'érosion important. |

3.2. Analyses chimiques

3.2.1. Calcaire total : volumétrie au calcimètre de Bernard.

3.2.2. pH : Méthode potentiométrique au pH-mètre : avec un rapport sol/eau égal à 1/2,5.

3.2.3. Conductivité : par un conductivimètre à 25°C. Extrait dilué 1/5.

3.2.4. Capacité d'échange cationique : méthode à l'acétate de sodium à pH 8,2.

3.2.5. Bases échangeables : méthode à l'acétate d'ammonium 1N à pH 7.0. Le dosage du potassium et du sodium est effectué par spectrophotométrie à flamme, le calcium et le magnésium sont obtenus par différences.

3.3. Analyses biochimiques

3.3.1. Carbone organique : méthode Anne.

$M.O = C_{organique} \times 1,72$ (correspond à 58 % de carbone dans la matière organique).

3.3.2. Fractionnement de la matière organique

Les méthodes de fractionnement de la matière organique sont souvent peu précises et difficiles à interpréter. Cette difficulté est généralement imputable à la présence de produits intermédiaires encore mal définis et la difficulté de trouver un réactif pour chaque fraction sans altérer les autres. Face à ces difficultés, la méthode Dabin (1976) semble donner des résultats les moins erronés (Volkoff et Cerri, 1978).

Reste que cette méthode ne sépare pas entre les molécules mais donne des mélanges d'espèces différentes, assez proches par leurs propriétés. Ce fractionnement analytique (tableau VII), fondé uniquement sur des critères de solubilité, reste cependant le plus employé pour l'étude de la matière organique (Grasset, 1997).

Les différentes fractions obtenues sont représentées dans le tableau suivant:

Tableau VII. Les étapes de fractionnement de la matière organiques.

| C % | MO% | ML% | M liée % | AFL % | S H P % | AHP % | AFP % | S H S % | AHS % | AFS % | AF % | AH % | H % | |
|------------------------------|--------|-------------------------|------------------------------|--------|-------------------------|--------|--------|------------------|------------------|--------|--------|----------------------------------|--------|--|
| Dosage | Calcul | Dosage | Calcul | Dosage | Dosage | Dosage | Calcul | Dosage | Dosage | Calcul | Calcul | Calcul | Calcul | |
| MO%=1.72* C% | | S H P % = AHP % + AFP % | | | S H S % = AHS % + AFS % | | | AF % = AFP + AFS | | | | | | |
| C % = ML% + M liée % + AFL % | | | M liée % = S H P + S H S + H | | | | | | AH % = AHP + AHS | | | H% = C - (ML + AFL + SH P + SHS) | | |

Le détail du principe d'étude est donné dans l'annexe 2.

3.3.3. Dosage des polysaccharides (méthode colorimétrique à l'anthrone) (Bachelier et Gavinelli, 1966)

La méthode colorimétrique de dosage des glucides par l'anthrone a été conseillée par Dreywood (1946). Etudiée par Morris (1948), elle a été utilisée par de nombreux auteurs, notamment par Brink, Dubach et Lynch (1960), Graveland et Lynch (1961) et Rouquerol (1965).

Les différentes étapes de la méthode d'analyse sont présentées dans l'annexe 2.

4. Traitement statistiques des données

Les différents traitements effectués sont :

- les statistiques descriptives pour les données globales et pour les données de chaque classe de sol,
- l'identification des paramètres pédologiques susceptibles d'avoir un effet sur les variations de la stabilité structurale. Le traitement adopté repose sur l'application de régressions simples et des coefficients de corrélation,
- l'utilisation des caractéristiques pédologiques en tant que critère de prévision d'un niveau général de la stabilité structurale et la mise en place des fonctions de pédotransfert prédictives par la méthode des régressions multiples pas à pas ascendante en coupe instantanée.

Les traitements en question ont été effectués à l'aide des logiciels Statistica v 6.1 et MS Excel 2003.

Les variables concernées sont les différentes fractions de la granulométrie (l'argile, le limon et le sable), le calcaire total, la capacité d'échange cationique (CEC), le pH, la conductivité électrique (CE), la matière organique (MO), les différentes fractions de la matière organique (AF, AH, ...), les polysaccharides (PS), les bases échangeables (Ca+Mg, Na, K), la capacité d'échange cationique CEC et la stabilité structurale (MWD_{HR, HL, DM, moy.}).

L'appréciation de cette relation se fait à l'aide de la matrice de corrélation.

4.1. Réalisation de régressions multiples pour la construction des fonctions de pédotransfert

Dans notre cas, nous avons utilisé l'ensemble des différents résultats obtenus (chimique, physique et biochimique) comme variables indépendantes explicatives, et la stabilité structurale comme variable dépendante.

Les fonctions de pédotransfert ont été établies par les régressions multiples (standards) entre la stabilité structurale et les caractéristiques de constitution. La démarche adoptée consiste à introduire les caractéristiques des sols dans les équations de régressions et à analyser l'amélioration obtenue sur le coefficient de détermination R^2 .

Sachant que les variables qui seront introduites dans ces fonctions de régression multiple standards sont celles qui sont les plus corrélées avec les tests de stabilité structurale. Elles sont sélectionnées à partir de la matrice de corrélations en se basant sur les coefficients de corrélation « r » obtenus.

Cependant, la sélection des variables explicatives sur la base de la matrice de corrélations peut ne pas être totalement appropriée; en effet, il est reconnu que le coefficient de corrélation linéaire « r » peut ne pas refléter par exactitude la vraie relation existant entre deux variables (Lesty, 2008).

Si nous voulons avoir une sélection plus affinée, plusieurs techniques de régressions existent pour se rapprocher le plus de ce principe (Bourbonnais, 1998) :

- **effectuer toutes les régressions possibles** et retenir celles qui font ressortir le plus grand R^2 pour un modèle comportant des variables explicatives toutes significatives.
- **l'élimination progressive** qui consiste à éliminer de proche en proche les variables explicatives dont les t de *Student* sont en dessous du seuil critique.
- **la sélection progressive** qui se base sur le calcul des coefficients de corrélation partielle r_{yx, x_i}^2 pour $j \neq i$ et à retenir la variable explicative ayant le coefficient le plus élevé.
- **la régression par étage** qui permet de minimiser les intercorrélations entre les séries explicatives par étude du résidu.
- **la régression pas à pas ascendante** qui consiste à inclure de plus en plus les variables explicatives en examinant à chaque étape les t de *Student*.

Globalement, les différentes techniques citées supra ont le même objectif. Dans notre cas, nous avons opté pour *la régression pas à pas ascendante* car c'est celle qui semble la plus adéquate de part son principe, et du fait qu'elle est proposée dans plusieurs logiciels statistiques. Le principe de la méthode est présenté dans l'annexe 3.

4.2. Tests de validation des modèles de régression

Les étapes de validation sont présentées dans l'annexe 3.

Le traitement a été réalisé sur 50 échantillons, représentant l'ensemble des prélèvements d'étude.

*Résultats
et discussions*

Chapitre III. Résultats et discussions

1. Caractéristiques et propriétés des sols étudiés

1.1. Paramètres chimiques

Le tableau VIII présente les statistiques descriptives des paramètres chimiques pour l'ensemble des sols.

Tableau VIII. Caractéristiques chimiques des échantillons

| Sols | Paramètres | pH 1/2,5 | CE t 25°/5 (dS/m) | Calcaire total (%) | CEC Cmoles/kg de terre | K Cmoles/kg de terre | Na Cmoles/kg de terre | Mg+Ca Cmoles/kg de terre |
|-----------------------------|------------|----------|-------------------|--------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------|
| L'ensemble des échantillons | Moyenne | 8,0 | 0,2 | 8,9 | 20,7 | 0,4 | 0,5 | 19,9 |
| | Minimum | 7,5 | 0,1 | 0,0 | 11,0 | 0,1 | 0,2 | 10,7 |
| | Maximum | 8,3 | 0,5 | 28,0 | 27,9 | 0,9 | 0,9 | 26,8 |
| | Ecart-type | 0,2 | 0,1 | 9,3 | 4,9 | 0,2 | 0,2 | 4,8 |
| | CV (%) | 2,5 | 53,5 | 98,7 | 23,5 | 45,9 | 40,9 | 24,0 |

En référence à l'intervalle réduit [7.48 – 8.29], les résultats indiquent que le pH est le paramètre le plus homogène. La CE passe d'un minimum de 0,1 ds/m à un maximum de 0.5 ds/m tandis que le taux de calcaire total (CaCO₃ %) varie entre une valeur nulle à une valeur maximale de 28 %, c'est le paramètre le plus dispersé. Enfin, la moyenne de la CEC est de 20.7 Cmol/kg, le minimum est de 11.0 Cmol/kg alors que le maximum est de 27.9 Cmol/kg. L'analyse de ces résultats indique que ces sols sont très faiblement à moyennement calcaire (Djili, 2000), leur pH est neutre à alcalin, et leur CEC est entre faible à très élevé (Chamayou et Legros, 1989).

Les résultats de la variabilité des caractéristiques chimiques pour les différentes classes de sols sont énoncés dans le tableau IX.

Tableau IX. Caractéristiques chimiques des échantillons par classe de sol

| Sols | Paramètres | pH 1/2,5 | CE t 25°/5 (dS/m) | Calcaire total (%) | CEC Cmoles/kg de terre | K Cmoles/kg de terre | Na Cmoles/kg de terre | Mg+Ca Cmoles/kg de terre |
|---------------------------|------------|----------|-------------------|--------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------|
| les sols Calcimagnésiques | Moyenne | 8,0 | 0,2 | 13,8 | 21,2 | 0,6 | 0,7 | 19,9 |
| | Minimum | 7,9 | 0,1 | 4,7 | 16,0 | 0,4 | 0,4 | 14,3 |
| | Maximum | 8,2 | 0,5 | 24,2 | 25,9 | 0,9 | 0,8 | 24,4 |
| | Ecart-type | 0,2 | 0,2 | 8,1 | 4,3 | 0,2 | 0,2 | 4,3 |
| | CV (%) | 1,9 | 63,2 | 53,2 | 20,1 | 43,0 | 28,5 | 21,8 |
| Les sols peu évolués | Moyenne | 8,0 | 0,2 | 13,6 | 16,5 | 0,3 | 0,4 | 15,8 |
| | Minimum | 7,5 | 0,1 | 0,0 | 11,0 | 0,1 | 0,2 | 10,7 |
| | Maximum | 8,2 | 0,5 | 28,0 | 25,4 | 0,5 | 0,7 | 24,4 |
| | Ecart-type | 0,2 | 0,1 | 9,7 | 4,8 | 0,1 | 0,2 | 4,7 |
| | CV (%) | 2,7 | 61,1 | 64,7 | 29,2 | 36,4 | 44,5 | 29,7 |
| Les sols rouges | Moyenne | 8,0 | 0,1 | 2,2 | 20,5 | 0,3 | 0,4 | 19,8 |
| | Minimum | 7,5 | 0,1 | 0,0 | 16,1 | 0,1 | 0,2 | 15,6 |
| | Maximum | 8,3 | 0,2 | 16,8 | 25,3 | 0,5 | 0,8 | 24,8 |
| | Ecart-type | 0,2 | 0,0 | 4,5 | 2,9 | 0,1 | 0,2 | 3,0 |
| | CV (%) | 2,7 | 25,6 | 129,7 | 14,2 | 35,2 | 42,9 | 15,1 |
| Les vertisols | Moyenne | 8,1 | 0,2 | 9,5 | 24,8 | 0,5 | 0,6 | 23,8 |
| | Minimum | 7,6 | 0,1 | 0,0 | 17,3 | 0,2 | 0,4 | 16,3 |
| | Maximum | 8,3 | 0,3 | 26,3 | 27,9 | 0,9 | 0,9 | 26,8 |
| | Ecart-type | 0,2 | 0,1 | 9,5 | 3,0 | 0,2 | 0,2 | 3,0 |
| | CV (%) | 2,2 | 30,1 | 110,5 | 12,2 | 44,2 | 31,2 | 12,7 |

1.1.1. pH

La comparaison des valeurs de ce paramètre des différents sols montre que les écarts sont faibles, ce qui indique que les processus pédogénétiques n'ont pas eu beaucoup d'effet sur ce paramètre notamment sur les sols calcimagnésiques (tableau IX).

1.1.2. Conductivité électrique

La conductivité électrique des sols est faible, elle est comprise entre 0.1 - 0.5 dS/m et ce quelque soit la classe de sol considérée. Globalement, il n'y a pas de phénomène de salinité dans cette zone.

1.1.3. Calcaire total

D'après le tableau IX, les taux de calcaire sont très variables d'une classe de sol à l'autre. Les teneurs les plus élevées sont observées dans les sols peu évolués et les vertisols avec respectivement des maximums de 28 % et 26 %.

1.1.4. Capacité d'échange cationique

Les résultats indiquent que la capacité d'échange cationique est assez élevée dans les sols rouges, calcimagnésiques et les vertisols, CEC > 20 Cmoles/kg de terre (tableau IX). Selon Chamayou et Legros (1989), à partir de ce seuil, la capacité de stockage des cations est satisfaisante. Quant aux sols peu évolués, leur capacité d'échange cationique est moyenne, elle est de l'ordre de 16.5 Cmoles/kg de terre. On peut expliquer ces différences par les teneurs et les types d'argiles ainsi que par celles de la matière organique.

1.1.5. Les bases échangeables

Les taux de calcium et de magnésium échangeables montrent des valeurs élevées atteignant 26.8 Cmoles/kg de terre. Par contre, les taux du potassium échangeable dans les sols étudiés sont faibles et tournent autour d'une moyenne de 0.4 Cmoles/kg de terre, avec un maximum de 0.9 Cmoles/kg de terre observée dans les sols rouges. Le sodium échangeable est très peu variable et sa moyenne est de 0.5 Cmoles/kg de terre (tableau IX).

1.2. Paramètres physiques

Les statistiques descriptives des données granulométriques présentées dans le tableau X révèlent une importante variabilité de la composition granulométrique des différents échantillons. Les teneurs en argile sont assez élevées, la moyenne est de 46.4 %, avec un écart type de 11.3. Le minimum est de 24.6 % et le maximum de 66 %.

Tableau X. Caractéristiques physiques des échantillons

| Sols | Paramètres | A% | LT% | Lf% | Lg% | ST% | Sf% | Sg% |
|------------------------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| L'ensembles des échantillons | Moyenne | 46,4 | 42,0 | 25,6 | 16,4 | 10,6 | 7,2 | 3,4 |
| | Minimum | 24,6 | 29,7 | 13,8 | 1,6 | 1,5 | 0,8 | 0,3 |
| | Maximum | 66,0 | 62,3 | 47,0 | 27,8 | 32,8 | 26,0 | 13,3 |
| | Ecart-type | 11,3 | 8,8 | 7,9 | 5,6 | 7,2 | 4,9 | 3,1 |
| | CV (%) | 24,3 | 21,1 | 30,9 | 34,1 | 67,7 | 68,6 | 90,6 |

L'argile occupent près de 46 % de la matrice du sol, les limons fins et grossiers se présentent avec des moyennes respectives de 25.6 % et 16.4 %. Ils varient entre des minimums respectifs de 13.8 % et 1.6 %, et des maximums respectifs de 47 % et 27.8 %. Pour les sables fins et grossiers, leurs valeurs sont plus ou moins faibles avec des moyennes de 7.2 % et 3.4 %.

Les sols étudiés ne présentent pas une grande hétérogénéité pour les taux d'argiles. Les teneurs les plus élevées sont observées dans les vertisols et les sols rouges avec des moyennes respectives de 55.6 % et 47.1 % (tableau XI), alors que l'écart type le plus réduit est observé dans les sols rouges.

Tableau XI. Caractéristiques physiques des échantillons par classe de sol

| Sols | Paramètres | A % | LT % | Lf % | Lg % | ST % | Sf % | Sg % |
|---------------------------|------------|------|------|------|------|------|------|-------|
| les sols calcimagnésiques | Moyenne | 43,3 | 38,4 | 23,4 | 15,0 | 16,9 | 13,9 | 3,0 |
| | Minimum | 29,4 | 31,0 | 14,1 | 9,0 | 3,8 | 2,9 | 0,8 |
| | Maximum | 58,6 | 47,8 | 34,2 | 20,7 | 29,2 | 26,0 | 7,8 |
| | Ecart-type | 12,6 | 6,9 | 9,4 | 4,9 | 13,9 | 11,5 | 3,3 |
| | CV (%) | 29,2 | 18,1 | 40,3 | 32,9 | 82,0 | 83,2 | 108,8 |
| Les sols peu évolués | Moyenne | 36,7 | 49,4 | 31,0 | 18,4 | 11,9 | 8,2 | 3,6 |
| | Minimum | 24,6 | 33,7 | 18,5 | 1,6 | 1,5 | 1,2 | 0,3 |
| | Maximum | 60,7 | 62,3 | 47,0 | 26,2 | 32,8 | 19,5 | 13,3 |
| | Ecart-type | 11,5 | 10,2 | 9,0 | 6,8 | 8,5 | 4,7 | 3,9 |
| | CV (%) | 31,5 | 20,7 | 29,1 | 37,3 | 71,3 | 57,5 | 108,3 |
| Les sols rouges | Moyenne | 47,2 | 39,9 | 21,7 | 18,3 | 11,2 | 7,8 | 3,4 |
| | Minimum | 38,6 | 29,7 | 13,8 | 14,7 | 6,1 | 5,1 | 0,8 |
| | Maximum | 58,4 | 46,9 | 28,8 | 24,9 | 19,9 | 11,1 | 9,2 |
| | Ecart-type | 5,2 | 5,4 | 4,6 | 3,1 | 4,1 | 2,0 | 2,4 |
| | CV (%) | 10,9 | 13,4 | 21,1 | 17,2 | 36,2 | 25,1 | 70,1 |
| Les vertisols | Moyenne | 55,6 | 37,8 | 24,7 | 13,1 | 7,3 | 4,0 | 3,3 |
| | Minimum | 43,3 | 30,0 | 17,3 | 6,8 | 1,5 | 0,8 | 0,5 |
| | Maximum | 66,0 | 50,5 | 37,3 | 27,8 | 15,7 | 6,9 | 9,3 |
| | Ecart-type | 6,9 | 6,2 | 6,6 | 5,0 | 4,8 | 2,1 | 3,0 |
| | CV (%) | 12,3 | 16,4 | 26,7 | 38,2 | 66,3 | 52,2 | 91,0 |

Le taux d'argile se situe dans l'intervalle de 24.6 % et 66 % montrant ainsi que les sols de la région d'étude sont exclusivement de texture argileuse, vient juste après, la fraction limoneuse avec une prédominance des limons fins pour l'ensemble des horizons, une moyenne de 31 % est observée dans les sols peu évolués. Les taux des sables fins ne dépassent pas les 7.20 % et les sables grossiers ne présentent que 3.4 %.

La texture de l'ensemble des classes des sols est généralement marquée par une prépondérance des fractions argiles et limons fins, elle est donc argileuse à argilo-limoneuse, et peut être considérée de ce fait comme une texture lourde comme le montre la figure 10.

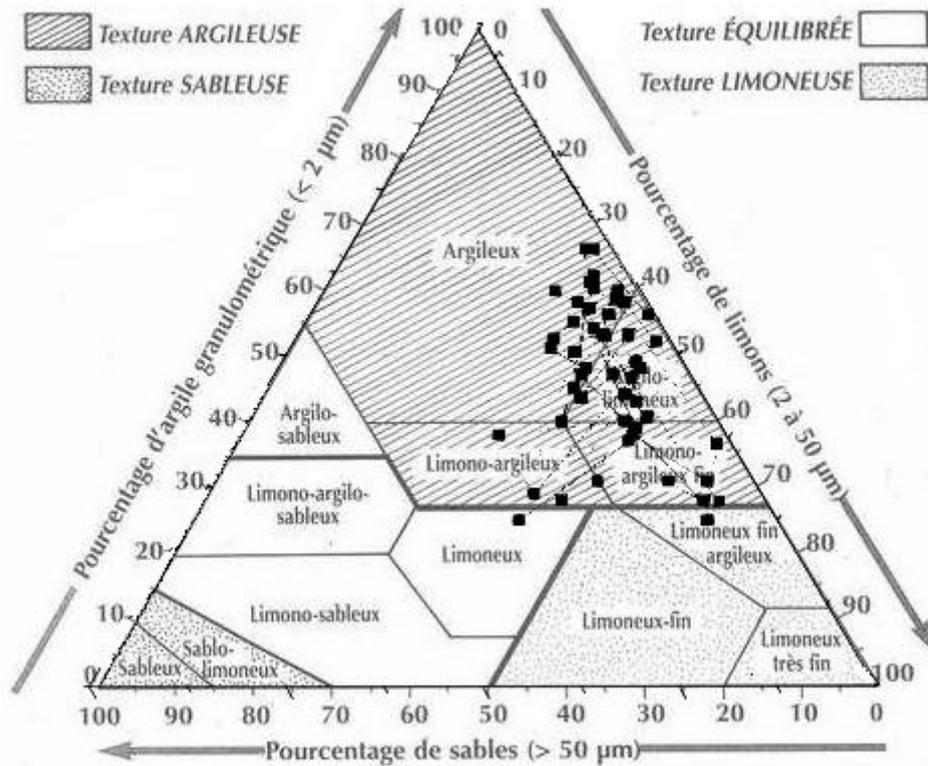


Figure 10. Textures des sols étudiés (USDA)

Selon le diagramme des textures USDA, les échantillons se répartissent en six types de textures (argileux, argilo-limoneux, limono-argileux fin, limono-argileux, limoneux fin argileux, limoneux). La figure 10 montre en effet, une prédominance des sols argileux et argilo-limoneux.

1.3. Paramètres biochimiques

Le tableau XII présente les proportions relatives aux différentes fractions de la matière organique pour l'ensemble des échantillons.

Tableau XII. Caractéristiques biochimiques des échantillons

| Sols | Paramètres | MO% | ML% | M liec% | AFL % | S H P % | AHP % | AFP % | S H S % | AHS % | AFS % | AF % | AH % | H % |
|-----------------------------|------------|------|------|---------|-------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|------|------|------|
| L'ensemble des échantillons | Moyenne | 3,0 | 0,8 | 15,6 | 0,9 | 5,9 | 3,6 | 2,3 | 4,1 | 2,2 | 1,9 | 4,2 | 5,7 | 5,6 |
| | Minimum | 1,1 | 0,0 | 5,5 | 0,2 | 2,0 | 0,6 | 0,2 | 0,6 | 0,3 | 0,0 | 0,8 | 0,9 | 0,2 |
| | Maximum | 4,7 | 3,0 | 24,3 | 3,3 | 10,2 | 6,2 | 4,7 | 8,0 | 5,3 | 4,9 | 9,0 | 11,2 | 13,8 |
| | Ecart-type | 0,9 | 0,6 | 4,9 | 0,7 | 2,0 | 1,5 | 1,1 | 1,7 | 1,3 | 1,1 | 1,7 | 2,5 | 3,9 |
| | CV (%) | 30,7 | 79,3 | 31,3 | 79,9 | 34,2 | 40,7 | 45,1 | 41,7 | 59,3 | 59,4 | 41,2 | 42,7 | 69,5 |

Les teneurs en matière organique sont en moyennes de 3 %, elles sont comprises entre un minimum de 1.1 % et un maximum de 4.7 %. Ces teneurs sont faibles à moyennes, avec un CV de l'ordre de 30 % (une variation modérée). Nous observons que les fractions d'acides humiques et d'acides fulviques extractibles (10 %) l'emportent sur l'humine fractions non extractibles (5.6 %). L'humine représente en effet 32 % du carbone total dans les horizons. On constate par ailleurs que la matière végétale légère est faible (4.6 % par rapport au carbone total).

Concernant les acides humiques et les acides fulviques (pyrophosphates et soude), les deux formes se rencontrent en proportions presque égales, avec un léger avantage pour les acides humiques. Leur variabilité est élevée, dépassant les 40 %.

Le tableau XIII représente les proportions des différentes fractions de la matière organique relatives à chaque classe de sols.

Tableau XIII. Caractéristiques biochimiques des échantillons par classe de sol

| Sols | Paramètres | MO% | ML% | M liée % | AFL % | S H P % | AHP % | AFP % | S H S % | AHS % | AFS % | AF % | AH % | H % |
|-----------------------|------------|------|------|----------|-------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|------|------|------|
| Sols calcimagnésiques | Moyenne | 3,2 | 1,2 | 16,4 | 0,8 | 5,9 | 3,8 | 2,1 | 3,6 | 2,3 | 1,3 | 3,4 | 6,1 | 6,8 |
| | Minimum | 2,2 | 0,4 | 10,8 | 0,3 | 3,5 | 3,1 | 0,2 | 1,2 | 0,6 | 0,6 | 0,8 | 3,9 | 1,9 |
| | Maximum | 4,6 | 2,7 | 23,1 | 1,2 | 8,0 | 5,2 | 2,9 | 6,0 | 4,5 | 1,8 | 4,4 | 9,7 | 12,5 |
| | Ecart-type | 1,1 | 1,1 | 6,0 | 0,5 | 1,9 | 0,9 | 1,3 | 2,0 | 1,7 | 0,5 | 1,8 | 2,6 | 4,4 |
| | CV (%) | 35,8 | 86,2 | 36,5 | 54,6 | 31,9 | 23,9 | 62,2 | 55,8 | 75,5 | 38,9 | 52,1 | 42,4 | 64,2 |
| Sols peu évolués | Moyenne | 2,7 | 0,7 | 14,4 | 0,6 | 5,6 | 3,1 | 2,4 | 4,5 | 2,1 | 2,4 | 4,8 | 5,2 | 4,3 |
| | Minimum | 1,1 | 0,0 | 5,5 | 0,2 | 2,0 | 0,6 | 0,6 | 2,0 | 0,3 | 0,2 | 2,0 | 0,9 | 1,2 |
| | Maximum | 3,9 | 1,9 | 21,4 | 1,2 | 10,2 | 5,5 | 4,7 | 8,0 | 3,8 | 4,9 | 9,0 | 9,0 | 11,9 |
| | Ecart-type | 0,9 | 0,4 | 5,3 | 0,4 | 2,3 | 1,5 | 1,2 | 1,9 | 1,1 | 1,3 | 2,1 | 2,3 | 3,2 |
| | CV (%) | 34,0 | 58,6 | 36,8 | 57,6 | 41,2 | 48,3 | 50,4 | 43,2 | 54,1 | 56,2 | 43,6 | 45,1 | 73,0 |
| Sols rouges | Moyenne | 2,5 | 0,6 | 13,5 | 0,6 | 5,5 | 3,2 | 2,2 | 3,5 | 1,5 | 1,9 | 4,2 | 4,8 | 4,6 |
| | Minimum | 1,2 | 0,1 | 6,3 | 0,2 | 2,3 | 0,9 | 0,5 | 0,6 | 0,3 | 0,3 | 2,0 | 1,7 | 0,2 |
| | Maximum | 4,6 | 2,0 | 24,3 | 1,7 | 8,6 | 6,2 | 3,4 | 5,5 | 3,3 | 3,5 | 5,9 | 8,2 | 13,8 |
| | Ecart-type | 0,9 | 0,5 | 4,9 | 0,5 | 2,0 | 1,5 | 0,9 | 1,2 | 0,9 | 0,9 | 1,2 | 1,9 | 4,2 |
| | CV (%) | 33,5 | 73,2 | 36,3 | 81,4 | 36,0 | 47,1 | 41,8 | 33,7 | 60,0 | 45,9 | 28,1 | 39,7 | 92,3 |
| Vertisols | Moyenne | 3,6 | 1,0 | 18,4 | 1,4 | 6,6 | 4,2 | 2,4 | 4,4 | 2,9 | 1,6 | 3,9 | 7,1 | 7,4 |
| | Minimum | 2,7 | 0,2 | 13,1 | 0,2 | 3,9 | 1,9 | 0,9 | 2,1 | 0,3 | 0,0 | 1,1 | 2,2 | 0,5 |
| | Maximum | 4,7 | 3,0 | 23,3 | 3,3 | 9,2 | 5,9 | 4,1 | 7,9 | 5,3 | 3,9 | 6,7 | 11,2 | 12,9 |
| | Ecart-type | 0,6 | 0,8 | 2,7 | 0,9 | 1,8 | 1,3 | 1,0 | 1,8 | 1,4 | 1,2 | 1,8 | 2,6 | 3,6 |
| | CV (%) | 16,1 | 82,3 | 14,9 | 64,2 | 27,5 | 30,4 | 41,9 | 40,1 | 49,1 | 73,2 | 46,0 | 36,4 | 48,4 |

1.3.1. Matière Organique (MO)

En rapport avec la richesse des sols en argile, les teneurs en matière organique totale sont relativement faibles. Les vertisols ont les taux les plus élevés (4.7 %) tandis que les sols peu évolués en sont les plus pauvres (tableau XIII).

Après séparation entre la matière organique liée et légère, les données révèlent une dominance de la fraction liée. Celle-ci représente la totalité du carbone total des sols avec un maximum de 24.3 % enregistré dans les sols rouges. Cependant, la moyenne la plus élevée est observée dans les vertisols (18.4 %).

1.3.2. Acides fulviques libres (AFL)

Pour l'ensemble des échantillons, le taux des acides fulviques libres est faible. Les moyennes ne dépassent pas les 1.5 % pour tous les sols et constituent la fraction de la MO la plus faible (tableau XIII).

1.3.3. Extraction des substances humiques

1.3.3.1. Substances humiques (SH)

Le tableau XIII indique que l'extraction par le pyrophosphate de sodium pour l'ensemble des sols semble donner des taux peu différents (5.5 % et 6.6 %). La moyenne la plus élevée est enregistrée dans les vertisols (6.6 %), cette fraction est prédominante. En effet, selon Duchaufour et al. (1970), elle est surtout présente dans les horizons de surface des vertisols.

1.3.3.1.1. Acides humiques (AH)

Dans les sols étudiés, les acides humiques extraits par le pyrophosphate de sodium (AHP) et les acides humiques extraits par la soude (AHS) présentent des taux plus importants que ceux des acides fulviques (extraits par le pyrophosphate de sodium et la soude). Ils sont présents avec des moyennes qui varient entre 4.8 et 7.1 ‰ pour l'ensemble des classes des sols, avec une faible variabilité entre les différentes classes de sols. Les acides humiques bruns¹ sont moins présents dans les sols étudiés que les acides humiques gris² (tableau XIII).

1.3.3.1.2. Acides fulviques (AF)

Dans l'ensemble, les résultats analytiques (tableau XIII) révèlent une plus faible concentration des acides fulviques par rapport aux acides humiques.

Les acides fulviques extraits par le pyrophosphate de sodium (AFP) ont des moyennes qui varient de 2.05 à 2.44 ‰, leur proportion est nettement supérieure à celle des acides fulviques extraits par la soude (AFS).

Le tableau XIII montre que dans les sols peu évolués, la proportion des acides fulviques (AFS, AFP) est légèrement supérieure à celle des acides humiques. D'après Sarag (1983), ce comportement peut être expliqué par la présence du calcaire qui freine la polymérisation des acides fulviques en acides humiques. Ce phénomène dépend essentiellement de la forme dans laquelle se trouve le calcaire dans le sol, il est d'autant plus fort que le calcaire présent dans le sol ne libère pas de calcaire actif, mais seulement des grains de carbonates insolubles et inactifs (Duchaufour et *al.*, 1970).

1.3.4. Humine (H)

Avec 7.4 ‰, les vertisols présentent la moyenne la plus élevée, ils sont suivis des sols calcimagnésiques. Par ailleurs, le fractionnement de la matière organique a révélé que les substances humiques (AH, AF) représentent plus de 50 % du carbone total. L'humine considérée comme matière organique non extractible, représente la deuxième fraction organique dominante. En milieu très actif et bien aéré, la minéralisation de la matière organique fraîche est rapide et se transforme en acides humiques et surtout en humine non extractible (Duchaufour et *al.*, 1970).

1.3.5. Les polysaccharides et les différents rapports

Les tableaux XIV et XV présentent les statistiques descriptives relatives au dosage des polysaccharides et les différents rapports AF/AH et AF+AH+H/C*100, pour l'ensemble des sols puis pour différentes classes de sols.

Tableau XIV. Caractéristiques des polysaccharides et les différents rapports des échantillons

| Sols | Paramètres | PS ‰ | AF/AH | AF+AH+H/C*100 |
|----------------------------|-------------------|-------|-------|---------------|
| Ensembles des échantillons | Moyenne | 491,7 | 0,9 | 89,8 |
| | Minimum | 153,1 | 0,2 | 76,5 |
| | Maximum | 843,5 | 3,3 | 98,1 |
| | Ecart-type | 188,1 | 0,7 | 5,2 |
| | CV (%) | 38,3 | 74,1 | 5,8 |

Le degré de polymérisation est d'une moyenne égale à 0.9 pour l'ensemble des sols échantillonnés, avec un écart type de 0.7. Le minimum est de 0.2 et le maximum de 3.3. Le degré de polymérisation dont la moyenne ne dépasse pas 1 traduit une bonne polymérisation.

1. les acides humiques bruns sont extraits par la soude diluée . 2. les acides humiques gris sont extraits par le pyrophosphate de sodium (Duchaufour, 1970).

Tableau XV. Caractéristiques des polysaccharides et des différents rapports par classe de sol

| Sols | Paramètres | PS % | AF/AH | AF+AH+H/C*100 |
|---------------------------|------------|-------|-------|---------------|
| Les sols calcimagnésiques | Moyenne | 345,2 | 0,6 | 88,6 |
| | Minimum | 206,9 | 0,2 | 80,1 |
| | Maximum | 478,2 | 1,0 | 96,4 |
| | Ecart-type | 124,1 | 0,3 | 7,2 |
| | CV (%) | 36,0 | 57,2 | 8,1 |
| Les sols peu évolués | Moyenne | 500,4 | 1,2 | 90,8 |
| | Minimum | 236,4 | 0,3 | 82,7 |
| | Maximum | 754,9 | 3,3 | 98,1 |
| | Ecart-type | 157,4 | 0,8 | 4,8 |
| | CV (%) | 31,5 | 69,1 | 5,3 |
| Les sols rouges | Moyenne | 656,2 | 1,0 | 90,4 |
| | Minimum | 279,4 | 0,5 | 76,5 |
| | Maximum | 843,5 | 2,7 | 96,8 |
| | Ecart-type | 176,2 | 0,5 | 6,0 |
| | CV (%) | 26,9 | 52,0 | 6,7 |
| Les vertisols | Moyenne | 366,0 | 0,7 | 88,7 |
| | Minimum | 153,1 | 0,2 | 83,0 |
| | Maximum | 537,3 | 3,0 | 97,7 |
| | Ecart-type | 103,3 | 0,7 | 4,4 |
| | CV (%) | 28,2 | 98,1 | 4,9 |

1.3.5.1. Polysaccharides (PS)

D'après le tableau XV, les teneurs en polysaccharides sont différentes d'un sol à un autre. La plus forte moyenne est enregistrée dans les sols rouges (656.2 ‰). Les plus faibles moyennes sont enregistrées dans les sols calcimagnésiques (345.2 ‰). Nous remarquons que les sols rouges présentent des teneurs atteignant le double de celles des sols calcimagnésiques et des vertisols. L'augmentation des concentrations en polysaccharides dans les sols rouges indique une activité biologique relativement importante (Liu et Bomke, 2005).

1.3.5.2. Degré de polymérisation

Le degré de polymérisation correspond au rapport :

$$\frac{\text{Carbone\% (des acides fulviques)}}{\text{Carbone\% (des acides humiques)}} \text{ ou } \frac{\text{AF}}{\text{AH}}$$

Il exprime, lorsqu'il est inférieur à 1, une polymérisation des acides fulviques en acides humiques et donc une bonne polymérisation. Lorsqu'il est supérieur à 1, il traduit la dominance des acides fulviques, donc une fraction peu polymérisée.

D'après le tableau XV, les vertisols sont ceux qui présentent la plus faible moyenne (0.7 ‰) traduisant ainsi une bonne polymérisation. Une moyenne de 1.00 est observée pour les sols rouges. Enfin, les sols peu évolués présentent le degré de polymérisation le plus élevé avec une moyenne de 1.2, donc ils sont peu polymérisés par rapport aux autres classes de sols.

1.3.5.3. Taux d'humification

Il est admis que le taux d'humification correspond à la fraction du carbone humifié, sa valeur permet de déduire, par différence, la matière organique non décomposée et demeurée à l'état frais (Sanchez-Monédéro et *al.*, 2002).

Cependant, pour comprendre ce phénomène, la totalité de la matière organique doit être prise en compte. Nous avons choisi d'appliquer le protocole permettant d'accéder à la répartition à la fois des substances humiques et non humiques.

Il correspond au rapport :

$$\frac{\text{Carbone \% (des acides fulviques + acides humiques + humine)} \times 100}{\text{Carbone total \%}}$$

Les sols étudiés présentent des taux d'humification très élevés, atteignant les 98 % avec une moyenne de 89.8 % et un écart type faible (5.2 %) indiquant un écosystème homogène (tableau XIV). Ainsi, on peut en déduire qu'il n'y a pas d'accumulation de matière organique fraîche, c'est-à-dire qu'il y a une bonne humification dans les sols étudiés.

1.4. Evaluation de la stabilité structurale

1.4.1. Distribution de la taille des agrégats

1.4.1.1. Distribution de la taille des agrégats pour le test de l'humectation rapide (HR)

Les résultats de la distribution des moyennes des tailles des particules des quatre classes de sols après l'humectation rapide sont présentés dans la figure 11.

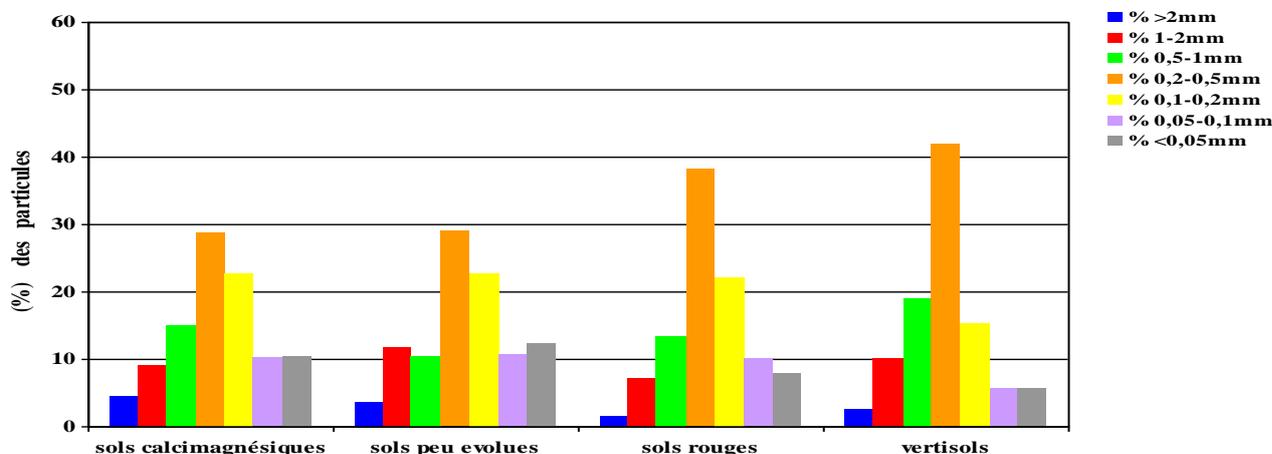


Figure 11. Distribution moyenne de la taille des particules après humectation rapide

Les sols étudiés présentent une fragilité vis-à-vis de ce test (effet d'éclatement). Le test d'humectation rapide étant le plus destructif, il donne lieu à de fortes proportions de particules de petite dimension (< 0.2 mm), communément considérées comme des micro-agrégats (< 250 μm).

L'analyse de la distribution des tailles des particules révèle que les fréquences les plus élevées dans l'ordre décroissant sont les suivantes : 0.2 - 0.5 mm, 0.1 - 0.2 mm et 0.5 - 1 mm, avec des pourcentages allant de 10 % à plus de 40 %. La première classe (0.2 - 0.5 mm) est mieux représentée dans les vertisols. En effet, l'horizon de ces sols est caractérisé par une structure fine à moyenne et ce en raison de la présence d'un complexe organo-minéral relativement stable.

1.4.1.2. Distribution de la taille des agrégats pour le test de l'humectation lente (HL)

La distribution moyenne des tailles des particules après l'humectation lente pour les différentes classes de sols est représentée par la figure 12.

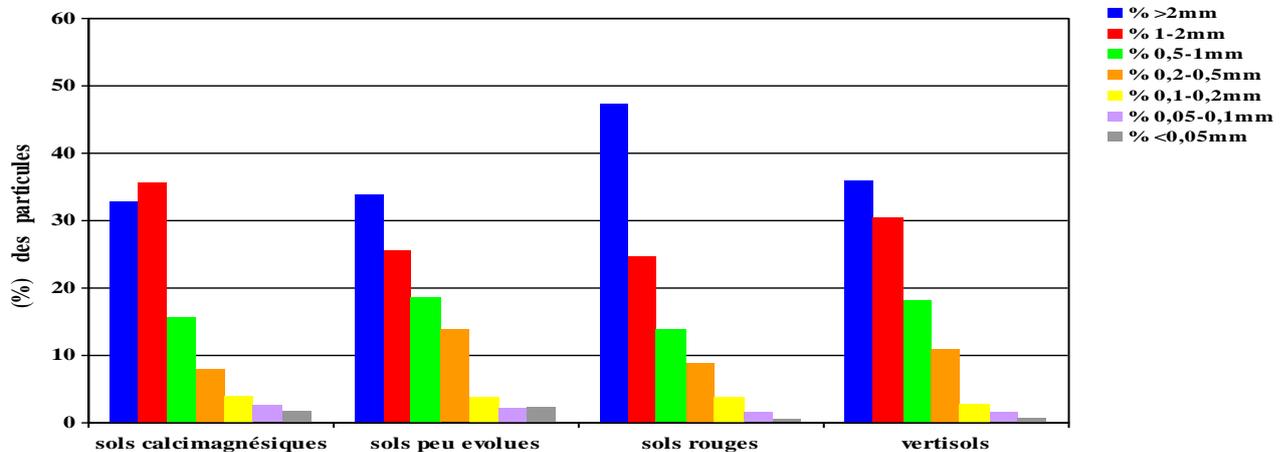


Figure 12. Distribution moyenne de la taille des particules après humectation lente

D'emblée, on observe que le mode de distribution des agrégats du test à l'HL, ne présente pas les mêmes fréquences que le test précédent.

Les résultats indiquent :

- un gradient des agrégats décroissant selon la taille,
- que la classe modale des agrégats (ou classe à effectif maximal) se déplace vers la fraction grossière (>2 mm), à l'exception des sols calcimagnésiques, dans lesquels les agrégats 2 – 1 mm dominant.

En parallèle ce test nous a permis d'obtenir :

- quatre fractions dominantes (> 2mm, 1 – 2mm, 0.5 – 1mm, 0.2 – 0.5 mm), variant de 10 à plus de 40 % (> 250 µm des macro-agrégats),
- des taux d'agrégats < 0.2 mm de l'ordre de 10 %.

La teneur en particules grossières est plus élevée dans les sols rouges (des agrégats > 2 mm), traduisant une bonne résistance de ces agrégats au test HL comparée aux autres classes de sols. D'après Cosentino et al. (2007), cette résistance peut être expliquée par la forte cohésion des agrégats.

1.4.1.3. Distribution de la taille des agrégats pour le test désagrégation mécanique (DM)

La distribution des agrégats après le traitement DM (traitement 3) est présentée pour la figure 13.

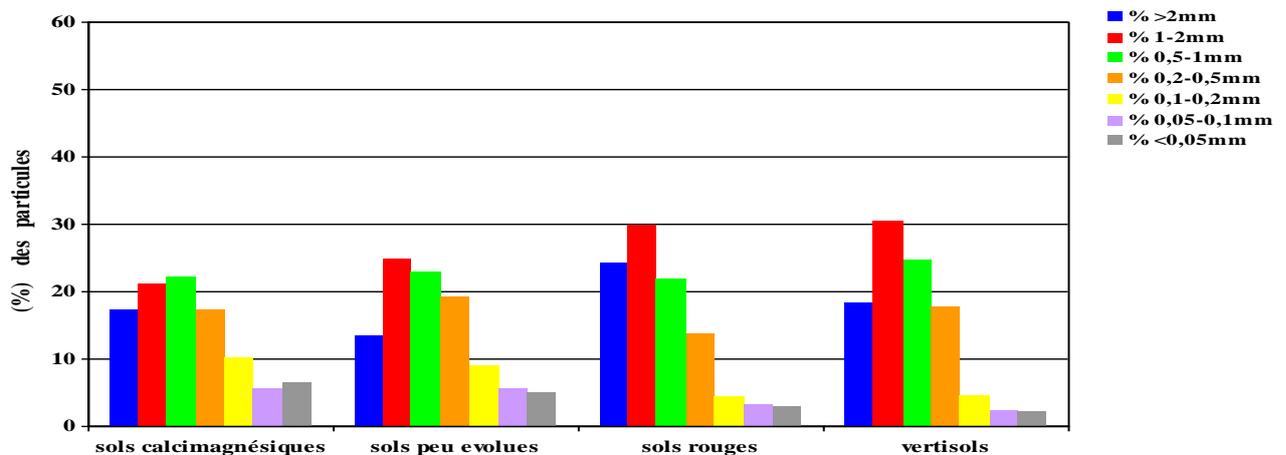


Figure 13. Distribution moyenne de la taille des particules après désagrégation mécanique

L'analyse de la figure 13 fait ressortir les faits suivants :

- quatre principales classes d'agrégats de taille > 2 mm, $1 - 2$ mm, $0,5 - 1$ mm et $0,2 - 0,5$ mm, sont présents pour l'ensemble des sols,
- Les agrégats de tailles $< 0,2$ mm ne dépassent pas 10 %,
- les fractions de taille $1-2$ mm sont les mieux représentées dans trois classe de sols mais présentent un faible écart avec la classe $0,5 - 1$ mm. Globalement, les quatre premières classes (> 2 mm – $0,2$ mm) occupent plus de 80 % de l'ensemble des agrégats.

De plus, l'observation de la figure 13 fait ressortir une similitude dans le mode de distribution des agrégats avec la prédominance des particules de tailles $> 0,5$ mm, d'une part entre les vertisols et les sols rouges, d'autre part entre les sols peu évolués et les sols calcimagnésiques.

Cette distribution suggère selon Le Bissonais (1996a) une cohésion satisfaisante des sols contre l'impact des gouttes de pluie sur des matériaux humides. Ce test indique que la classe des sols rouges présente une résistance supérieure à celle des autres classes de sols et qu'ils sont probablement moins susceptibles à la formation de croûtes de battance.

1.4.2. Analyse du diamètre moyen pondéral (MWD)

Le tableau XVI présente les statistiques descriptives pour les données globales des trois traitements de la stabilité structurale et la moyenne des trois tests.

Tableau XVI. Variabilité des caractéristiques du MWD des échantillons

| Sols | Paramètres | MWD | MWD | MWD | MWD |
|---------------------------|------------|------|------|------|------|
| | | HR | HL | DM | moy |
| Ensemble des échantillons | Moyenne | 0,5 | 1,9 | 1,3 | 1,7 |
| | Minimum | 0,3 | 1,1 | 0,4 | 0,0 |
| | Maximum | 1,0 | 2,4 | 2,2 | 3,6 |
| | Ecart-type | 0,2 | 0,4 | 0,5 | 0,8 |
| | CV (%) | 32,1 | 28,4 | 40,8 | 27,0 |

La moyenne la plus élevée du MWD est enregistrée avec le test HL (1.9). Par contre, la moyenne la plus faible, de l'ordre de 0.5 est portée sur HR (le plus destructif des tests). Le CV de MWD_{DM} (40.8 %) indique une variabilité importante de ce test. Le test qui donne les plus grands agrégats, donc le moins destructif, est MWD_{HL} (2.4 mm), ce résultat est confirmé par son minimum, qui est le moins bas (1.1 mm).

L'analyse des données relatives aux différentes classes de sols permet d'obtenir les résultats présentés dans le tableau XVII.

Tableau XVII. Variabilité des caractéristiques du MWD par classe de sol

| Sols | Paramètres | MWD | MWD | MWD | MWD |
|-----------------------|------------|------|------|------|------|
| | | HR | HL | DM | moy |
| Sols calcimagnésiques | Moyenne | 0,5 | 1,8 | 1,2 | 1,6 |
| | Minimum | 0,3 | 1,1 | 0,6 | 0,1 |
| | Maximum | 1,0 | 2,3 | 2,2 | 3,6 |
| | Ecart-type | 0,3 | 0,5 | 0,8 | 1,5 |
| | CV (%) | 55,2 | 38,4 | 54,2 | 39,5 |
| Sols peu évolués | Moyenne | 0,5 | 1,8 | 1,1 | 1,4 |
| | Minimum | 0,3 | 1,1 | 0,5 | 0,2 |
| | Maximum | 0,9 | 2,3 | 0,4 | 2,7 |
| | Ecart-type | 0,2 | 0,4 | 1,3 | 0,8 |
| | CV (%) | 34,9 | 30,0 | 43,5 | 31,9 |
| Sols rouges | Moyenne | 0,4 | 2,2 | 1,5 | 1,9 |
| | Minimum | 0,3 | 1,6 | 0,9 | 0,9 |
| | Maximum | 0,7 | 2,4 | 2,2 | 2,8 |
| | Ecart-type | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,5 |
| | CV (%) | 26,8 | 12,8 | 26,9 | 16,9 |
| Vertisols | Moyenne | 0,6 | 1,9 | 1,4 | 1,8 |
| | Minimum | 0,4 | 1,4 | 0,7 | 0,9 |
| | Maximum | 0,8 | 2,7 | 2,2 | 3,4 |
| | Ecart-type | 0,1 | 0,4 | 0,5 | 0,7 |
| | CV (%) | 23,1 | 34,0 | 32,1 | 26,1 |

A la lecture de ce tableau, il ressort que la moyenne la plus élevée du MWD_{HR} est observée pour les vertisols. Concernant les tests HL et DM, ce sont les sols rouges et les vertisols qui présentent la moyenne la plus élevée avec respectivement 2.2 mm et 1.9 mm. Pour le minimum de MWD_{HL} , il est de 1.6 mm et 1.4 mm pour le MWD_{DM} . Ces valeurs peuvent être expliquées par les fortes teneurs en matière organique et en argiles de ces sols.

On remarque aussi :

- que le MWD_{moy} des sols rouges est élevé avec une moyenne de 1.9 mm, présentant l'écart type le plus réduit 0.5,
- les vertisols donnent une moyenne de 1.8 mm,
- les plus faibles valeurs sont celles des sols calcimagnésiques et des sols peu évolués avec respectivement 1.6 mm et 1.4 mm.

Les CV de tous les MWD sont modérés sauf ceux des sols calcimagnésiques dont le nombre d'échantillons est réduit et ayant des valeurs assez hétérogènes.

1.4.2.1. Diamètre moyen pondéral pour le test de l'humectation rapide (MWD_{HR})

Les résultats du calcul du MWD_{HR} par classes de sols sont représentés à la figure 14.

Globalement, les résultats indiquent que les sols sont instables avec toutefois trois niveaux de gravité (Le Bissonnais et Le Souder, 1995) :

- sols instables (68 %),
- sols très instables (26 %),
- sols moyennement stables (6 %).

Par ailleurs, il y a lieu de noter l'absence totale de classes de sols stables et très stables.

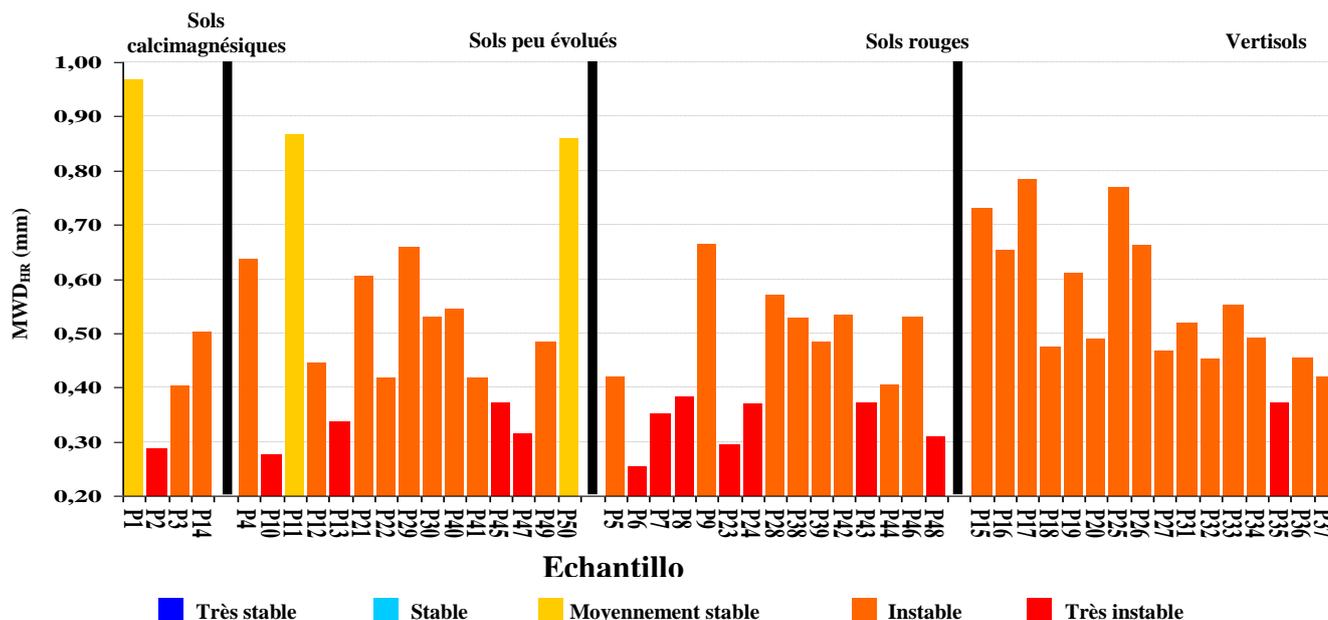


Figure 14. MWD des différents types de sols pour le test humectation rapide

L'évaluation des résultats du test de stabilité structurale par classe de sol laisse apparaitre que :

- l'instabilité peut être considérée comme une caractéristique de l'ensemble des sols particulièrement pour les sols rouges et les vertisols,
- les sols rouges et les sols peu évolués présentent des échantillons très instables avec des pourcentages qui varient entre 25 % à 45 %,
- l'aspect moyennement stable est le moins représenté, noté seulement dans les sols calcimagnésiques et les sols peu évolués, respectivement 25 % et 13 %.

D'après Le Bissonnais et Le Souder (1995), l'aspect instable est une caractéristique des sols où on a la formation d'une battance très fréquente, avec même un risque d'érosion important. Cependant l'hypothèse de Chenu (2006) semble l'associer à l'effet de taux insuffisant en MO dans les échantillons d'étude et leur attribue une sensibilité au phénomène d'éclatement.

Néanmoins, cette sensibilité n'est pas représentative pour l'ensemble des données, car on dénote qu'au sein de la même classe (cas des calcimagnésiques ou des peu évolués) il y a certains échantillons qui résistent à ce phénomène. Cette différence peut être expliquée par la composition et le comportement de chaque échantillon, un amalgame régulateur et conditionneur du mécanisme d'hydrophobicité (Chenu et al., 2000 ; Cosentino, 2006).

Toutefois, il est utile d'indiquer que pour les sols calcimagnésiques, compte tenu de leurs nombres réduits d'échantillons, les résultats obtenus peuvent être considérés comme insuffisants ou délicats à interpréter surtout pour la comparaison avec les autres classes de sols.

1.4.2.2. Diamètre moyen pondéral pour le test à l'humectation lente (MWD_{HL})

L'étude du graphique laisse apparaître la présence de trois classes de stabilité :

- la classe moyennement stable (4 %),
- la classe stable (46 %), et
- la classe très stable (50 %).

On remarque l'absence des classes instable et très instable pour l'ensemble des agrégats.

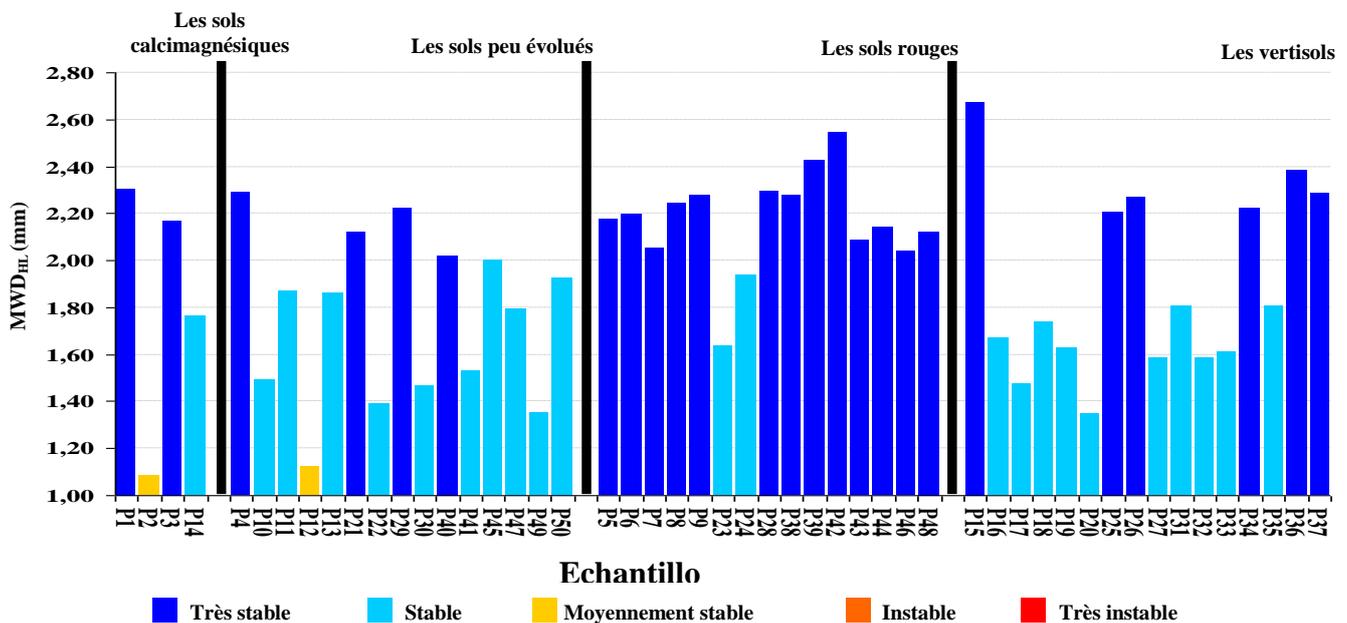


Figure 15. MWD des différents types de sols pour le test humectation lente

L'analyse de l'indice MWD_{HL} des quatre classes de sols fait ressortir que :

- la classe très stable, avec plus de 80 % des échantillons est dominante dans les sols rouges,
- la classe stable est présente avec plus de 60 %, dans les sols peu évolués et les vertisols,
- un seul échantillon de stabilité moyenne se trouve dans les sols peu évolués et dans les sols calcimagnésiques. En tenant compte des résultats de la caractérisation des sols, il est vraisemblable que ces deux échantillons de sols soient associés aux faibles teneurs en A, MO et PS.

Cosentino (2006) estime que le principal mécanisme responsable de la résistance des agrégats au délitement est constitué par la cohésion interparticulaire (un facteur interne), limitant, de ce fait, leur microfissuration. La cohésion étant régie par les taux d'argiles, de matière organique et des polysaccharides.

1.4.2.3. Diamètre moyen pondéral pour le test désagrégation mécanique (MWD_{DM})

La figure 16 présente les principaux résultats obtenus pour le diamètre moyen pondéral avec le test DM.

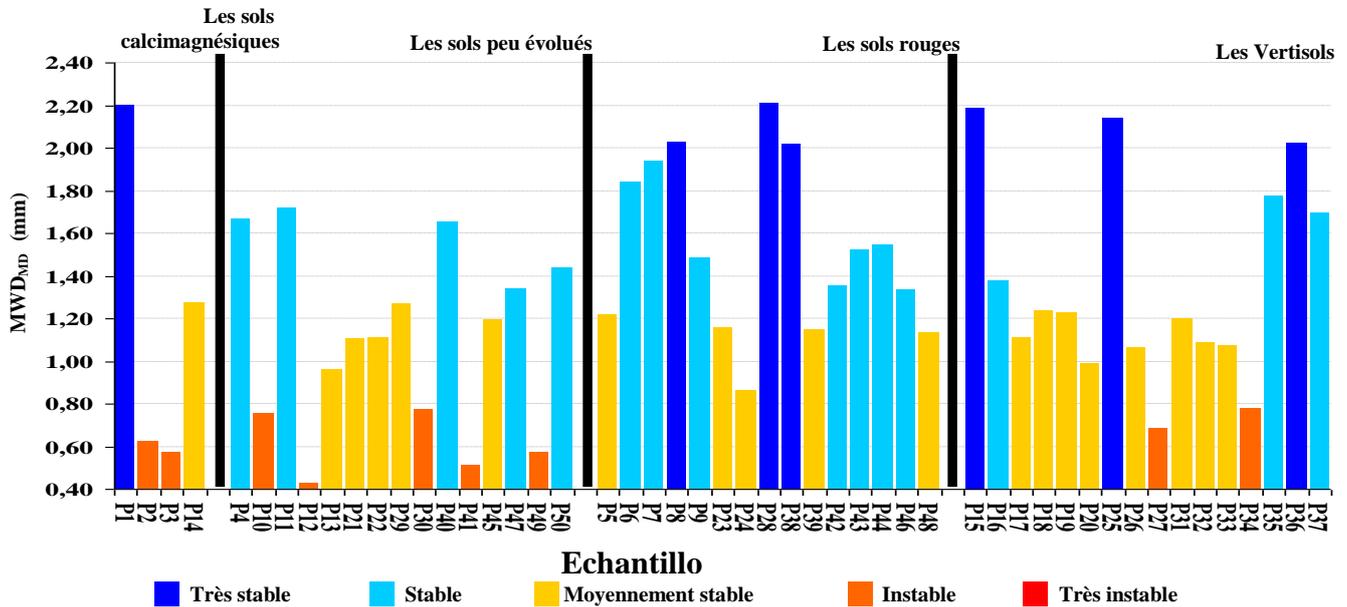


Figure 16. MWD des différents types de sols pour le test désagrégation mécanique

Globalement, il est possible d'identifier quatre classes de stabilité. Il s'agit de la classe instable avec 18 %, de la classe moyennement stable avec 38 %, de la classe stable avec 30 % et de la classe très stable avec 14 % d'échantillons de sol.

D'après Le Bissonnais et Le souder (1995), sur les sols moyennement stables, il est fréquent d'observer la formation d'une croûte de battance. De plus, si les conditions climatiques et topographiques le permettent, ils sont susceptibles à l'érosion.

Par ailleurs, la figure 16 montre :

- l'absence de la classe très instable dans tous les sols,
- que les sols rouges et les vertisols sont très stables et stables,
- l'absence d'agrégats très stables dans les sols peu évolués alors que ceux moyennement stables et instables sont fortement représentés,
- qu'avec ce test, les sols rouges sont les plus résistants.

Ce comportement s'explique par la présence de taux suffisants de matières organiques, d'argiles et d'oxydes de fer, il résulte en fait d'une bonne cohésion des agrégats à l'état humide (Hénin et al., 1969 ; Tate, 1987 ; Le Bissonnais, 1996a).

1.4.2.4. Diamètre moyen pondéral de la moyenne des trois tests (MWD_{MOY})

L'observation de la représentation graphique des données (figure 17) fait ressortir cinq classes de stabilité : la classe des sols très instables (4 %), la classe des sols instables (6 %), la classe des sols moyennement stables (20 %), la classe des sols stables (38 %), et la classe des sols très stables (32 %).

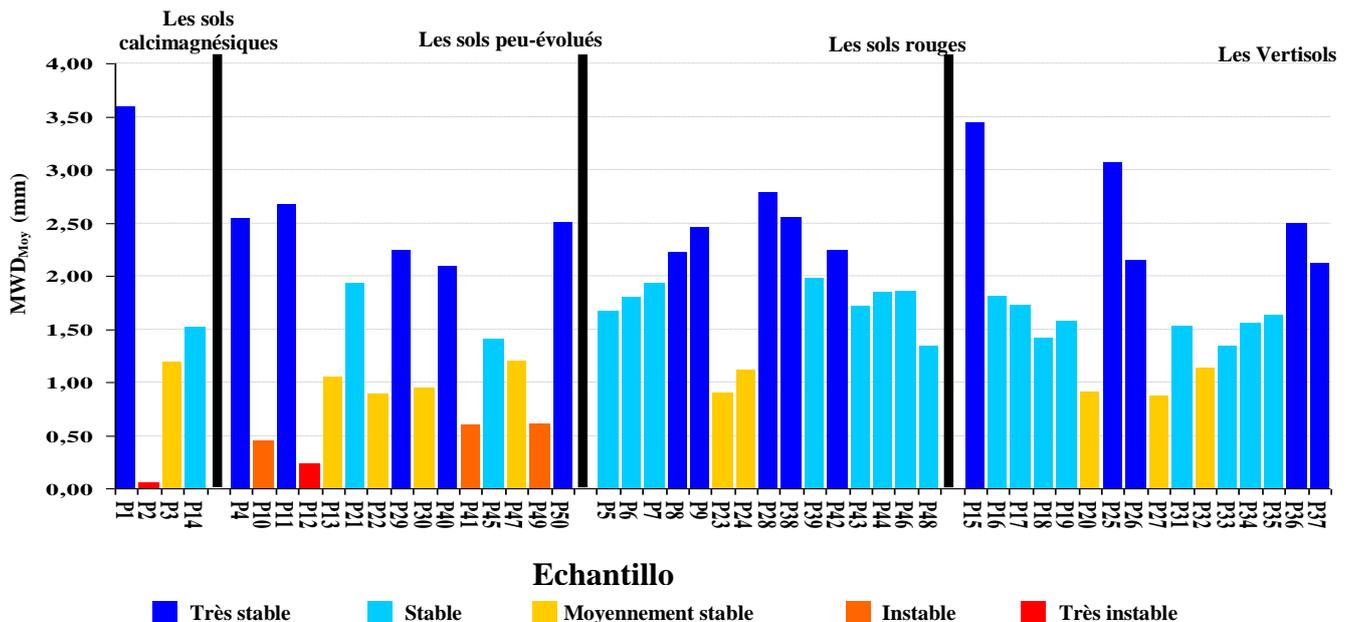


Figure 17. La moyenne des trois tests (MWD_{MOY}) pour les différents types de sols

L'examen de cette figure montre que :

- la stabilité structurale de ces sols est principalement stable à très stable pour la classe des sols rouges et la classe des vertisols,
- une certaine originalité est observée dans la classe des sols peu évolués et à un degré moindre dans les sols calcimagnésiques, reflétée par une différence dans la régression du MWD_{MOY} rendant visible toutes les classes de stabilité.

Monnier (1965) estime que la stabilité des agrégats observée dans les sols rouges peut être expliquée par la présence d'hydroxyde de fer colloïdal. En effet, la matière organique ne peut pas être considérée, dans la plus part des cas, comme étant le principal facteur responsable de la stabilité structurale. Ceci laisse supposer que les agrégats stabilisés par les humâtes ferriques peuvent résister beaucoup mieux à la dégradation.

2. Les paramètres influençant la stabilité structurale

Le tableau XVIII est extrait de la matrice de corrélation linéaire de Pearson, représentant l'interaction des différents paramètres d'étude avec les trois tests de la stabilité structurale, et de leur moyenne.

Il est possible de faire ressortir que le diamètre moyen pondéral (MWD) augmente proportionnellement avec les valeurs croissantes du calcaire total, de la matière organique, de l'argile et des polysaccharides.

Par ailleurs, certains coefficients sont négatifs, cas de l'interaction des trois tests de la stabilité structurale avec le paramètre sable ($r = -0.45, -0.34, -0.39$), reflétant une relation inversement proportionnelle. Ils correspondent à une diminution de la stabilité structurale lorsque le sable augmente.

2.1. Test d'humectation rapide (MWD_{HR})

Ce traitement permet de tester le comportement des matériaux secs soumis à des humectations brutales. Les résultats sont représentés sous forme de diamètres moyens pondéraux MWD_{HR} .

Quatorze variables exogènes sont sélectionnées à partir de la matrice de corrélation (tableau XVIII), il s'agit du $CaCO_3$, S, MO, ML, MLIée, AFL, SHP, SHS, AHP, AHS, SHPS, AF, AH et H.

2.1.1. Relation MWD_{HR} - Calcaire total

La corrélation entre le MWD_{HR} et le calcaire total est positive et statistiquement significative ($p = 0.02$; $r = 0.33$). Le nuage de points représenté dans la figure 18 est dispersé et montre une faible tendance de l'effet des teneurs en calcaire total sur la stabilité structurale du sol. Ceci est illustré par le faible coefficient de corrélation obtenu. L'équation de la droite est de type $MWD_{HR} = 0.0057CaCO_3 + 0.4556$.

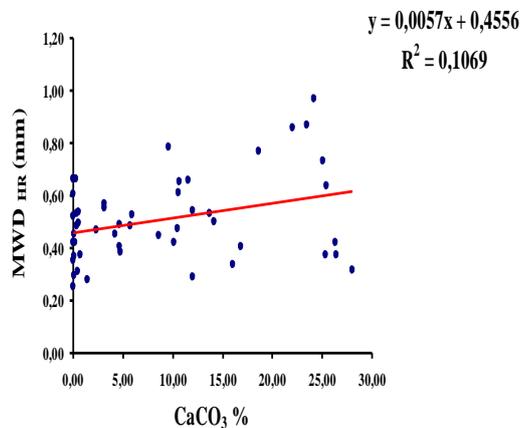


Figure 18. Relation MWD_{HR} – Calcaire total

Selon Abiven (2004), cette augmentation de stabilité de la structure peut être, effectivement, reliée à la présence du $CaCO_3$, son action reste, toutefois, conditionnée par la disponibilité et la teneur en argile dans le sol.

Pour obtenir une bonne *cohésion* d'un sol, il faut diminuer la *mouillabilité* des agrégats, réduire leur gonflement, accroître les forces de liaison, ce qui peut être acquis par addition de matière organique ou correction de l'état ionique du sol par le Ca^{2+} (Hénin et al, 1969). De ce fait, le calcaire est souvent utilisé comme amendement pour améliorer les sols instables et acides, son effet est directement relié à sa réaction de dissolution et la libération des ions Ca^{2+} qui s'en suit (Dionot, 2000 et Christen, 2009).

2.1.2. Relation MWD_{HR} - Sable

La relation entre le MWD_{HR} et le sable est représentée dans la figure 19. L'analyse du nuage de points montre que les points ne sont pas trop dispersés et que l'augmentation du taux de sable s'accompagne généralement par la diminution du MWD_{HR} . Ceci est confirmé par la tendance de la droite de régression en décroissance, ce qui indique une relation inversement proportionnelle entre les deux paramètres.

L'équation caractéristique de la relation s'écrit sous la forme suivante $MWD_{HR} = - 0,0101 S + 0,6131$, le coefficient de corrélation est négatif et très hautement significatif ($p = 0.001$; $r = -0,45$), il en est de même pour le sable fin et grossier avec des coefficients de corrélations respectifs de -0.39, -0.42.

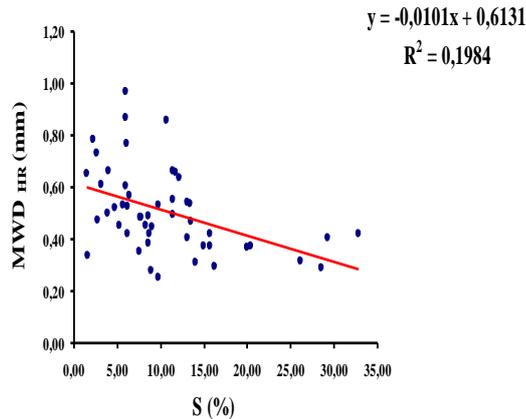


Figure 19. Relation MWD_{HR} - Sable

Les teneurs en sables influencent de façon négative le test HR pour les sols étudiés. Ceci concorde bien avec la littérature selon laquelle le sable tend à favoriser la compaction des sols par le comblement des vides, et donne la baisse de la stabilité structurale des sols (Duval et *al.*, 2007).

2.1.3. Relation MWD_{HR} - Taux de matière organique

La représentation graphique de la relation entre MWD_{HR} et le taux de matière organique est illustrée par la figure 20. Le nuage de points forme un angle positif avec l'horizontale, laisse apparaître une corrélation positive entre les deux paramètres. Effectivement, avec $p = 0.0001$ (très hautement significatif) et $r = 0.65$ est positif, ce qui montre que globalement, l'augmentation des teneurs en matière organique dans le sol s'accompagne par celle du MWD_{HR} . L'équation de régression linéaire simple est de type $MWD_{HR} = 0.1158 MO + 0.1624$.

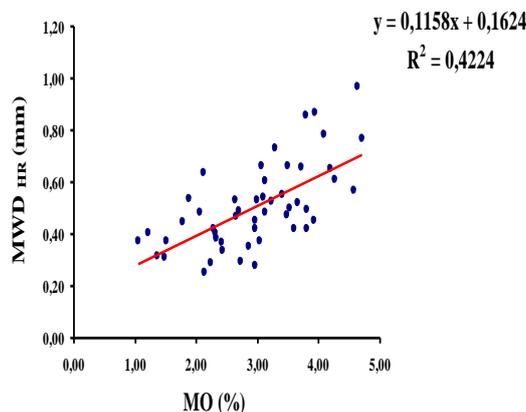


Figure 20. Relation MWD_{HR} - Taux de matière organique

Les résultats montrent que la relation entre le MWD_{HR} et la matière organique liée est meilleure, le coefficient de corrélation est très hautement significatif ($p = 0.0001$ et $r = 0.61$) et un nuage de points plus aligné (figures 21), comparé à la matière organique légère où le nuage de points est plus dispersé avec un $r = 0.35$ ($p = 0.013$) mais significatif (figures 22).

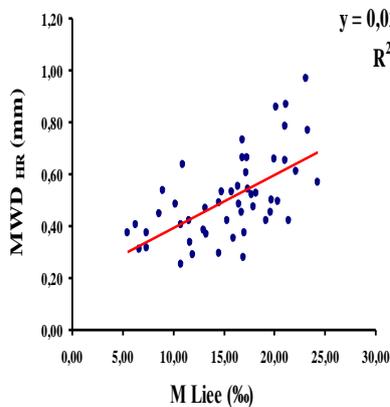


Figure 21. Relation MWD_{HR} - Taux de matière liée

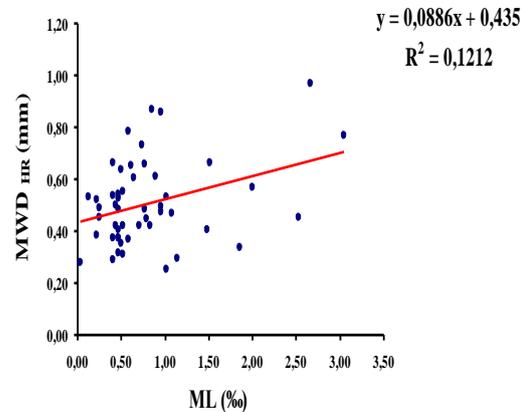


Figure 22. Relation MWD_{HR} - Taux de matière légère

L'influence de la matière organique sur la stabilité structurale a fait l'objet de nombreuses études (Roose, 1984 ; Marshall et Holmes, 1988 ; Abiven, 2004 ; Saidi, 2004 ; Zibilske et Bradford, 2007). Dans l'ensemble, les résultats obtenus font apparaître que l'augmentation de la MO s'accompagne de l'augmentation du MWD_{HR} . En effet, Tate (1987) a montré que la formation d'agrégats stables à l'eau est fortement corrélée à la teneur en matières organiques du sol. L'insuffisance de cette dernière entraîne donc une perturbation importante de la stabilité structurale du sol, conduisant à une perte de la macro-agrégation ($>250 \mu m$) et par conséquent au tassement et à l'érosion (Haider, 1992).

Chenu et Balabane (2001) estiment pour leur part que la stabilité structurale d'un sol dépend à la fois de la quantité d'humus présente et de l'activité biologique qui varie selon les apports organiques au sol. En effet, la matière organique liée est considérée comme un colloïde, elle forme un ciment et influe par son hydrophobicité sur l'amélioration de la stabilité des sols, tandis que la fraction légère, son rôle est plus important vis-à-vis de la compaction du sol. Par ailleurs, sa biodégradation, qui dépend de son coefficient isohumique, constitue une réserve d'humus.

D'après les résultats obtenus, la matière organique liée semble être le principal facteur responsable de la résistance des agrégats (agrégats de taille $<250 \mu m$) après le traitement HR. Cette résistance est éventuellement associée à l'hydrophobicité de la matière organique. Darboux et al. (2007) expliquent que cet aspect de la matière organique par le ralentissement de la pénétration de l'eau dans les agrégats, donnant lieu à une diminution de l'intensité de l'éclatement, tout en augmentant la stabilité structurale.

2.1.4. Relation MWD_{HR} - Taux des acides fulviques libres

L'analyse statistique montre que la relation entre les taux des acides fulviques libres et le MWD_{HR} est hautement significative ($p = 0.009$; $r = 0.36$). Néanmoins, le nuage de points ne présente pas une forme explicite (figure 23). L'équation de la régression linéaire simple est de type $MWD_{HR} = 0.0817 AFL + 0.4323$.

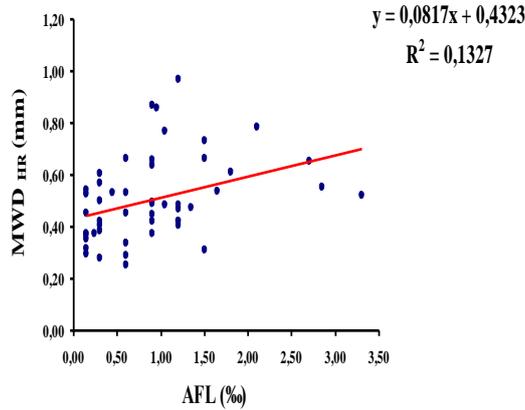


Figure 23. Relation MWD_{HR} - Taux des acides fulviques libres

La figure 23 montre la relation entre le test HR et les acides fulviques libres. Il est observé que l'augmentation des taux AFL s'accompagne d'une augmentation des valeurs du MWD_{HR} .

Dans l'ensemble, la nature chimique des AFL et les mécanismes aboutissant à leur formation n'ont pas fait l'objet de nombreux travaux, ce qui laisse supposer que les connaissances acquises ne peuvent pas être considérées comme satisfaisantes (Volkoff et Cerri, 1978).

Toutefois, leur influence sur la stabilité structurale peut être expliquée par la similitude de leurs propriétés à celles des autres substances humiques, leur procurant ainsi, la capacité d'améliorer la stabilité structurale des sols.

2.1.5. Relation MWD_{HR} - Taux des substances humiques extraites par le pyrophosphate de sodium

Les figures 24 et 25 présentent des nuages de points laissant apparaître une tendance croissante. Cela indique qu'il y a augmentation du MWD_{HR} en même temps que l'accroissement des substances humiques extraites par le pyrophosphate de sodium avec un $r = 0.47$ ($p = 0.001$ très hautement significatif), de même pour les acides humiques extraits par le pyrophosphate de sodium avec $r = 0.45$ ($p = 0.001$) ; les équations de régression respectives sont $MWD_{HR} = 0.0378 SHP + 0.2841$ et $MWD_{HR} = 0.0506 AHP + 0.3263$.

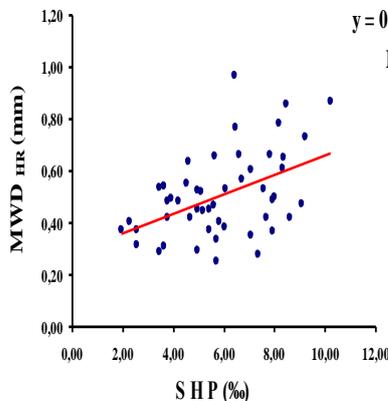


Figure 24. Relation MWD_{HR} - Taux des substances humiques (Pyrophosphate de sodium)

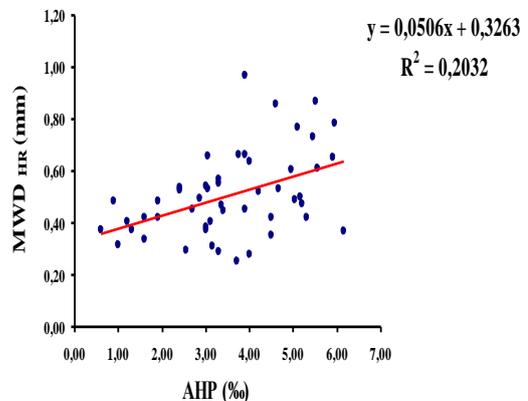


Figure 25. Relation MWD_{HR} - Taux des acides humiques (Pyrophosphate de sodium)

D'après ces résultats, cet effet peut être expliqué par le fait que les acides humiques gris (AHP) sont les plus polymérisés et le plus souvent liés aux argiles en formant de petits agrégats résistants (Chamayou et legros, 1989). Les travaux d'Albrecht et *al.* (1992) ont montré que la matière organique est responsable de l'amélioration de la stabilité structurale et essentiellement celle liée aux argiles.

2.1.6. Relation MWD_{HR} - Taux des substances humiques extraites par la soude

La relation entre le test HR et le taux des substances humique extraites par la soude (figure 26) se place dans le cadre d'une relation linéaire très hautement significative, le nuage de points parait peu dispersé présentant un coefficient de corrélation de 0.54 ($p = 0.0001$).

L'équation du modèle s'écrit comme suit $MWD_{HR} = 0.0516 SHS + 0.2954$.

Cependant, dans cette relation, le nuage de points est plus dispersé que celui de la précédente, mais étant toujours très hautement significative ($p = 0.0001$; $r = 0.48$) (figure 27).

L'équation de la droite de régression se présente sous la forme $MWD_{HR} = 0.0506 AHS + 0.3735$.

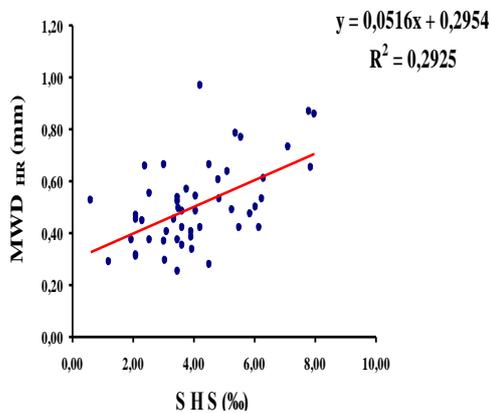


Figure 26. Relation MWD_{HR} - Taux des substances humiques (Soude)

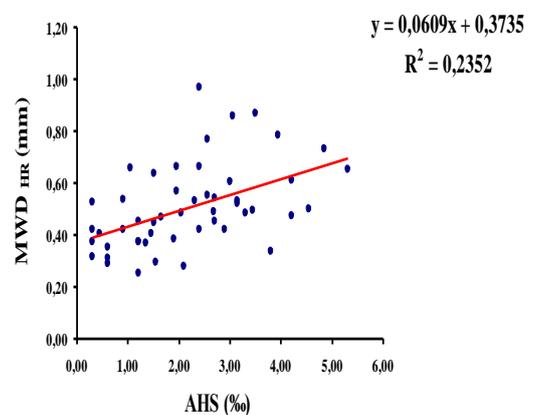


Figure 27. Relation MWD_{HR} - Taux des acides humiques (Soude)

D'après les corrélations obtenues, la présence des substances humiques extraites par la soude améliore la stabilité structurale (HR). Les AHS expliquent à eux seuls 23.52 % de l'amélioration de la stabilité pour le test HR.

Les acides humiques bruns (AHS) se caractérisent dans l'ensemble par des chaînes aliphatiques plus longues que celle des acides humiques gris, contractant ainsi avec l'argile des liaisons plus faciles à rompre (Duchaufour et *al.*, 1970). Toutefois, McCarthy et *al.*, (1990) estiment qu'en raison de leur constitution macromoléculaire et leurs propriétés colloïdales spécifiques, ils peuvent assurer, temporairement, la cohésion des particules élémentaires du sol, et par conséquent contribuent à l'amélioration de la stabilité structurale du sol.

2.1.7. Relation MWD_{HR} - Taux des substances humiques (AF, AH, H)

La figure 28 présente la corrélation entre les variations de concentration en SHPS dans le sol et l'évolution de stabilité structurale mesurée par le test HR. L'analyse du nuage de points montre clairement que l'augmentation du MWD_{HR} est accompagnée dans de nombreux cas par celles des SHPS. On observe une corrélation très hautement significative ($p = 0.0001$; $r = 0.54$) entre les concentration en SHPS et l'amélioration de cette stabilité, l'équation de la droite est de type $MWD_{HR} = 0.0256 SHPS + 0.2516$.

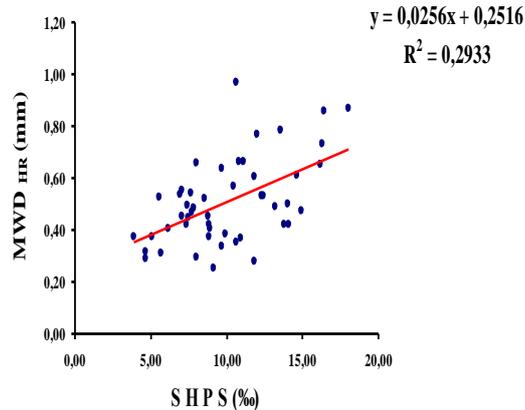


Figure 28. Relation
MWD_{HR} - Taux des substances humiques
(Pyrophosphate de sodium et la soude)

La relation entre la stabilité structurale HR et la somme des acides fulviques extraits au pyrophosphate de sodium et ceux extraits par la soude (AF) présente une tendance linéaire avec un nuage de points peu dispersés, laissant apparaître une augmentation du MWD_{HR} accompagnée généralement par celles des taux d'acides fulviques (figure 29), le coefficient de corrélation r est égal à 0.34 et $p = 0.017$ (significative), tandis que l'équation de la droite de régression est de la forme $MWD_{HR} = 0.0312 AF + 0.3742$.

Entre le MWD_{HR} et les acides humiques (les acides humiques extraits au pyrophosphate de sodium et ceux extraits par la soude), la forme du nuage de points apparaît avec une tendance croissante. Nous constatons que les acides humiques sont plus corrélés avec le MWD_{HR} que les acides fulviques se présentant avec un $r = 0.52$ et $p = 0.0001$ (très hautement significative), l'équation de régression linéaire simple est de type $MWD_{HR} = 0.0347 AH + 0.3075$ (figure 30).

Donc apparemment, les acides humiques influent plus sur la stabilité structurale HR que les acides fulviques.

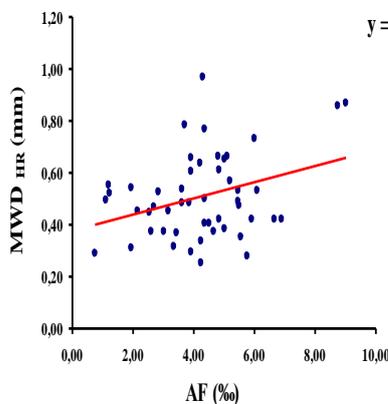


Figure 29. Relation
MWD_{HR} - Taux des acides fulviques

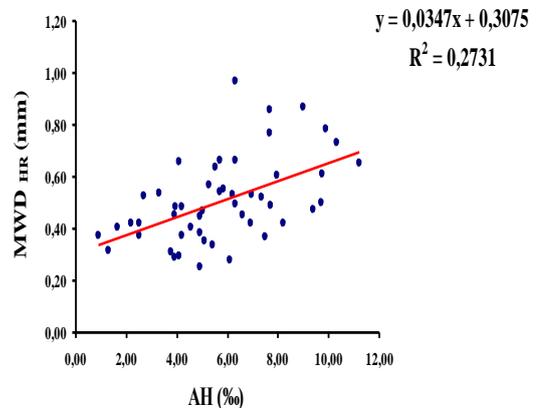
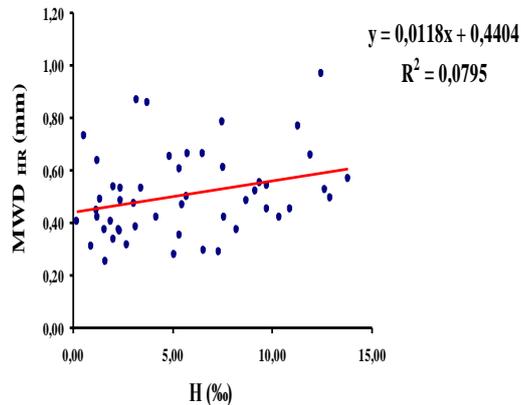


Figure 30. Relation
MWD_{HR} - Taux des acides humiques

L'étude de la relation entre le test de stabilité HR et le taux d'humine sur les échantillons prélevés représenté dans la figure 31 fait ressortir un nuage de points plus ou moins dispersés, n'indiquant

pas de tendance particulière, mais avec un coefficient de corrélation significatif égal à 0.28 ($p = 0.047$). L'équation de la relation s'écrit $MWD_{HR} = 0.0118 H + 0.4404$.



**Figure 31. Relation
MWD_{HR} - Taux d'humine**

Des corrélations significatives entre les différentes substances humiques et la MWD_{HR} (figures 29, 30 et 31) indiquent que l'ensemble de ces fractions améliore la stabilité structurale par l'HR. Ainsi, les AH expliquent à eux seuls 27.31 % de cette amélioration, comparativement aux deux autres fractions AF (11.24 %) et H (7.95 %).

Cette amélioration peut être expliquée par leurs structures analogues (AH, AF, H), d'autant plus que les acides fulviques sont des précurseurs des acides humiques (Volkoff et Cerri, 1978).

En effet, d'après Balesdent (1996), ces structures présentent des noyaux aromatiques reliés par des chaînes aliphatiques et des groupements fonctionnels, procurant à ces fractions une influence sur la fertilité du sol en améliorant sa structure et en augmentant l'activité biologique.

Ces substances humiques jouent le rôle de ciment entre les particules du sol en formant des agrégats, permettant ainsi l'échange gazeux, la perméabilité et la stabilisation de la structure du sol (Stevenson, 1982).

D'autre part, Chenu *et al.* (2000) et Cosentino (2006) observent que l'addition des acides humiques au sol augmente immédiatement l'agrégation, mettant en évidence leur effet direct, sans doute via une augmentation de l'hydrophobie ce qui réduit la vitesse d'humectation des agrégats.

Les résultats mettent en évidence que l'amélioration de la stabilité structurale, via le test HR pour les sols étudiés, est assurée par l'ensemble des fractions humiques, mais plus précisément par les deux fractions acides humiques et acides fulviques. Des résultats semblables ont été obtenus par Piccolo et Mbagwu (1999) ; Annabi *et al.* (2007) et par Ashagrie *et al.* (2007) cités par Bouajila et Gallali (2008).

En conclusion les résultats révèlent que les matières organiques jouent un rôle important dans la stabilité de la structure de ces sols et expliquent 42.24 % des variations de la stabilité structurale à l'HR. Ce comportement s'explique par le rôle positif des différentes fractions organiques sur la stabilité de ces sols.

Ces différentes fractions organiques (les substances humiques) possèdent des caractères macromoléculaires et des propriétés colloïdales et forment entre les molécules organiques et les

argiles des liens stables, donnant ainsi, avec les particules du sol, des agrégats stables (Balesdent, 1996).

L'amélioration de la stabilité structurale est due principalement aux AH qui forment le plus souvent avec les argiles un complexe colloïdal appelé complexe argilo-humique (CAH). En effet, selon Andreux et *al* (1984), dans les sols, pratiquement tous les types de liaisons sont possibles et chaque pédogenèse peut être caractérisée par la présence dominante d'un ou plusieurs types d'associations organo-minérales. En plus, leur caractère hydrophobe, grâce auquel la pénétration de l'eau dans les agrégats est freinée, diminue l'intensité de l'éclatement et augmente de ce fait la stabilité structurale (Le Bissonnais, 1996a ; Chenu et *al.*, 2000 ; Cosentino et *al.*, 2006 et Darboux et *al.*, 2007).

Le deuxième constituant du sol agissant sur la stabilité structurale est le calcaire total présentant un effet améliorant de 33 % sur la stabilité HR. Contrairement à ces deux derniers, le sable influence négativement sur la stabilité structurale avec le test HR.

L'efficacité de la matière organique est particulièrement observée sur les classes d'agrégats de petite taille (Albrecht et *al*, 1992). De ce fait, la formation de croûte de battance est ralentie, laissant un matériau non cohésif en surface. C'est ce qui explique une meilleure résistance à la battance et l'érosion des couches superficielles du sol enrichies par la matière organique (Labreuche et Bodet, 2001). Le mécanisme d'éclatement total, lié au piégeage de l'air lors de l'humectation des agrégats, permet de fournir des indications globales et tendancielle sur les comportements des sols en fonction de leur hydrophobicité (Chenu, 2006).

Globalement, les résultats des corrélations entre la stabilité structurale et les différents paramètres d'étude révèlent que la matière organique et le calcaire total peuvent être considérés comme des indicateurs fiables pour la prédiction de la stabilité structurale à l'HR.

2.2. Test d'humectation lente (MWD_{HL})

A partir de la matrice de corrélations (tableau XVIII), nous avons constaté qu'il n'y a que deux variables exogènes, dont le coefficient de corrélation est significatif, il s'agit des PS et de A.

2.2.1. Relation MWD_{HL} - Polysaccharides (PS)

La corrélation entre les polysaccharides dans le sol et l'évolution de la stabilité structurale mesurée par le test HL est présentée à la figure 32. Le nuage de points représenté dans le graphique est peu dispersé et montre une tendance positive des PS sur MWD_{HL}. On observe une corrélation significative entre l'amélioration de la stabilité structurale à l'HL et l'évolution de la concentration en polysaccharides avec un $r = 0.35$ ($p = 0.012$). L'équation de régression linéaire obtenue est $MWD_{HL} = 0.0007 PS + 1.5922$.

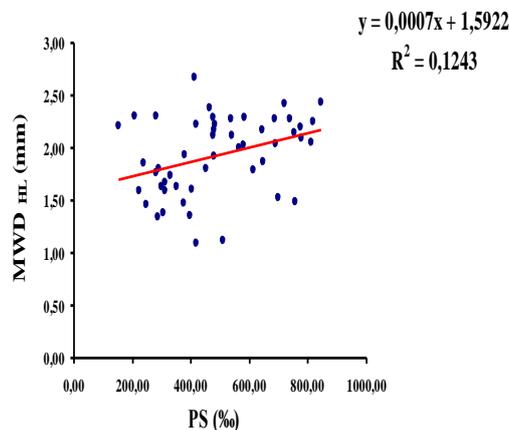


Figure 32. Relation MWD_{HL} – Polysaccharides (%)

Depuis de nombreuses années, les polysaccharides ont fait l'objet d'investigations par la communauté scientifique et sont ainsi reconnus comme l'un des agents de la stabilité structurale. On peut citer Acton *et al.* (1962) ; Chenu (1989) ; Cheshire et Haynes (1990) ; Degens et Sparling (1996) ; Abiven (2004) et Liu et Bomke (2005). D'après les travaux réalisés par Abiven, (2004) l'effet des polysaccharides est associé au test à l'humectation lente, correspondant aux mécanismes de gonflement différentiel, de micro-fissuration et d'éclatement partiel. En revanche, ces deux derniers correspondent bien aux contraintes que peuvent exercer une pluie fine ou une infiltration d'eau à l'intérieur du profil. L'énergie appliquée dans ce cas est faible, et correspond au mode de stabilisation des agrégats par les polysaccharides (Le Bissonnais, 1996a).

Selon Cheshire et Hayes (1990), la résistance exercée par les polysaccharides est plutôt de faible intensité à l'échelle du macro-agrégat. Ces derniers agissent comme des "glus" au sein des agrégats du sol (Tisdall et Oades, 1982). En plus, leurs fonctions hydrophiles permettent aussi d'atténuer l'effet du mécanisme d'éclatement dans le sol en absorbant une partie de l'eau entrant dans la porosité de l'agrégat. Néanmoins leurs actions dépendent essentiellement du nombre de liaisons polysaccharides - particules de sol. Ainsi une relation quantitative de la concentration en polysaccharides et de la stabilité structurale pour une faible contrainte est donc possible (Chenu, 1989).

2.2.2. Relation MWD_{HL} - Argile

La relation entre la stabilité structurale mesurée par le test HL et le taux d'argile (figure 33), se place dans le cadre d'une relation linéaire significative. Le nuage de points paraît peu dispersé et montre que l'augmentation des teneurs en argile s'accompagne par une augmentation du MWD_{HL} , le coefficient de corrélation est de 0.30 ($p = 0.034$) ; l'équation de la droite de régression s'écrit $MWD_{HL} = 0.0098 A + 1.4722$.

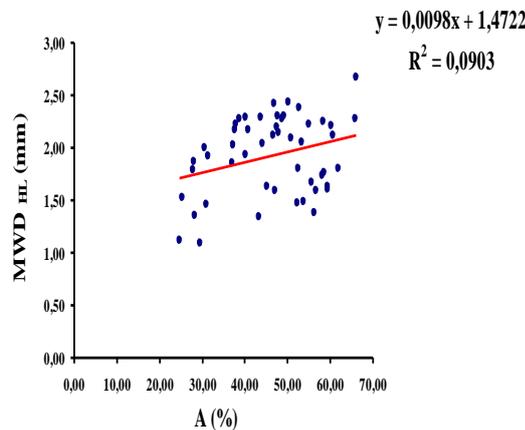


Figure 33. Relation MWD_{HL} – Argile (%)

La relation entre la stabilité structurale et les teneurs en argile pour le test HR s'explique par l'effet de la cohésion. Cette cohésion est plus élevée pour des particules de petite dimension, elle varie avec la teneur en argile. Généralement, dès que les teneurs en argile sont plus élevées, on observe une augmentation de la cohésion entre les particules (Guérif, 1988 in Schubetzer *et al.*, 2007).

Selon Monnier (1984), c'est la mouillabilité du sol qui régie la pression interne au cours de l'humectation. Elle est considérée comme le deuxième facteur important de la stabilité après la cohésion.

Aux faibles humidités, l'eau représente le principal agent de liaison, non seulement entre particules argileuses par l'intermédiaire des cations échangeables, mais entre particules du squelette par des forces de tension superficielle (Chamayou et Legros, 1989).

La cohésion et la liaison entre les particules argileuses peuvent être rompue en humidifiant la matrice argileuse au delà d'un certain seuil, ainsi, lorsqu'on met certaines argiles au contact de l'eau ou d'une solution, on constate que l'équidistance entre les cristallites s'accroît, ceci est dû à l'introduction des molécules entre les particules, ce qui écarte et annule les forces de Van Der Waals. Le film d'eau n'assurant plus la cohésion, l'expansion de la double couche diffuse, provoque alors la dispersion des particules argileuses (Orcel et al., 1963 ; Hénin et al., 1969). Néanmoins, pour obtenir une bonne cohésion du sol, il faut diminuer la mouillabilité des agrégats, réduire leur gonflement et accroître les forces de liaison.

Les résultats obtenus font ressortir que les concentrations en polysaccharides et les teneurs en argiles favorisent l'amélioration de la stabilité structurale pour le test HL selon respectivement des variations de 12.43 % et 9.03 %. Ces deux variables exogènes pourront être introduites dans les fonctions de prédiction pour le test HL.

2.3. Test de désagrégation mécanique (MWD_{DM})

A partir des variables représentées dans les régressions simples prises de la matrice de corrélation (tableau XVIII), il ressort sept (07) variables exogènes corrélées positivement avec le test MWD_{DM} . Il s'agit du taux de la MO, M liée, $CaCO_3$, CEC, Ca + Mg, A et S.

2.3.1. Relation MWD_{DM} - Calcaire total

La relation entre le test DM et le calcaire total est statistiquement significative avec $r = 0.29$ ($p = 0.040$) (figure 34), la corrélation est positive. L'allure de ce nuage ne suggère aucune tendance particulière. L'équation de la droite se présente comme suit: $MWD_{DM} = 0.015 CaCO_3 + 1.1773$.

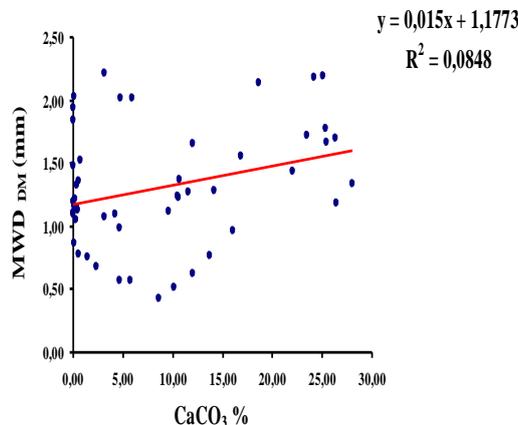


Figure 34. Relation MWD_{DM} – Calcaire total

L'influence du calcaire sur la stabilité structurale dans le sol à fait l'objet de nombreuses observations (Chamayou et legros, 1989 ; Sidi et Pansu, 1990 ; Abiven, 2004 ; Wuddivira et Camps-Roach, 2006 ; Bouajila et Gallali, 2008). Dans l'ensemble, les résultats obtenus font apparaître que l'augmentation du premier paramètre s'accompagne, forcément, par l'augmentation du second. Pour notre traitement, les résultats obtenus montrent également la même relation entre les deux éléments.

2.3.2. Relation MWD_{DM} - Capacité d'échange cationique et les bases échangeable

La relation entre la CEC et le MWD_{DM} est linéaire et est significative au seuil de 5 % (figure 35). Dans l'ensemble, les points expérimentaux sont assez dispersés, indiquant seulement une tendance à l'augmentation du MWD_{DM} parallèlement à celle de la capacité d'échange cationique (cmoles/kg de terre).

Le coefficient de corrélation est de 0.29 ($p = 0.043$), l'équation de régression est de type $MWD_{DM} = 0.0283 CEC + 0.7239$.

L'évolution de MWD_{DM} en fonction des bases échangeables (Ca+Mg) présente la même configuration (figure 36). Le coefficient de corrélation étant de 0.30 ($p = 0.035$), tandis que l'équation du graphe s'écrit comme suit $MWD_{DM} = 0.0301 (Ca+Mg) + 0.7129$.

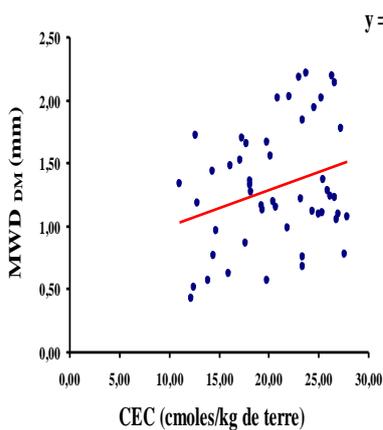


Figure 35. Relation MWD_{DM} – CEC (cmoles/kg de terre)

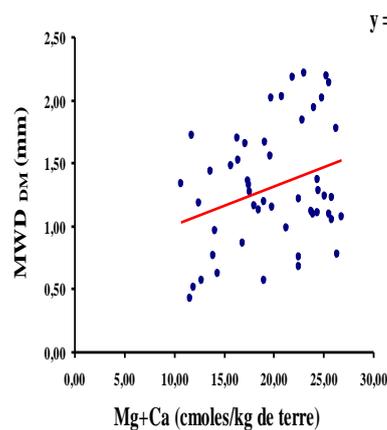


Figure 36. Relation MWD_{DM} – Ca+Mg (cmoles/kg de terre)

Selon les résultats obtenus, l'effet de la capacité d'échange cationique sur la stabilité structurale est plus marqué par les cations échangeables. Cet effet est dû à l'hydratation des cations bivalents, et plus particulièrement le calcium, d'autant plus que son action est accrue en présence de l'argile (Chamayou et legros, 1989). Orcel *et al.* (1963) ont montré que cette association des argiles avec les cations échangeables se traduit par le phénomène de gonflement : Sur la base d'une comparaison entre la réhydratation d'une montmorillonite sodique (monovalents) et d'une montmorillonite calcique (bivalents), il a été observé que la montmorillonite sodique manifeste *un accroissement progressif de l'équidistance* entre les feuillets, donnant lieu à une *séparation progressive*, alors que la montmorillonite calcique a présentée un *accroissement brutal* de l'équidistance entre les feuillets. De ce fait, les cations bivalents ont une action plus intense que les monovalents.

Ainsi, le calcium joue un rôle prépondérant dans le comportement physique du sol, par son pouvoir floculant vis-à-vis des argiles et son rôle stabilisant pour les composés organiques, il contribue également à l'organisation de la structure du sol et à sa stabilité.

2.3.3. Relation MWD_{DM} - Argile

L'analyse statistique montre que la relation entre la teneur en argile et la stabilité structurale avec le test DM est hautement significative ($p = 0.010$; $r = 0.36$) (figure 37). L'équation de régression linéaire s'écrit $MWD_{DM} = 0.0153 A + 0.6002$.

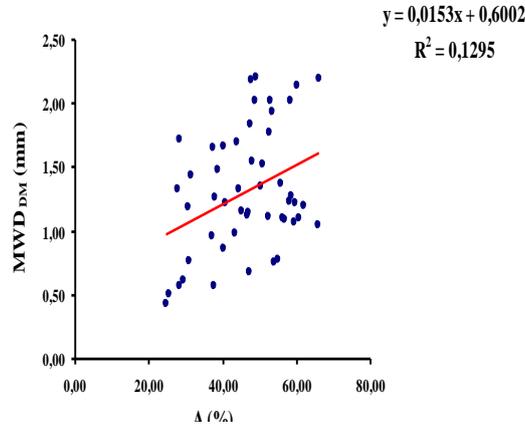


Figure 37. Relation MWD_{DM} – Argile (%)

Plusieurs recherches indiquent une *forte corrélation* entre la stabilité structurale des sols à leur teneur en argile (Monnier, 1984 ; Kemper et al., 1987 et par Elustondo et al., 1990) cité par N'Dayegamiye et Drapeau (2009). On peut considérer que parmi toutes les particules minérales élémentaires, l'intervention des argiles demeure la plus importante dans la stabilité des agrégats.

En effet, grâce à leur surface spécifique élevée et à leur charge négative permanente, les argiles ont une grande capacité d'adsorption des matières organiques en assurant, par conséquent, une grande stabilité des agrégats (Theng, 1970).

2.3.4. Relation MWD_{DM} - Sable

La figure 38 présente la relation entre le MWD_{DM} et le taux de sable. Elle présente une tendance décroissante, indiquant une relation inversement proportionnelle entre les deux paramètres. Ceci implique que l'augmentation des teneurs en sable s'accompagne d'une diminution des valeurs de stabilité structurale à la DM. Le coefficient de corrélation est significatif ($p = 0.014$; $r = -0.34$). L'équation caractéristique de la relation s'écrit sous la forme suivante $MWD_{DM} = -0.023 S + 1.5548$.

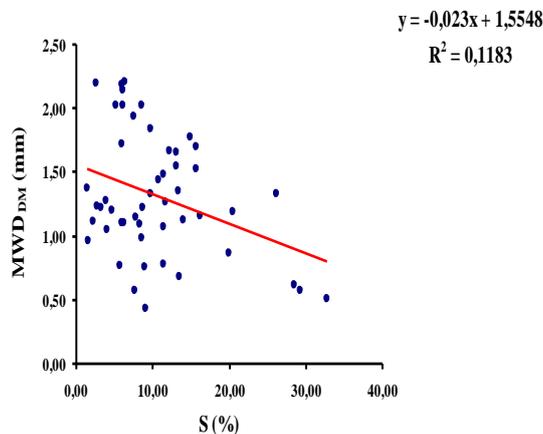


Figure 38. Relation MWD_{DM} – Sable (%)

Contrairement aux autres paramètres corrélés avec le traitement DM, l'augmentation des taux de sable dans le sol fait diminuer les valeurs du MWD_{DM} (figure 38). Les travaux réalisés par Duval et *al.* (2007) et Bouajila et Gallali (2007) confirment cet état de fait.

2.3.5. Relation MWD_{DM} - Taux de matière organique

Les résultats statistiques (tableau XVIII) révèlent que la MO est significativement corrélée avec le test DM. La représentation des données (figure 39) identifie un nuage de points plus ou moins importants et dispersés, présentant une faible tendance croissante suivant la variation des deux paramètres. Cette relation est illustrée par la droite de régression linéaire $MWD_{DM} = 0.1605 MO + 0.8342$, le coefficient de corrélation est positif et significatif ($p = 0.031$; $r = 0.30$), indiquant que l'augmentation du MWD_{DM} s'accompagne par celle des teneurs en matière organique dans le sol.

De même pour la relation entre la teneur en matière organique liée et MWD_{DM} , elle est significative avec un coefficient de corrélation de 0.33 ($p = 0.018$) (figure 40). L'équation de régression se présente sous la forme suivante $MWD_{DM} = 0.033 M_{liée} + 0.7981$, d'où la matière liée influe positivement sur la stabilité DM.

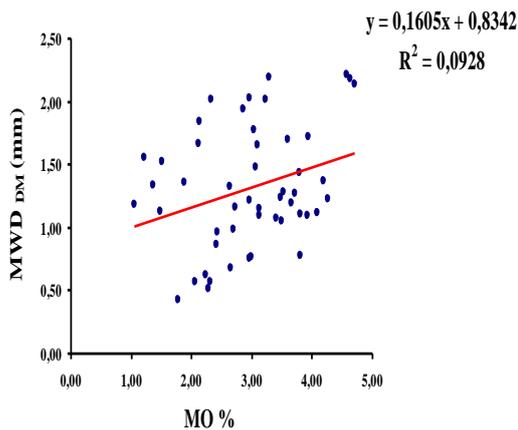


Figure 39. Relation MWD_{DM} – Taux de matière organique

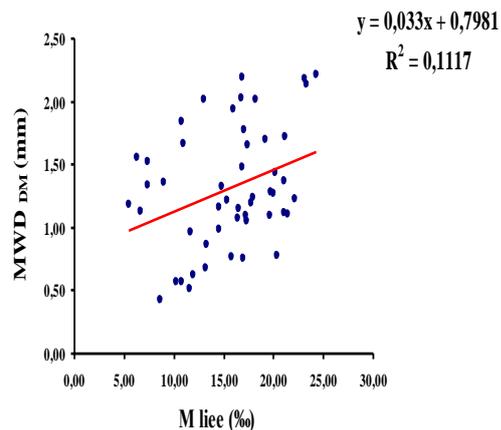


Figure 40. Relation MWD_{DM} – Taux de matière liée

Comme pour le test de HR, la matière organique a un effet sur le traitement DM, cependant c'est la fraction liée qui semble avoir une plus grand influence sur la stabilité DM, elle explique 11.17 % des variations de cette dernière.

La dégradation de la structure est intimement liée aux pertes en carbone organique, du fait que dans le sol, la basse réactivité des argiles ne permet pas à elle seule le maintien de la stabilité structurale. Celle-ci dépend du carbone organique du sol et de la biomasse microbienne, éléments-clés dans la formation d'agents agrégeants (Uzêda et *al.*, 1995).

Ce test ne met en jeu que la cohésion inter particulaire comme mécanisme de résistance à la désagrégation puisqu'il est réalisé sur des agrégats dont la porosité est saturée par l'éthanol. Le remplissage de la porosité par l'éthanol évite le phénomène d'éclatement des agrégats lors de leur imbibition en raison de la forte miscibilité de l'éthanol avec l'eau. Ainsi, selon Boiffin (1984) et Le Bissonnais (1988) les processus d'éclatement et de désagrégation sont contrôlés par l'état hydrique des agrégats.

En résumé la stabilité structurale par le test à la DM est influencée principalement par :

- les teneurs en argiles, car en condition humide, l'effet structurant de l'argile confère aux agrégats une meilleure stabilité par un accroissement de la cohésion de l'agrégat (Guérif, 1988),
- la matière organique liée, par sa contribution à la consolidation des liaisons entre les particules, conduisant ainsi à l'augmentation de la cohésion interne des agrégats (Piccolo et Mbagwu, 1999 ; Chenu, 2003).
- l'association « Mg + Ca », plus particulièrement l'effet du calcium,
- le CaCO_3 et la CEC. Le premier facteur maintient une activité biologique favorable tandis que le deuxième traduit l'action additive de l'argile et de la M.O.

Les variables exogènes citées ci dessus peuvent être utilisées comme des prédicteurs crédibles de la stabilité structurale pour le test DM.

2.4. Moyenne des trois tests (MWD_{MOY})

La matrice de corrélation (tableau XVIII) présente neuf variables exogènes corrélées avec le MWD_{MOY} , il s'agit de : AF, MO, M liée, SHS, S, A, H, CaCO_3 , SHPS.

2.4.1. Relation MWD_{MOY} - Calcaire total

Dans l'ensemble la figure 41 indique un nuage de point très dispersé, l'accroissement du taux de calcaire total est accompagné par l'augmentation du MWD_{MOY} , le coefficient de corrélation est de l'ordre 0.28 avec un $p = 0.047$ (significatif). L'équation de la relation s'écrit comme suit $\text{MWD}_{\text{MOY}} = 0.0237 \text{ CaCO}_3 + 1.484$.

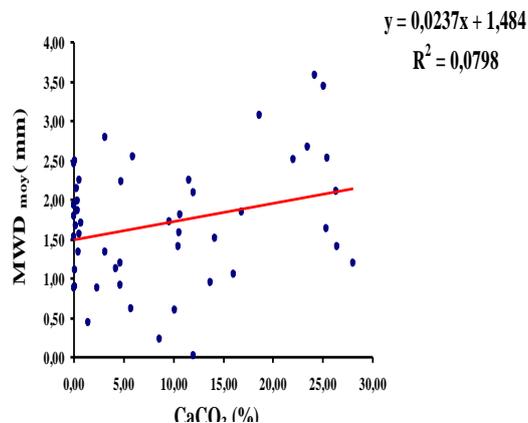


Figure 41. Relation MWD_{MOY} – Calcaire total

2.4.2. Relation MWD_{MOY} - Argile

La relation entre MWD_{MOY} et le taux d'argile, se place dans le cadre d'une relation linéaire significative ($p = 0.017$; $r = 0.34$) ; l'augmentation de l'argile s'accompagne par celle de la stabilité structurale (figure 42). La droite de tendance prend la forme suivante $\text{MWD}_{\text{MOY}} = 0.0233 A + 0.6154$.

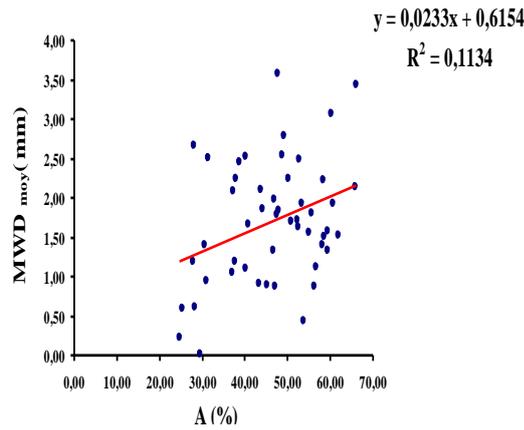


Figure 42. Relation MWD_{MOY} - Argile (%)

2.4.3. Relation MWD_{MOY} - Taux de sable

La pente de la droite est négative, elle indique que les deux variables évoluent en sens inverse (figure 43). C'est un fait connu par les scientifiques et les praticiens, en effet, l'augmentation des taux de sable induit une diminution du MWD_{MOY} . Le coefficient de corrélation est négatif et hautement significatif ($p = 0.005$; $r = -0.39$). L'équation caractéristique de la relation s'écrit sous la forme suivante $MWD_{MOY} = -0.0421 S + 2.1407$.

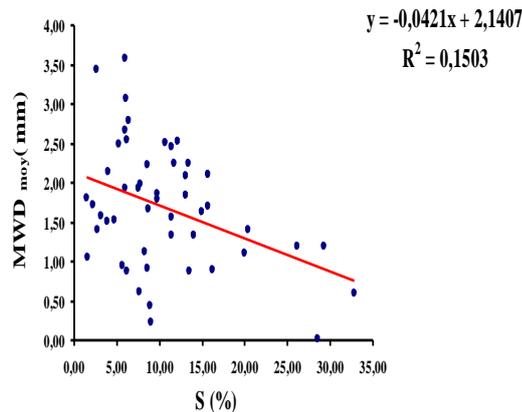


Figure 43. Relation MWD_{MOY} - Sable (%)

2.4.4. Relation MWD_{MOY} - Taux de matière organique

Une littérature relativement ancienne et dense a mis en évidence l'importance de la matière organique sur la fertilité des sols ainsi que sur leurs propriétés physiques. Les résultats présentés par les figures 44 et 45 confirment ces résultats et indiquent que ces substrats organiques améliorent notamment la stabilité structurale (MWD_{MOY}). Les pentes des deux droites sont assez fortes et positives, elles traduisent les effets favorables de ces facteurs sur le sol. Le coefficient de corrélation est identique pour les deux corrélations ($p = 0.002$; $r = 0.43$), il est positif et hautement significatif. Ces deux relations sont présentées par les équations $MWD_{MOY} = 0.3715 MO + 0.5913$ et $MWD_{MOY} = 0.0688 Mliée + 0.6244$ respectivement pour la matière organique totale et liée.

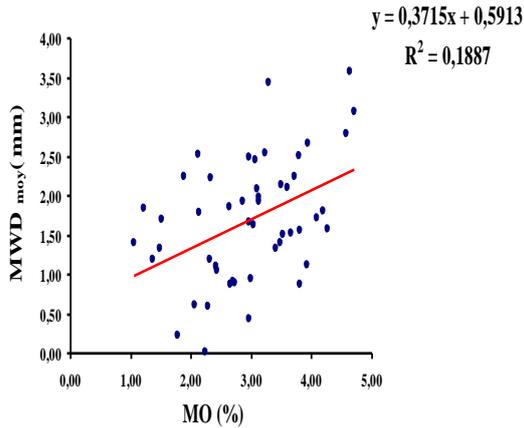


Figure 44. Relation
MWD_{MOY} – Taux de matière organique (%)

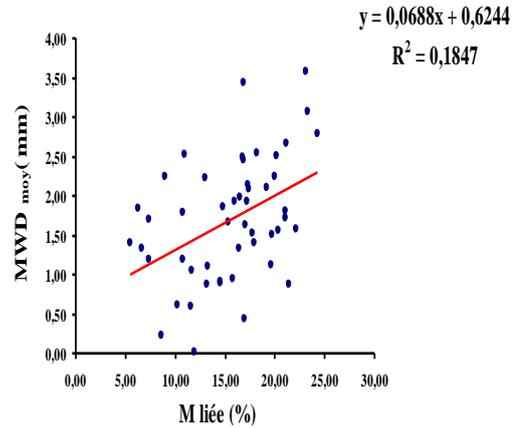


Figure 45. Relation
MWD_{MOY} – Taux de matière liée (%)

2.4.5. Relation MWD_{MOY} - Taux des acides fulviques

Malgré la dispersion du nuage des points expérimentaux, la droite de tendance est positive et significative ($p = 0.038$; $r = 0.29$), indiquant ainsi que parallèlement à l'augmentation des acides fulviques, on observe une amélioration de MWD_{MOY} (figure 46).

L'équation du graphe s'écrit comme suit $MWD_{MOY} = 0.1318 AF + 1.1371$.

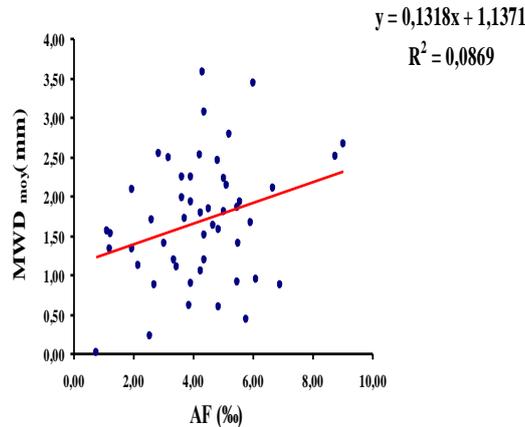


Figure 46. Relation
MWD_{MOY} – Taux des acides fulviques

2.4.6. Relation MWD_{MOY} - Taux des substances humiques extraites par le pyrophosphate de sodium et soude

Les corrélations révèlent que MWD_{MOY} est significativement corrélé au taux des substances humiques extraites par le pyrophosphate de sodium et par la soude ($p = 0.047$; $r = 0.28$) et au taux des substances humiques extraites par la soude ($p = 0.046$; $r = 0.28$). Ces résultats sont illustrés par les figures 47 et 48. Globalement l'augmentation des taux des substances humiques dans le sol s'accompagne par celle de MWD_{MOY}.

Les équations de la régression linéaire sont de type $MWD_{MOY} = 0.0639 SHPS + 1.0576$ et $MWD_{MOY} = 0.1298 SHS + 1.1641$ respectivement pour SHPS le taux SHS.

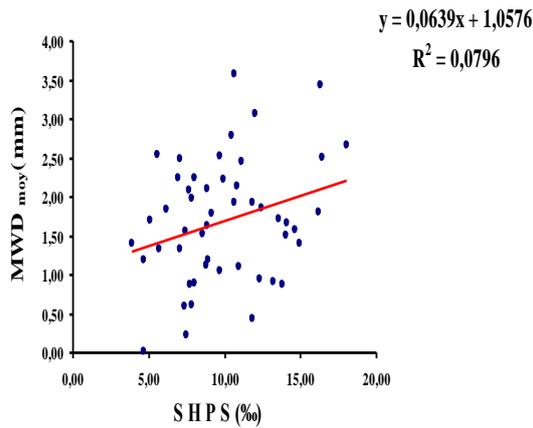


Figure 47. Relation MWD_{MOY} - Taux des substances humiques (Pyrophosphate de sodium et la soude)

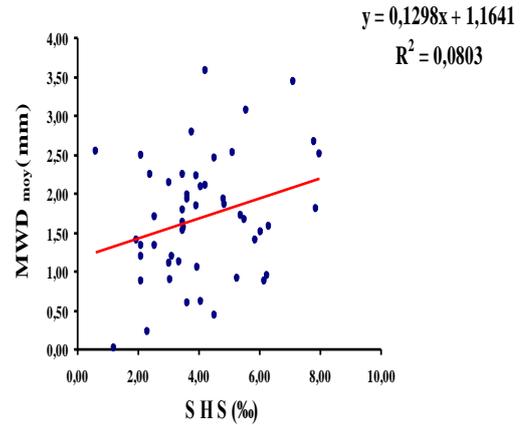


Figure 48. Relation MWD_{MOY} - Taux des substances humiques (La soude)

2.4.7. Relation MWD_{MOY} - Taux d'humine

La corrélation entre le taux d'humine et le MWD_{MOY} (figure 49) est significative ($p = 0.042$; $r = 0.29$), le nuage de points manifeste une dispersion avec un faible allongement plus ou moins croissant. Ainsi, nous observons que l'augmentation des taux d'humine s'accompagne d'une augmentation des valeurs de MWD_{MOY}. L'équation de régression linéaire simple pourrait s'écrire tel que suit $MWD_{MOY} = 0.058 H + 1.3702$.

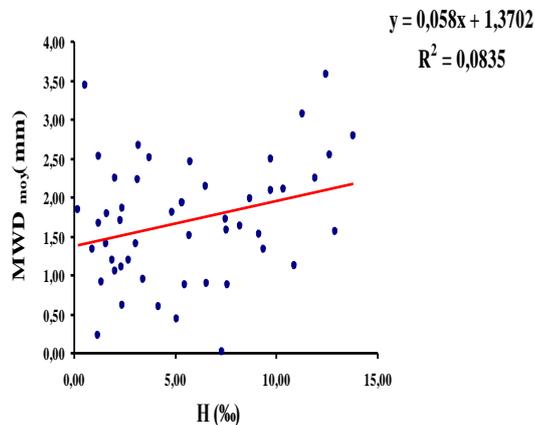


Figure 49. Relation MWD_{MOY} - Taux d'humine

Les principaux résultats obtenus pour MWD_{MOY} mettent en évidence l'effet :

- déterminant de la MO sur la stabilité structurale (MWD_{MOY}) par rapport aux autres variables (Argiles, CaCO₃, Sables), à elle seule elle représente 18.87 % des variations,

- les teneurs en argile sur la stabilité structurale (MWD_{MOY}), représentent 11.34 % de variations pour les sols étudiés,
- le taux de calcaire total ; 7.98 % de variations sont expliquées par ce facteur. Tandis que le sable influe négativement sur la stabilité structurale.

3. Réalisation de régressions multiples pour la construction des fonctions de pédotransfert

3.1. Régressions multiples pour le test à l'humectation rapide

Les résultats des régressions multiples relatifs à l'humectation rapide sont présentés dans le tableau XIX.

Tableau XIX. Régressions multiples pour le test à l'humectation rapide (HR)

| Equations de régression | Type de régression | R ² | r | P | sgn |
|--|----------------------|----------------|------|-------------------|-----|
| $MWD_{HR1} = 0.024 SHPS + 0.004 CaCO_3 + 0.224$ | Standard | 0.36 | 0.60 | $2 \cdot 10^{-5}$ | *** |
| $MWD_{HR2} = 0.035 AH + 0.006 CaCO_3 + 0.246$ | Standard | 0.40 | 0.63 | $1 \cdot 10^{-5}$ | *** |
| $MWD_{HR3} = 0.019 Mliée + 0.005 CaCO_3 + 0.147$ | Standard | 0.46 | 0.67 | $4 \cdot 10^{-7}$ | *** |
| $MWD_{HR4} = 0.132 MO + 0.005 CaCO_3$ | Pas à pas ascendante | 0.54 | 0.73 | $4 \cdot 10^{-7}$ | *** |

ns: non significative

*: significative

**: hautement significative

***: très hautement significative

L'équation de la régression multiple retenue est celle qui présente le coefficient de détermination multiple le plus élevé (0.54). Il s'agit donc de l'équation $MWD_{HR4} = 0.132 MO + 0.005 CaCO_3$

Cette équation confirme les résultats obtenus pour les relations individuelles de la stabilité structurale à l'HR. Le modèle obtenu traduit une relation évolutive en fonction de la MO et du CaCO₃, expliquant près de 54 % de la variation totale MWD_{HR} (annexe 5).

Ce modèle doit être vérifié et évalué pour les hypothèses représentées dans le tableau XX.

Tableau XX. Validation des hypothèses stochastiques et structurelles pour le test d'humectation rapide

| Hypothèses stochastiques | Validation des hypothèses | |
|--------------------------|--------------------------------|---|
| ○ H ₁ | - Cette hypothèse est vérifiée | → Test effectué avec trois répétitions pour l'ensemble des analyses chimiques, biochimiques et physiques. |
| ○ H ₂ | - Cette hypothèse est vérifiée | → La moyenne des résidus observés est nulle (annexe 5). |
| ○ H ₃ | - Cette hypothèse est vérifiée | → Le nuage de points montre que leur projection n'épouse pas une forme conique (figures 19,21). |
| ○ H ₄ | - Cette hypothèse est vérifiée | → La statistique du test vaut DW = 2,00 (annexe 4). Pour n = 50, k = 4 et α = 5% ; d1 = 1,38 et d2 = 1,72 → d2 < DW < 4-d2 (1,77 < 1,99 < 2,23). |
| ○ H ₅ | - Cette hypothèse est vérifiée | → L'examen de la matrice indique qu'il n'y a aucune corrélation significative (annexe 5). |
| ○ H ₆ | - Cette hypothèse est vérifiée | → La statistique de Shapiro & Wilk vaut 0,97572, la valeur obtenue est supérieur à 0,947 pour n = 50 et α = 5% (annexe 5). |
| Hypothèses structurelles | | |
| ○ H ₇ | - L'hypothèse 7 est vérifiée | → La régression pas à pas est appliquée principalement en ce sens. |
| ○ H ₈ | - L'hypothèse 8 est vérifiée | → Résultat obtenu avec n = 50 et k = 2 => 50 > (4+1=5). |

Les hypothèses étant vérifiées, nous pouvons évaluer la significativité de la régression et estimer les coefficients du modèle sensé être stable et fiable :

Validation par l'injection des vraies valeurs des variables explicatives.

Pour écrire le modèle de régression représentatif, les coefficients des paramètres entrant sont donnés dans le tableau XXI.

Tableau XXI. Synthèse de la régression pour le test d'humectation rapide

| N=50 | Béta | Err-type de béta | B | Err-type de B | T (45) | Niveau p |
|---------------------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Ord Orig. | | | -0,007237 | 0,105287 | -0,068733 | 0,945507 |
| MO % | 0,745951 | 0,133015 | 0,132888 | 0,023696 | 5,608017 | 0,000001 |
| CaCO₃ % | 0,335604 | 0,103905 | 0,005860 | 0,001814 | 3,229919 | 0,002316 |

Ainsi, le modèle qui relie la stabilité structurale (HR) à la matière organique et le calcaire total s'écrit comme suit :

$$MWD_{HR4} = 0.132 MO + 0.005 CaCO_3$$

Ce modèle signifie que lorsque la matière organique augmente d'une unité dans le sol, le MWD_{HR} augmente de 13.2 %. De même pour l'élément calcaire total, lorsqu'il augmente d'une unité alors le MWD_{HR} augmente de 0.5 %. Seulement, il est clair que l'effet de la MO reste nettement plus important que celui du calcaire total.

Le modèle obtenu semble confirmer les résultats obtenus pour les relations simples. De plus, les résultats relatifs à la distribution moyenne de la taille des particules après le test à l'HR montrent que l'effet d'éclatement donne d'importantes proportions de particules de petites dimensions (< 0.2 mm), communément considérées comme des micro-agrégats (< 250 μ m).

En effet plusieurs études ont affirmé que la stabilité des agrégats du sol est positivement corrélée à la teneur du sol en matière organique (Tisdall et Oades, 1982 ; Chaney et Swift, 1984 ; Dutartre et al., 1993 ; Le Bissonnais et al., 2002 et par N'Dayegamiye et Drapeau, 2009) et même le calcaire total (Hénin et al, 1969 ; Dionot, 2000 ; Abiven, 2004 et par Christen, 2009).

3.1.1. Analyse de la variance pour l'humectation rapide

D'après le tableau XXII, la statistique F égale à 13.05 est supérieure au $F_{4,45}$ ($\alpha = 95 \%$) observé sur la table. Nous en déduisons que la régression est très hautement significative.

Tableau XXII. Analyse de la variance pour le test d'humectation rapide

| Effet | Sommes Carrés | dl | Moyenne Carrés | F | Niveau p |
|-----------------|-----------------|----------|-----------------|-----------------|------------------|
| Régress. | 0,693921 | 4 | 0,173480 | 13,05179 | 0,0000000 |
| Résidus | 0,598125 | 45 | 0,013292 | | |
| Total | 1,292046 | | | | |

3.1.2. Comparaison entre valeurs vraies et valeurs prévues pour le test d'humectation rapide

Si nous faisons une reproduction de ce test en injectant les vraies valeurs des composantes, nous obtenons la courbe ci-dessous illustrée en rouge (figure 50). Les vraies valeurs du test font ressortir la courbe en bleu.

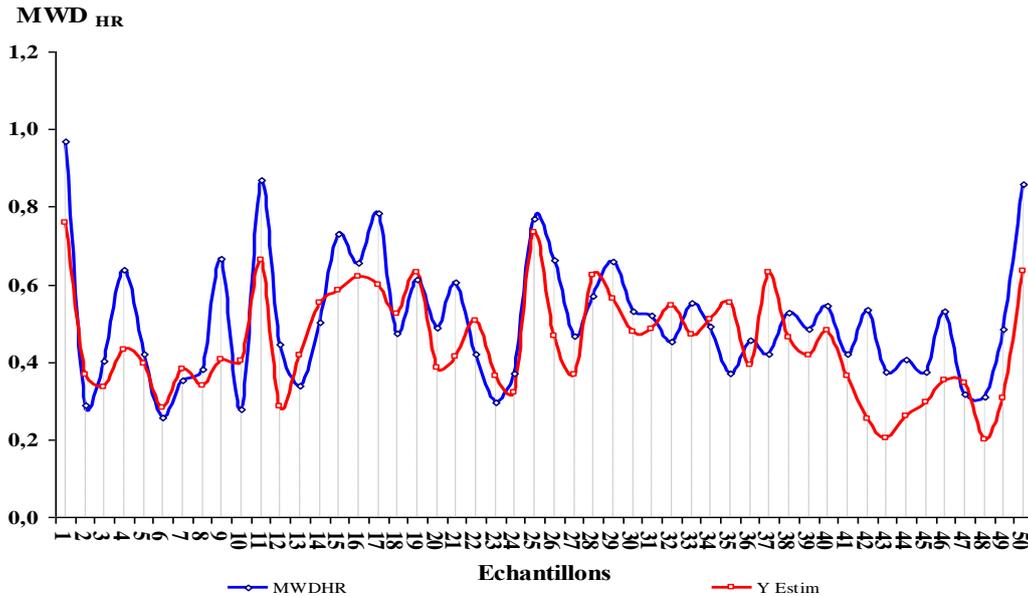


Figure 50. Valeurs vraies et valeurs prévues pour le test à l'humectation rapide

L'examen de la figure 50 fait ressortir que les deux courbes ont approximativement la même allure. Ce résultat ne permet pas de progresser plus dans nos conclusions. Pour cela, il est utile d'appuyer ces résultats graphiques par le calcul de quelques statistiques (tableau XXIII).

Tableau XXIII. Valeurs vraies et valeurs prévues pour le test à l'humectation rapide

| | MWD _{HR} | Y Estim |
|----------------------------|---------------------|---------|
| Moyenne | 0,51 | 0,45 |
| Variance | 0,03 | 0,02 |
| F _{test (50,50)} | 1,46 | |
| F _{table (50,50)} | 1,60 | |
| Conclusion | Variances homogènes | |

Nous remarquons que les deux échantillons possèdent des moyennes voisines, il s'agit d'un écart de 0.06. Quant aux variances, le test de Fisher indique que celles-ci sont homogènes. Ce résultat suppose que les données des deux échantillons sont dispersées d'une manière similaire et qu'elles présentent un bon ajustement du nuage de points.

L'application de l'analyse de la variance pour le modèle du test à l'HR est présentée dans le tableau XXIV.

Tableau XXIV. Analyse de la variance entre MWD_{HR} et MWD_{HR}Estim

| ANALYSE DE VARIANCE | | | | | | |
|---------------------------|------------------|------------------|--------------------|------------|-------------|------------------------|
| Source des variations | Somme des carrés | Degré de liberté | Moyenne des carrés | F | Probabilité | Valeur critique pour F |
| Entre Groupes | 0,08877014 | 1 | 0,08877014 | 3,99089454 | 0,04851853 | 3,93811088 |
| A l'intérieur des groupes | 2,17983042 | 98 | 0,02224317 | | | |
| Total | 2,26860056 | 99 | | | | |

L'analyse de la variance indique qu'il existe une différence statistique significative, entre les deux moyennes, $F_{cal} = 3,99 > F_{table} = 3,94$, mais elle est faible vu que la $P_{value} = 0,048$, c'est-à-dire que la différence existe avec un risque d'erreur ne dépassant pas les 5 %. Dans l'ensemble, pour un modèle où l'on retient que deux paramètres, à savoir MO et CaCO₃, qui expliquent à eux seuls près de 54 % de la variation globale, nous pouvons conclure que la fonction pédotransfert obtenue est assez bonne.

3.2. Régressions multiples pour le test à l'humectation lente

Les résultats des régressions multiples pour le test à l'humectation lente sont mentionnés dans le tableau XXV.

Tableau XXV. Régressions multiples pour le test à l'humectation lente (HL)

| Equations de régression | Type de régression | R ² | r | P | sgn |
|---|----------------------|----------------|------|-----------------------|-----|
| $MWD_{HL1} = 0.001 PS + 0.012 A + 0.983$ | Standard | 0.25 | 0.50 | $10.07 \cdot 10^{-4}$ | *** |
| $MWD_{HL2} = 0.001 PS + 0.255 ML + 0.011 A + 0.561$ | Pas à pas ascendante | 0.39 | 0.62 | $3.9 \cdot 10^{-5}$ | *** |

ns: non significative

*: significative

**: hautement significative

***: très hautement significative

L'analyse des deux équations permet d'indiquer que le type de régression « pas à pas ascendante » est le plus indiqué avec $MWD_{HL2} = 0.001 PS + 0.255 ML + 0.011 A + 0.561$

Ce modèle montre que, contrairement à la régression « standard », il est composé de trois paramètres (PS, ML et A) avec un coefficient de détermination multiple élevé (0.39). Ces variables (PS, ML, A) expliquent près de 39.12 % de la variation totale du test d'humectation lente (annexe 6). Nous devons maintenant vérifier les hypothèses stochastiques et structurelles de cette régression (tableau XXVI).

Tableau XXVI. Validation des hypothèses stochastiques et structurelles pour le test à l'humectation lente

| Hypothèses stochastiques | Validation des hypothèses | |
|--------------------------|----------------------------------|--|
| ○ H ₁ | - Cette hypothèse est vérifiée | → Le travail étant basé sur des outils de mesure précis. <i>Test effectué avec trois répétitions</i> pour l'ensemble des analyses chimiques, biochimiques et physiques. |
| ○ H ₂ | - Cette hypothèse est vérifiée | → La moyenne des résidus observés est nulle (annexe 6). |
| ○ H ₃ | - Cette hypothèse n'est vérifiée | → Le nuage de points ne montre pas de forme indiquant une <i>hétéroscédasticité</i> (figures 33, 34 et annexe 6). |
| ○ H ₄ | - Cette hypothèse est vérifiée | → La statistique du test vaut DW = 2,00 (annexe 4). Pour n = 50, k = 3 et α = 5% ; d1 = 1,42 et d2 = 1,67 → d2 < DW < 4-d2 (1,67 < 1,86 < 2,23). => Hypothèse nulle acceptée (-0,062707 n'est pas significativement différente de zéro). |
| ○ H ₅ | - Cette hypothèse est vérifiée | → L'examen de la matrice indique qu'il n'y a aucune corrélation significative (annexe 6). |
| ○ H ₆ | - Cette hypothèse est vérifiée | → La statistique de <i>Shapiro & Wilk</i> vaut 0.99167, la valeur obtenue est supérieur à 0,947 pour n = 50 et α = 5% (annexe 6). |
| Hypothèses structurelles | | |
| ○ H ₇ | - L'hypothèse 7 est vérifiée | → La régression pas à pas est appliquée principalement en ce sens. |
| ○ H ₈ | - L'hypothèse 8 est vérifiée | → Résultat obtenu avec n = 50 et k = 3 => 50 > (3+1=4). |

Les hypothèses étant vérifiées, nous pouvons à présent parler de modèle de régression valide et d'estimateurs de coefficients convergents.

Les coefficients des paramètres entrant dans le modèle de régression sont donnés dans le tableau XXVII.

Tableau XXVII. Synthèse de la régression pour le test d'humectation lente

| N=50 | Bêta | Err-Type de bêta | B | Err-Type de B | T (46) | Niveau p |
|----------|-----------------|------------------|-----------------|---------------|----------|----------|
| Ord Orig | | | 0,561487 | 0,262052 | 2,142654 | 0,037465 |
| PS ‰ | 0,650162 | 0,138352 | 0,001264 | 0,000269 | 4,699323 | 0,000024 |
| ML ‰ | 0,441553 | 0,137358 | 0,255160 | 0,079375 | 3,214615 | 0,002390 |
| A % | 0,357415 | 0,116532 | 0,011680 | 0,003808 | 3,067096 | 0,003615 |

De ce fait, l'équation s'écrit comme suit :

$$MWD_{HL2} = 0.001 PS + 0.255 ML + 0.011 A + 0.561$$

Ce modèle signifie que lorsque la matière organique légère augmente d'une unité le MWD_{HL} augmente de 25.5 %. De même pour l'argile et les polysaccharides, lorsqu'ils augmentent d'une unité alors MWD_{HL} augmente respectivement de 1.1 et 0.1. Quoique l'effet de la matière végétale légère reste *nettement* plus important que l'effet de l'argile et des polysaccharides.

De plus, ces résultats ont montré que ce traitement donne un important enrichissement en particules grossières (> 2 mm) considérée comme des macro-agrégats (> 250 μ m), traduisant une bonne résistance de ces agrégats au test HL.

Cependant, la matière végétale légère qui est apparente dans ce modèle, n'avait pas présenté un degré *d'association acceptable* avec la stabilité structurale lors des relations deux à deux. Avec l'application de la régression pas à pas, elle apporte un effet stabilisant sur la stabilité structurale à l'HL.

Selon Tisdall et Oades (1982), Gaillard et al. (1999), Six et Paustian (2000), la présence des matières végétales légères dans le sol, sous l'impulsion de l'action des micro-organismes, permet la formation de macro-agrégats et la consolidation des agrégats existants ce qui permet d'obtenir une bonne stabilité structurale.

Les premiers composés organiques obtenus « après décomposition » agiraient surtout par leur *caractère hydrophobe* et diminution de la mouillabilité du sol empêchant ainsi le phénomène d'éclatement de se produire.

Allant dans le même sens, Annabi (2005) a montré que l'efficacité des matières organiques non décomposées est plus efficace sur le test HL que celle des matières mûres. Ce résultat signifie que l'activité biologique liée à la décomposition des produits organiques est à l'origine de l'évolution de la stabilité de la structure.

3.2.1. Analyse de la variance pour le test d'humectation lente

D'après le tableau XXVIII, la statistique F égale à 9.85 est supérieure au $F_{3,46}$ ($\alpha = 95 \%$) observé sur la table. Nous en déduisons que la régression est très hautement significative.

Tableau XXVIII. Analyse de la variance pour le test d'humectation lente (HL)

| Effet | Sommes Carrés | dl | Moyenne Carrés | F | Niveau p |
|----------|-----------------|----|-----------------|-----------------|-----------------|
| Régress. | 2,606971 | 3 | 0,868990 | 9,854272 | 0,000039 |
| Résidus | 4,056470 | 46 | 0,088184 | | |
| Total | 6,663442 | | | | |

3.2.2. Comparaison entre valeurs vraies et valeurs prévues pour le test d'humectation lente

Les résultats obtenus pour les valeurs vraies et valeurs prévues avec le test d'humectation lente sont présentés dans la figure 51.

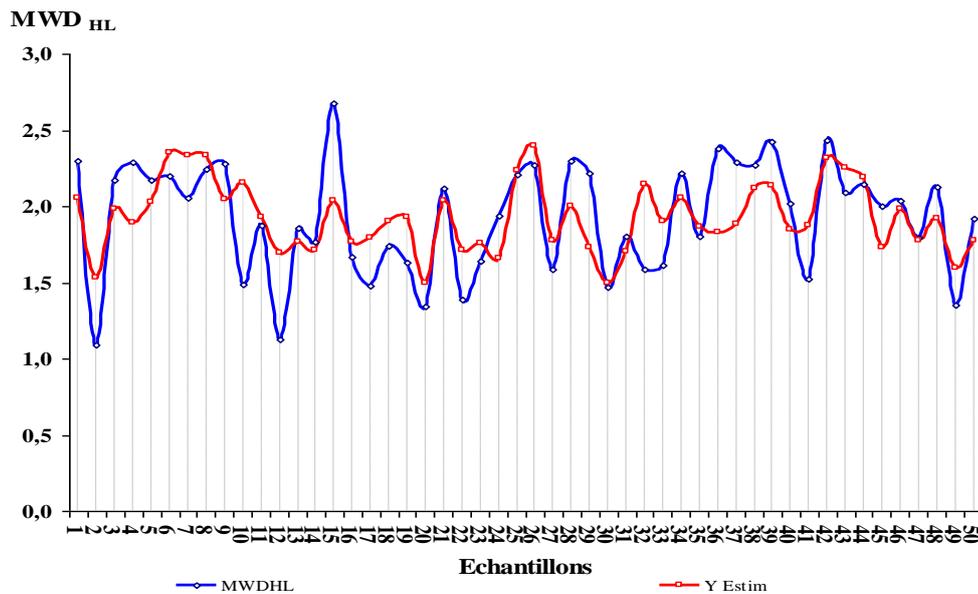


Figure 51. Valeurs vraies et valeurs prévues pour le test d'humectation lente

Nous remarquons que la variance des prévisions est inférieure à celle du test (figure 51). Ce résultat est normal car un bon modèle est sensé renvoyer à des donnée avec une variance minimale. En effet, les deux courbes ont approximativement la même allure, mais nous ne pouvons aller plus loin dans nos conclusions. Les résultats sont résumés dans le tableau XXIX.

Tableau XXIX. Valeurs vraies et valeurs prévues du test d'humectation lente

| | MWD _{HL} | Y Estim |
|----------------------------------|--------------------------------|-------------|
| Moyenne | 1,93 | 1,93 |
| Variance | 0,14 | 0,05 |
| F_{test (50,50)} | 2,56 | |
| F_{table (50,50)} | 1,60 | |
| Conclusion | Variances non homogènes | |

Nous remarquons que les deux échantillons possèdent des moyennes égales, *le test de Fisher* indique que celles-ci ne sont pas homogènes. Ce résultat indique que les données des deux échantillons ne sont pas dispersées de la même manière autour de la moyenne. De ce fait, nous n'avons pas besoin de faire un test de différences entre les moyennes vu qu'elles sont égales.

3.3. Régressions multiples pour le test de désagrégation mécanique

L'application des régressions multiples donne les résultats présentés dans le tableau XXX.

Tableau XXX. Régressions multiples pour le test de désagrégation mécanique

| Equations de régression | Type de régression | R ² | r | P | sgn |
|---|----------------------|----------------|------|----------------------|-----|
| $MWD_{DMI} = 0.039 CEC + 0,020 CaCO_3$ | Standard | 0.23 | 0.47 | $2.37 \cdot 10^{-3}$ | ** |
| $MWD_{DM2} = 0.018 A + 0.021 CaCO_3$ | Standard | 0.32 | 0.56 | $4.59 \cdot 10^{-4}$ | *** |
| $MWD_{DM3} = 0.033 MLiée + 0.001 PS + 0.024 CaCO_3 + 0.018 A$ | Pas à pas ascendante | 0.50 | 0.70 | $9 \cdot 10^{-6}$ | *** |

ns: non significative
 *: significative
 **: hautement significative
 ***: très hautement significative

La régression multiple retenue est celles qui présentent le coefficient de détermination multiple le plus élevé (0.50). Il s'agit donc de l'équation $MWD_{DM3} = 0.033 MLiée + 0.001 PS + 0.024 CaCO_3 + 0.018 A$

Ce modèle montre que, contrairement aux deux modèles de régression « standard », il se compose de quatre paramètres (MLiée, PS, CaCO₃, A) qui expliquent près de 49.65 % de la variation totale du test de désagrégation mécanique (annexe 7). La validation du modèle retenu par les hypothèses stochastiques et structurales est présentée dans le tableau XXXI.

Tableau XXXI. Validation des hypothèses stochastiques et structurale pour le test de désagrégation mécanique

| Hypothèses stochastiques | Validation des hypothèses | |
|--------------------------------|----------------------------------|--|
| ○ H ₁ | - Cette hypothèse est vérifiée | → Le travail étant basé sur des outils de mesure précis. <i>Test effectué avec trois répétitions</i> pour l'ensemble des analyses chimiques, biochimiques et physiques. |
| ○ H ₂ | - Cette hypothèse est vérifiée | → La moyenne des résidus observés est nulle (annexe 7). |
| ○ H ₃ | - Cette hypothèse n'est vérifiée | → Le nuage de points ne montre pas de forme indiquant une <i>hétéroscédasticité</i> (figures 53, 38, 41 et annexe 7). |
| ○ H ₄ | - Cette hypothèse est vérifiée | → La statistique du test vaut DW = 1.99 (annexe 4). Pour n = 50, k = 4 et α = 5% ; d1 = 1,38 et d2 = 1,72 → d2 < DW < 4-d2 (1,72 < 1,99 < 2,28). => Hypothèse nulle acceptée (-0,024010 n'est pas significativement différente de zéro). |
| ○ H ₅ | - Cette hypothèse est vérifiée | → L'examen de la matrice indique qu'il n'y a aucune corrélation significative (annexe 7). |
| ○ H ₆ | - Cette hypothèse est vérifiée | → La statistique de <i>Shapiro & Wilk</i> vaut 0.97418, la valeur obtenue est supérieur à 0,947 pour n = 50 et α = 5% (annexe 7). |
| Hypothèses structurales | | |
| ○ H ₇ | - L'hypothèse 7 est vérifiée | → La régression pas à pas est appliquée principalement en ce sens. |
| ○ H ₈ | - L'hypothèse 8 est vérifiée | → Résultat obtenu avec n = 50 et k = 3 => 50 > (4+1=5). |

Les hypothèses étant vérifiées, nous pouvons évaluer la significativité de l'équation et estimer les coefficients du modèle.

Les coefficients des paramètres entrant dans le modèle de régression sont donnés dans le tableau XXXII.

Tableau XXXII. Synthèse de la régression pour le test de désagrégation mécanique.

| N=50 | Béta | Err-type de béta | B | Err-typede B | T (44) | Niveau p |
|---------------------------|-----------------|------------------|-----------------|--------------|----------|----------|
| OrdOrig | | | -0,623127 | 0,400934 | -1,55419 | 0,127303 |
| M liée % | 0,342039 | 0,133609 | 0,033735 | 0,013178 | 2,56002 | 0,013977 |
| PS % | 0,397493 | 0,130948 | 0,001007 | 0,000332 | 3,03551 | 0,004024 |
| CaCO₃ % | 0,466839 | 0,117827 | 0,024109 | 0,006085 | 3,96207 | 0,000269 |
| A % | 0,438803 | 0,126666 | 0,018674 | 0,005391 | 3,46424 | 0,001197 |

De ce fait, l'équation s'écrit comme suit :

$$MWD_{DM3} = 0.033 M_{Liée} + 0.001 PS + 0.024 CaCO_3 + 0.018 A$$

Le modèle indique que lorsque la matière organique liée augmente d'une unité dans le sol le MWD_{DM3} s'accroît de 3.3 %, De même pour le calcaire total, les polysaccharides et l'argile leur augmentation d'une unité se traduit par l'élévation du MWD_{DM3} respectivement de 2.4, 0.1 et 1.8 %. Néanmoins, l'effet de la matière organique liée se trouve être nettement plus important que l'effet des autres paramètres.

Le modèle confirme les résultats obtenus lors de l'étude des relations simples (régressions) :

- entre la matière organique liée et le MWD_{DM} ,
- entre l'argile et la stabilité structurale pour les tests DM,
- entre les le calcaire total et MWD_{DM} .

Notons que lors de l'évaluation du degré d'impact de ce test, nous avons obtenu un important pourcentage « représentatif » des particules grossières de 1 à 2 mm, considérées comme des macro-agrégats (> 250 μ m) résistant au test DM.

Dans ce modèle, contrairement au test HL, l'efficacité de la matière organique liée est plus marquée que la matière végétale légère. Monnier (1984) démontra que la matière organique liée agissait sur la stabilité structurale de façon interactive avec la texture. Cette dernière est identifiée par l'effet argile dans le rapport « matière organique liée / argile ».

Le Bissonnais (1996a) estime pour sa part que ce test ne met en jeu que la cohésion interparticulaire comme mécanisme de résistance à la désagrégation, touchant des agrégats dont la porosité est saturée par l'éthanol. D'après McCarthy et al., 1990, Piccolo et Mbagwu (1999) et Chenu (2003), cette augmentation de la cohésion interne des agrégats est due au renforcement des liaisons entre les particules formant l'agrégat. Des liaisons qui pourront être assurées par des produits organiques tels que les polysaccharides et/ou les matières liées (les substances humiques).

3.3.1. Analyse de la variance pour le test de désagrégation mécanique

D'après le tableau XXXIII ci-dessus, la statistique F égale à 8,67 est supérieure au $F_{5,44}$ ($\alpha = 95\%$) observé sur la table. Nous en déduisons que la régression est très hautement significative.

Tableau XXXIII. Analyse de la variance pour le test de désagrégation mécanique

| Effet | Sommes Carrés | dl | Moyenne Carrés | F | Niveau p |
|----------|---------------|----|----------------|----------|----------|
| Régress. | 5,61114 | 5 | 1,122227 | 8,677742 | 0,000009 |
| Résidus | 5,69019 | 44 | 0,129322 | | |
| Total | 11,30133 | | | | |

3.3.2. Comparaison entre valeurs vraies et valeurs prévues pour le test désagrégation mécanique

Si nous faisons une reproduction de ce test en injectant les vraies valeurs des composantes, nous obtenons la figure 52.

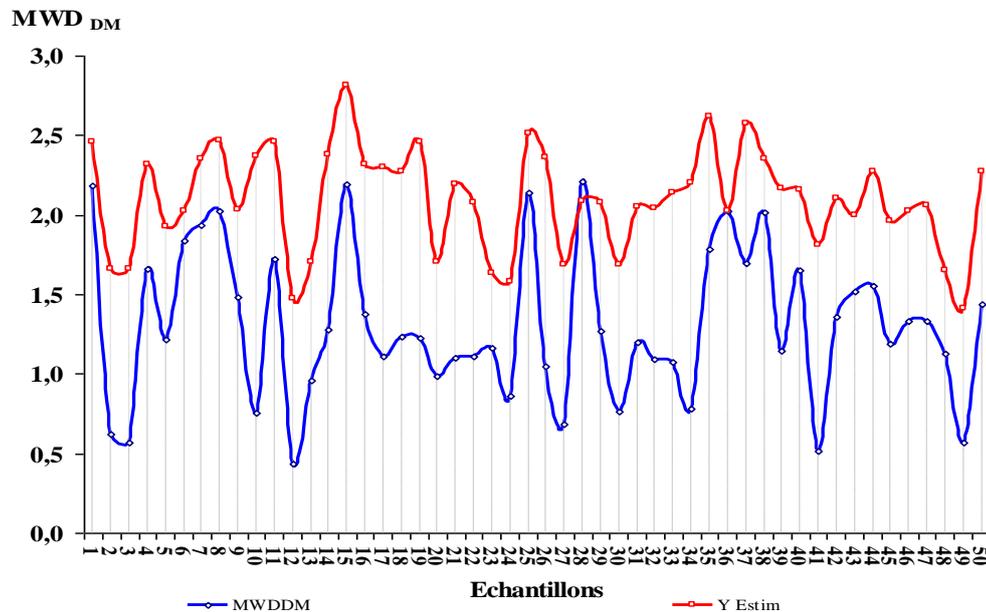


Figure 52. Valeurs vraies et valeurs prévues pour le test désagrégation mécanique avant l'ajustement

Il ressort que les deux courbes ont approximativement la même allure. La comparaison des moyennes (tableau XXXIV) révèle que la moyenne des valeurs prédictives du test de désagrégation mécanique est supérieure à celle du test réel. Cela apparaît bien dans la figure 52 à travers le décalage entre la courbe en rouge qui représente les valeurs prévues et la courbe en bleu qui représente les vraies valeurs du test de désagrégation mécanique.

Tableau XXXIV. Les valeurs vraies et valeurs prévues pour le test de désagrégation mécanique avant l'ajustement

| | MWD _{DM} | Y Estim | Ecart |
|----------------------------|-------------------------|---------|-------|
| Moyenne | 1,31 | 2,10 | -0,79 |
| Variance | 0,23 | 0,10 | |
| F _{test (50,50)} | 2,22 | | |
| F _{table (50,50)} | 1,60 | | |
| Conclusion | Variances non homogènes | | |

L'ajustement est obtenu en injectant le terme constant dans la fonction dans le but de réduire le décalage entre les valeurs prévues et les valeurs réelles. Les valeurs sont représentées dans la figure 53.

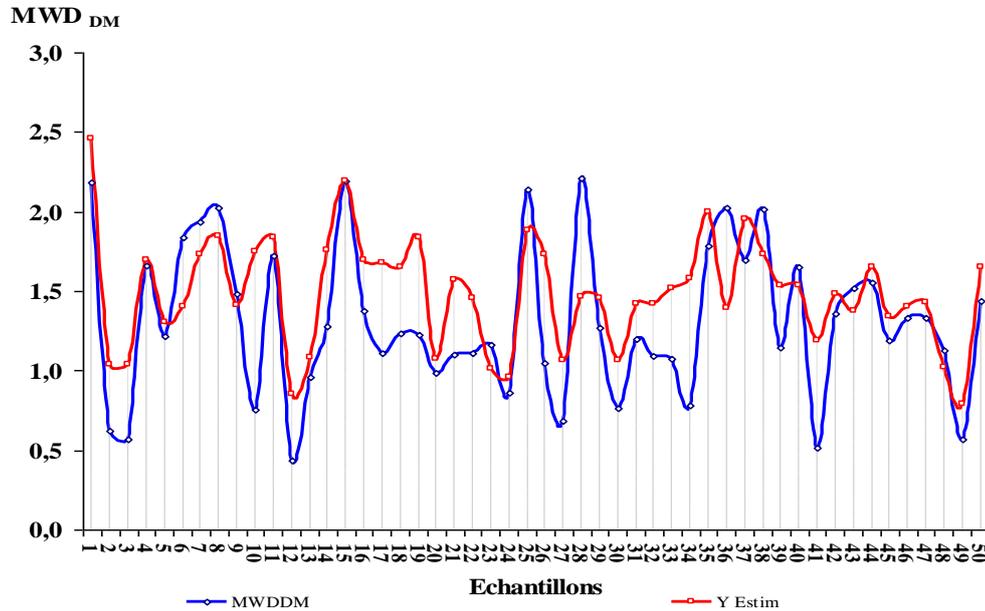


Figure 53. Valeurs vraies et valeurs prévues pour le test désagrégation mécanique après ajustement

Les statistiques après l'ajustement (tableau XXXV) montrent que l'écart se réduit à 0.16. Cependant, l'application du test de *Mann & Whitney* révèle qu'au seuil de confiance de 95 %, il y a une différence significative entre les deux moyennes.

Tableau XXXV. Les valeurs vraies et valeurs prévues pour le test de désagrégation mécanique après l'ajustement

| | MWD _{DM} | Y Estim | Ecart |
|----------------------------------|-------------------------|---------|-------|
| Moyenne | 1,31 | 1,48 | -0,16 |
| Variance | 0,23 | 0,10 | |
| F_{test (50,50)} | 2,22 | | |
| F_{table (50,50)} | 1,60 | | |
| Conclusion | Variances non homogènes | | |

La fonction pédotransfert après l'ajustement (comme suggéré par le tableau XXXII) s'écrit sous la forme suivante :

$$MWD_{DM3} = 0.033 M_{Liée} + 0.001 PS + 0.024 CaCO_3 + 0.018 A - 0.623$$

3.4. Régressions multiples pour la moyenne des trois tests

Les résultats des calculs et les équations de régressions multiples pas à pas et standards sont présentés dans le tableau XXXVI.

Tableau XXXVI. Régressions multiples pour la moyenne des trois tests

| Equations de régression | Type de régression | R ² | r | P | sgn |
|--|----------------------|----------------|------|----------------------|-----|
| $MWD_{MOY1} = 0,23MO + 0,02 A + 0,03 CaCO_3$ | Standard | 0.33 | 0.57 | $2.95 \cdot 10^{-4}$ | *** |
| $MWD_{MOY2} = 0.0132 AF + 0.027 CaCO_3 + 0.053 H + 0.025 A$ | Standard | 0.38 | 0.61 | $1.89 \cdot 10^{-4}$ | *** |
| $MWD_{MOY3} = 0,348 MO + 0,022 A + 0,002 PS + 0,035 CaCO_3 - 2,0461$ | Pas à pas ascendante | 0.55 | 0.74 | $0.01 \cdot 10^{-4}$ | *** |

ns: non significative

*: significative

** : hautement significative

***: très hautement significative

Après avoir réalisé la régression pas à pas pour la moyenne des trois tests, les variables retenues dans le modèle sont la MO, A, PS, ML et le CaCO₃ présentées dans le (tableau XXXVII).

Tableau XXXVII. Synthèse de la régression pour la moyenne des trois tests

| N=50 | Béta | Err-type de béta | B | Err-type de B | T (4) | Niveau p |
|---------------------|----------|------------------|----------|---------------|----------|----------|
| OrdOrig | | | -2,41220 | 0,571239 | -4,22276 | 0,000119 |
| MO % | 0,473218 | 0,134069 | 0,40465 | 0,114642 | 3,52967 | 0,000989 |
| PS ‰ | 0,630874 | 0,127974 | 0,00259 | 0,000526 | 4,92970 | 0,000012 |
| CaCO ₃ % | 0,426536 | 0,107420 | 0,03575 | 0,009004 | 3,97074 | 0,000262 |
| A % | 0,321436 | 0,118283 | 0,02220 | 0,008170 | 2,71751 | 0,009371 |
| ML ‰ | 0,292363 | 0,122422 | 0,35709 | 0,149526 | 2,38816 | 0,021291 |

Le modèle s'écrit alors sous la forme suivante :

$$MDW_{MOY3} = 0.404 MO + 0.022 A + 0.002 PS + 0.357 ML + 0,035 CaCO_3 - 2,412$$

Cependant, ce modèle n'aurait de sens que si toutes les hypothèses stochastiques et structurelles sont vérifiées, ce qui n'est pas le cas vu que la statistique de *Durbin et Watson* $DW = 2.40$ (annexe 8) nous renvoie dans une zone d'incertitude, avec un coefficient d'autocorrélation égale à $-0,23$.

Pour palier cette étape, nous devons réestimer le modèle avec $\hat{\rho} = 1 - \frac{DW}{2} = -0.23$.

3.4.1. Réestimation du modèle grâce aux variables corrigées de l'autocorrélation

Les variables retenues (tableau XXXVIII) dans le modèle après réestimation grâce aux variables corrigées de l'autocorrélation, sont la MO, A, PS et CaCO₃. Nous remarquons que ML n'est plus retenue puisque la *Pvalue* du coefficient relatif est supérieure ou égale à 5 %. Cependant, les variables retenues expliquent 55.12 % de la variation totale ($R^2 = 0.5512$) (annexe 8).

Voici les estimateurs des coefficients retenus dans le tableau XXXVIII :

Tableau XXXVIII. Synthèse de la régression de la moyenne des trois tests après réestimation du modèle grâce aux variables corrigées de l'autocorrélation

| N=50 | Béta | Err-type de béta | B | Err-type de B | T (4) | Niveau p |
|---------------------|----------|------------------|----------|---------------|----------|----------|
| OrdOrig | | | -2,52922 | 0,639925 | -3,95237 | 0,000284 |
| MO % | 0,472096 | 0,139692 | 0,34801 | 0,102975 | 3,37956 | 0,001553 |
| PS ‰ | 0,723159 | 0,137728 | 0,00240 | 0,000457 | 5,25062 | 0,000004 |
| CaCO ₃ % | 0,443299 | 0,110113 | 0,03518 | 0,008738 | 4,02585 | 0,000226 |

| | | | | | | |
|-----|----------|----------|---------|----------|---------|----------|
| A % | 0,386318 | 0,124798 | 0,02251 | 0,007273 | 3,09555 | 0,003450 |
|-----|----------|----------|---------|----------|---------|----------|

Le modèle une fois validé, s'écrira sous la forme suivante :

$$MDW_{MOY3} = 0.348 MO + 0.022 A + 0.002 PS + 0.035 CaCO_3 - 2.046$$

Dans l'ensemble c'est l'équation réalisée par la régression pas à pas ascendante qui reste la plus déterminante et la plus intéressante. Elle se caractérise par le coefficient de détermination multiple le plus élevé (0.55).

Le modèle obtenu est $MWD_{MOY3} = 0.348 MO + 0.022 A + 0.002 PS + 0.035 CaCO_3 - 2.046$

La validation du modèle retenue est représentée dans le tableau XXXVIX.

Tableau XXXVIX. Validation des hypothèses stochastiques et structurale pour la moyenne des trois tests

| Hypothèses stochastiques | Validation des hypothèses | |
|--------------------------|----------------------------------|--|
| ○ H ₁ | - Cette hypothèse est vérifiée | → Le travail étant basé sur des outils de mesure précis. <i>Test effectué avec trois répétitions</i> pour l'ensemble des analyses chimiques, biochimiques et physiques. |
| ○ H ₂ | - Cette hypothèse est vérifiée | → La moyenne des résidus observés est nulle (annexe 8). |
| ○ H ₃ | - Cette hypothèse n'est vérifiée | → Le nuage de points ne montre pas de forme indiquant une <i>hétéroscédasticité</i> (figures 42, 43, 45 et annexe 8). |
| ○ H ₄ | - Cette hypothèse est vérifiée | → La statistique du test vaut DW = 1,97 (annexe 8). Pour n = 50, k = 5 et α = 5% ; d1 = 1,34 et d2 = 1,77 → d2 < DW < 4-d2 (1,77 < 1,97 < 2,23). => Hypothèse nulle acceptée (-0,011280 n'est pas significativement différente de zéro). |
| ○ H ₅ | - Cette hypothèse est vérifiée | → L'examen de la matrice indique qu'il n'y a aucune corrélation significative (annexe 8). |
| ○ H ₆ | - Cette hypothèse est vérifiée | → La statistique de <i>Shapiro & Wilk</i> vaut 0.98657, la valeur obtenue est supérieur à 0,947 pour n = 49 et α = 5% (annexe 8). |
| Hypothèses structurelles | | |
| ○ H ₇ | - L'hypothèse 7 est vérifiée | → La régression pas à pas est appliquée principalement en ce sens. |
| ○ H ₈ | - L'hypothèse 8 est vérifiée | → Résultat obtenu avec n = 50 et k = 3 => 50 > (5 + 1 = 6). |

Les hypothèses de validation accomplies avec succès, nous pouvons à présent proposer une modélisation de la stabilité structurale en fonction de ses différentes composantes. Aussi, le modèle qui relie la stabilité structurale (moyenne synthétique) à la matière organique, le calcaire total, l'argile et les polysaccharides s'écrit comme suit :

$$MDW_{MOY3} = 0.348 MO + 0.022 A + 0.0024 PS + 0.035CaCO_3 - 2.046$$

L'intensité et la persistance de la stabilité des agrégats diffèrent selon le test de stabilité structurale utilisé. Néanmoins, la moyenne des trois tests semble la plus intéressante puisque elle fait intervenir l'ensemble des paramètres qui influent le plus la stabilité structurale des sols étudiés.

Le modèle obtenu montre que lorsque la matière organique augmente d'une unité dans le sol la stabilité structurale augmente de 34.8 %. De même pour l'élément calcaire total, lorsqu'il augmente d'une unité la stabilité structurale augmente de 3.5 %. L'argile induit une élévation de 2.2 % unité pour la stabilité structurale et enfin les polysaccharides avec le plus faible effet qui est de 0.2 %.

Cependant, c'est l'effet de la MO qui reste nettement le plus important par rapport aux autres paramètres (CaCO₃, PS et A).

D'après le modèle obtenu, la stabilité des agrégats des échantillons prélevés des différentes classes de sols (sols calcimagnésiques, sols peu évolués, sols rouges et les vertisols) est influencée principalement par la MO, A, PS et CaCO₃. Il faut souligner que ces éléments sont considérés comme agents important d'agrégation.

Ce modèle confirme les résultats obtenus pour les régressions simples. La stabilité structurale (moyenne des trois tests) semble être évolutive avec l'A, CaCO₃, MO.

3.4.2. Analyse de la variance pour la moyenne des trois tests

D'après le tableau XL, F calculé (10.56) est supérieure au F observé sur la table de *Fisher-Snedecor*, à 5 et 43 degrés de liberté au seuil de confiance 95 %. Nous en déduisons que la régression est très hautement significative.

Tableau XL. Analyse de la variance pour la moyenne synthétique

| Effet | Sommes Carrés | dl | Moyenne Carrés | F | Niveau p |
|----------|---------------|----|----------------|----------|----------|
| Régress. | 13,86599 | 5 | 2,773198 | 10,56396 | 0,000001 |
| Résidus | 11,28815 | 43 | 0,262515 | | |
| Total | 25,15414 | | | | |

3.4.3. Comparaison entre valeurs vraies et valeurs prévues pour la moyenne des trois tests

Les résultats obtenus pour les valeurs vraies et valeurs prévues avec la moyenne des trois tests sont présentés dans la figure 54.

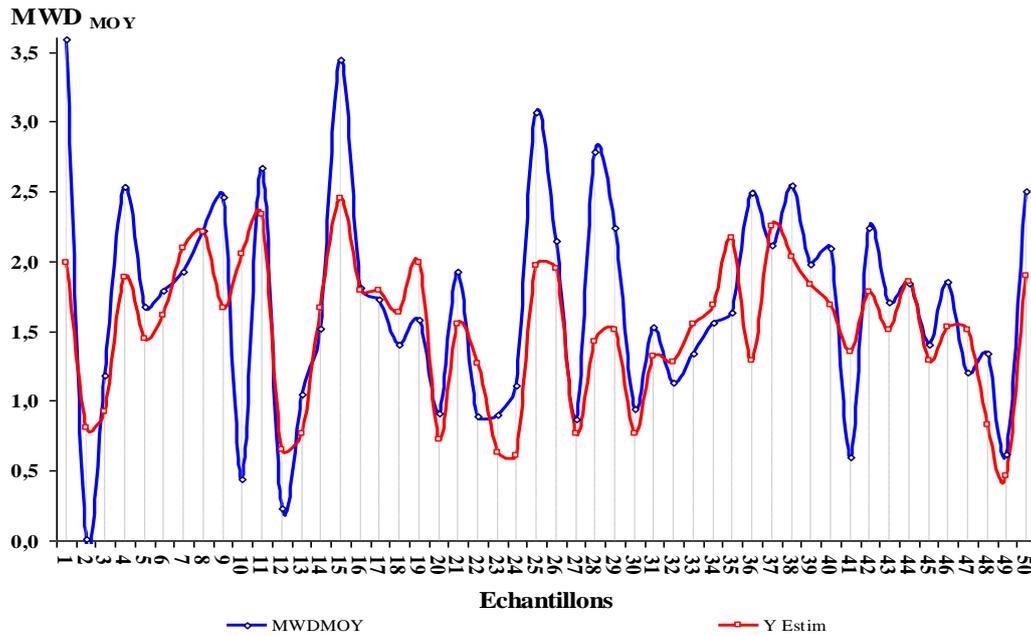


Figure 54. Valeurs vraies et valeurs prévues pour la moyenne des trois tests

L'observation de cette figure, montre que les écarts entre les valeurs prédictives et les vraies valeurs se compensent entre eux et aboutissent à un écart de 0,18. De plus, Il ne faut pas perdre de vue que les 4 paramètres retenus expliquent 55,12 % de la variation globale (annexe 8).

La comparaison des moyennes des trois tests est résumée dans le tableau XLI.

Tableau XLI. Les valeurs vraies et valeurs prévues pour la moyenne des trois tests

| | MWDmoy | Y Estim | Ecart |
|---------------------------|--------------------------------|-------------|-------------|
| Moyenne | 1,69 | 1,52 | 0,18 |
| Variance | 0,61 | 0,26 | |
| $F_{\text{test}}(50,50)$ | 2,29 | | |
| $F_{\text{table}}(50,50)$ | 1,60 | | |
| Conclusion | Variances non homogènes | | |

L'application du test de *Mann & Whitney* révèle qu'au seuil de confiance de 95 %, il y a une différence significative entre les deux moyennes. Quant aux variances, nous remarquons que celle des prévisions est inférieure à celle de la moyenne des trois tests (tableau XLI). D'où l'objectif d'un bon modèle de régression, qui consiste à renvoyer à des données avec une variance minimale.

4. Discussion générale

Cette étude a porté sur 50 échantillons de sol représentatifs des quatre classes de sols de la plaine de la Mitidja ouest à savoir les sols calcimagnésiques, les vertisols, les sols peu évolués et les sols rouges.

Dans la partie description pédologique, la comparaison des valeurs du pH des différentes classes de sols montre que les écarts sont faibles, ceci indique que les processus pédogénétiques n'ont pas eu beaucoup d'effet sur ce paramètre, notamment pour les sols calcimagnésiques. De même pour la conductivité électrique des sols qui reste faible, elle est comprise entre 0.1 - 0.5 dS/m et ce quelque soit la classe de sol considérée. Il n'y a pas donc de phénomène de salinité dans cette zone.

Pour ce qui est des taux de calcaire, ils semblent très variables d'une classe de sol à l'autre. Toutefois, il est possible de noter que les teneurs les plus élevées sont observées dans les sols peu évolués et les sols calcimagnésiques avec respectivement des maximums de 25 % et 28 %.

Aussi, les résultats de caractérisation indiquent que la capacité d'échange cationique est assez élevée dans les sols rouges, les sols calcimagnésiques et les vertisols. Ceci est dû aux teneurs élevées en argile principalement pour les vertisols et les sols rouges avec des moyennes respectives de 55.6 % et 47.1 %.

Si on tient compte de cette richesse des sols en argile, l'ensemble des classes des sols est généralement marquée par une prépondérance de texture argileuse à argilo-limoneuse (généralement identifiée comme texture lourde), et qu'en parallèle les teneurs de matière organique totale restent faibles à moyennement faibles ($MO < 3\%$). Les valeurs élevées de la capacité d'échange cationique des sols étudiés sont plus influencées par les teneurs en argile des sols que par les taux de matière organique.

Le fractionnement de la matière organique donne de la Mliée, ML, AF, AH, H, SHS et SHP en proportions relativement proches pour les diverses classes de sols. Il permet aussi de montrer sous quelles formes le carbone peut être stabilisé dans le sol. L'utilisation de la méthode Dabin (1971), reposant sur les aspects de séparation entre la matière organique liée et légère, le dosage des taux des substances humiques pour l'ensemble des sols et la détermination des taux d'humine, nous a permis d'obtenir ce qui suit :

- Pour la première fraction et à toutes les classes de sol, les taux de matière légères sont faibles ($< 1\%$ du carbone total). Les données révèlent aussi une dominance de la fraction liée ($> 50\%$ du carbone total), avec un maximum de 24.3 ‰ enregistré dans les sols rouges. Cependant, la moyenne la plus élevée est observée dans les vertisols (18.4 ‰).
- Pour la deuxième fraction, les taux des SHP sont peu distincts entre les différentes classes de sols (5.5 et 6.6 ‰). Elle se trouve être la plus dominante par comparaison aux autres fractions (SHS et H).
- Pour la dernière fraction, l'humine considérée comme matière organique non extractible représente la deuxième fraction organique dominante après les substances humiques.

Sur la base des travaux de Duchaufour et *al.* (1970), le fractionnement de la MO semble identifier un milieu très actif et bien aéré. Il s'agit d'un milieu où la minéralisation de la matière organique fraîche est rapide se transforme en acides humiques et surtout en humine non extractible.

La détermination des concentrations en polysaccharides, considérée comme phase complémentaire au fractionnement, a montré que les taux restent très variables d'un sol à un autre. La plus forte moyenne est enregistrée dans les sols rouges (649.5 ‰), elle est suivie par celles des sols peu évolués (500.3 ‰). Nous remarquons aussi que les sols rouges présentent des teneurs qui atteignent le double de celles des sols calcimagnésiques (345.2 ‰) et des vertisols (366 ‰). D'après Liu et al. (2005) l'augmentation des concentrations en polysaccharides dans les sols rouges indique une activité biologique relativement importante.

Pour ce qui est de l'évaluation de la stabilité structurale sur la base du test Le Bissonnais (1996), il ressort en premier de l'évaluation de la distribution des particules pour le test HR que les sols étudiés présentent une fragilité vis-à-vis de ce test (effet d'éclatement). Ce dernier donne lieu à de fortes proportions de particules de petite dimension (< 0.2 mm), communément considérées comme des micro-agrégats (< 250 μm). Ainsi, en fonction de la distribution des particules observées (0.5 - 0.2 mm) c'est la classe des vertisols qui est la mieux représentée. Les taux d'acide humique gris et de 6.6 ‰. Généralement, cet aspect de répartition est associé à l'effet d'un complexe organo-minéral stable.

Avec la distribution des agrégats pour le test HL et pour les mêmes fréquences, aucune similitude n'est notée avec le test précédent. Il est clair que la teneur en particules grossières est plus élevée dans les sols rouges (des agrégats > 2 mm), traduisant une bonne résistance de ces agrégats au test HL comparée aux autres classes de sols. Pour Cosentino et al. (2007), cette résistance peut être expliquée par la forte cohésion des agrégats.

Enfin les résultats obtenus pour le test DM font ressortir une similitude dans le mode de distribution des agrégats avec une prédominance des particules de tailles > 0.5 mm, correspondant au sol rouge. En effet, ce test indique que la classe des sols rouges présente une résistance supérieure à celle des autres classes de sols et qu'ils sont probablement moins susceptibles à la formation de croûtes de battance.

La deuxième appréciation de la stabilité structurale est faite à l'aide du diamètre pondéral moyen pour chaque test et pour la moyenne des trois tests. Il ressort que la moyenne la plus élevée du MWD_{HR} est observée pour les vertisols. Concernant les tests HL et DM, ce sont les sols rouges et les vertisols qui présentent la moyenne la plus élevée avec respectivement 2.2 mm et 1.9 mm. Pour le minimum de MWD_{HL} il est de 1.6 mm et 1.4 mm pour le MWD_{DM} . Ces valeurs peuvent être expliquées par les fortes teneurs en matière organique et en argiles de ces sols.

On remarque aussi que le MWD_{MOY} des sols rouges est le plus élevé avec une moyenne de 1.9 mm, présentant l'écart type le plus réduit 0.5 suivie par les vertisols avec 1.8 mm. Les plus faibles valeurs sont observées pour les sols calcimagnésiques et des sols peu évolués avec respectivement 1.6 mm et 1.4 mm.

En somme, les valeurs de MWD_{MOY} permettent de déduire que la stabilité structurale des sols étudiés est principalement très stables (32 %) et stables (38 %) sur l'ensemble de la région.

Dans l'approche de régressions simples, l'étude de certaines interactions susceptibles d'exister entre la stabilité structurale (MWD_{HR} , MWD_{HL} , MWD_{DM} et MWD_{MOY}) et les paramètres pédologiques, obtenues à partir de la matrice de corrélation (tableau XVIII), a mis en évidence que la stabilité structurale des sols est fortement influencée par les teneurs en argile ($p = 0.017$; $r = 0.34$), en matière organique totale ($p = 0.0001$; $r = 0.65$), les polysaccharides ($p = 0.012$; $r = 0.35$) et le taux de calcaire total ($p = 0.02$; $r = 0.33$).

Ainsi, ces quatre paramètres semblent *agir différemment* selon le test de stabilité structurale utilisé. Les agrégats stables (micro-agrégats) obtenus par l'humectation rapide sont apparemment fortement influencés par le calcaire total et l'*hydrophobicité*. Cette dernière est sous l'effet direct de la matière organique et ses différentes fractions.

A l'humectation lente, la stabilité des agrégats (macro-agrégats) est apparemment fortement influencée par les concentrations en polysaccharides et les liaisons entre les particules argileuses (*cohésion*). L'effet des particules argiles se manifeste principalement avec le test à la désagrégation mécanique.

Concernant l'élaboration des modèles de pédotransfert, présentée comme approche de régressions multiples, les principaux résultats obtenus ont permis en premier d'associer les facteurs agrégeant aux différents tests de mesure de la stabilité structurale (HL, HR et DM) et de leur moyenne. Par la suite la formulation d'hypothèses dans le but d'expliquer les mécanismes responsables de cette stabilité. Les modèles obtenus sont les suivants :

- **Test d'humectation rapide (MWD_{HR})**

$$MWD_{HR4} = 0.132 MO + 0.005 CaCO_3 \\ (R^2 = 0.54)$$

Les résultats ont montrés que la stabilité structurale pour le test HR, est principalement régie par deux paramètres, la matière organique totale et le taux de calcaire total.

- **Test d'humectation lente (MWD_{HL})**

$$MWD_{HL2} = 0.001 PS + 0.255 ML + 0.011 A + 0.561 \\ (R^2 = 0.39)$$

Ce modèle met en évidences l'importance des concentrations en polysaccharides, en argile et en matières organiques libres sur le test HL.

- **Test de désagrégation mécanique (MWD_{DM})**

$$MWD_{DM3} = 0.033 MLiée + 0.001 PS + 0.024 CaCO_3 + 0.018 A \\ (R^2 = 0.50)$$

Les variations sur l'agrégation et la stabilité de la structure DM, sont liées particulièrement aux matières organiques liées, les concentrations en polysaccharides, le calcaire total et les teneurs en argiles.

- enfin, le modèle de **la moyenne des trois tests** est le suivant :

$$MDW_{MOY3} = 0.348 MO + 0.022 A + 0.002 PS + 0.035 CaCO_3 - 2.046 \\ (R^2 = 0.55)$$

Le modèle le plus représentatif d'après ces résultats est celui de la moyenne des trois tests qui inclut l'ensemble des paramètres (matière organique légère, matière organique liée, argile, calcaire total et polysaccharides). Les modèles obtenus peuvent être schématisés dans la figure 55.

En dernier lieu et dans un but purement pratique, nous avons établi des régressions multiples contenant uniquement des paramètres facilement accessibles (MO, $CaCO_3$, A, CEC). Les modèles obtenus se présentent comme suit :

- **Test d'humectation rapide (MWD_{HR})**

$$MWD_{HR4} = 0.132 MO + 0.005 CaCO_3 \\ (R^2 = 0.54)$$

Le modèle obtenu montre que la stabilité structurale pour le test HR, est principalement régie par deux paramètres : la matière organique totale et le taux de calcaire total.

- **Test de désagrégation mécanique (MWD_{DM})**

$$MWD_{DM2} = 0.018 A + 0.021 CaCO_3 \\ (R^2 = 0.32)$$

Les variations sur l'agrégation et la stabilité de la structure DM, sont liées principalement au calcaire total et les teneurs en argiles.

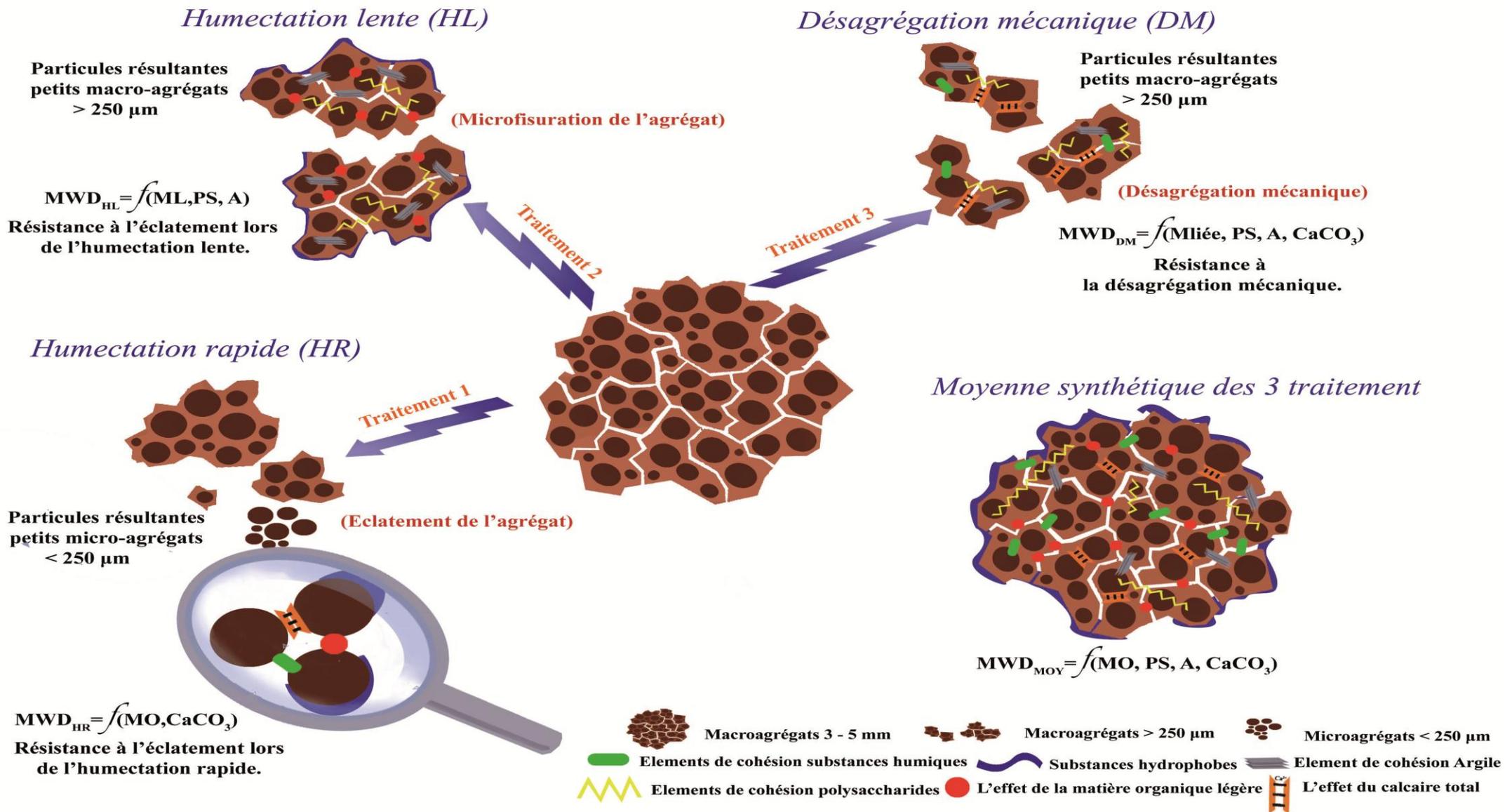


Figure 55. Schéma représentatif de la stabilisation des agrégats du sol par les agents agrégeants au cours des différents traitement de désagrégation (HL, HR, DM) et la moyenne des trois tests.

- pour la moyenne des trois traitements

$$MWD_{MOY1} = 0.23 MO + 0.02 A + 0.03 CaCO_3 \\ (R^2 = 0.33)$$

Ce modèle met en évidence l'importance des taux de calcaire total, d'argile et de la matière organique sur la stabilité structurale.

En résumé, il est possible d'extraire les annotations suivantes :

- Dans le premier test HR le modèle obtenu par la régression pas à pas semble le plus représentatif de part son $R^2 = 0.54$, donnant le meilleur ajustement et présentant des paramètres facilement accessibles pour un modèle pratique.
- Les équations obtenues pour le deuxième test HL ne semblent pas satisfaisantes pour des modèles d'ordre pratique du fait qu'elles présentent un paramètre non utilisé (PS) dans les analyses de routine, mais contribuent d'une manière non négligeable dans la prédiction de la stabilité structurale avec le test à l'HL. Elles sont de ce fait rejetées.
Par conséquent, aucune équation de prédiction ne peut être proposée pour le test HL d'un point de vue pratique.
- A la lecture du tableau XXX, il ressort que les différentes combinaisons (régressions multiples standards) notées définissent des relations hautement significative et très hautement significative. En se référant aux valeurs du coefficient de détermination multiple (R^2), l'équation établie par la régression multiple pas à pas reste la plus intéressante.

Toutefois, l'utilisation des résultats des régressions multiples à usage pratique nous oblige à rejeter toutes les équations ayant des paramètres difficiles à analyser (PS et ML).

De ce fait, l'équation de régression MWD_{DM2} choisie sur la base de R^2 reste la plus adéquate.

- D'après les valeurs du coefficient de détermination multiple (R^2) pour la moyenne des trois tests, l'équation de régression MWD_{MOY3} est la plus représentative et la plus intéressante.

Néanmoins, le modèle MWD_{MOY1} est adopté, du fait qu'il ne contient que des paramètres facilement analysés. Alors que les équations contenant les paramètres (PS, AF, H) sont rejetées.

Il faut tenir compte du fait que les R^2 relatifs sont les maximums obtenus avec les paramètres qui contribuent significativement à la variation de chaque test. Il est évident que nous pouvons obtenir des modèles avec des R^2 supérieurs mais contenant des paramètres qui n'influencent pas significativement, ou qui n'ont aucune relation avec les trois traitements de la stabilité structurale. En plus, cela viendrait alourdir les fonctions de pédotransfert, ce qui est contraire à l'objectif espéré, qui était de se limiter qu'aux paramètres les plus accessibles.

*Conclusion
Générale*

Conclusion générale

Ce travail a porté sur l'étude de la relation de la stabilité structurale des sols avec les caractéristiques physico-chimiques et le développement d'un modèle permettant son estimation à partir de caractéristiques facilement accessibles.

L'étude a été réalisée sur 50 échantillons prélevés de la couche 0 à 50 cm, provenant de sols peu évolués, de sols à sesquioxyde de fer ou de manganèse, de vertisols et de sols calcimagnésiques de la Mitidja Ouest.

Les sols étudiées se caractérisent par une texture à dominance argileuse à argilo-limoneuse, des taux en calcaire très faible à moyennement élevés (0 – 28 %), un pH neutre à alcalin (7.5 – 8.3), une CEC faible à très élevée (11 – 27.9 Cmol+/Kg de terre), et enfin des teneurs en matière organique totale faibles à moyennement faibles (MO < 3%). En conséquence, on peut dire que les fortes teneurs en argiles (24.6 % < argile % < 66 %) seraient à l'origine des valeurs élevées de la CEC.

L'évaluation de la stabilité structurale des quatre classes de sols par la méthode Le Bissonnais exprimés en diamètre moyen pondérés (MWD) a montré que le test à l'humectation lente (HL) n'est pas destructif avec des valeurs de 1.8, 1.9 et 2.2 mm et pour lequel les sols présentent une bonne résistance. Le test de désagrégation mécanique (DM) est plus agressif que le test HL (1.2, 1.4 et 1.5 mm) et enfin le test à l'humectation rapide (HR) est plus destructif que les deux précédents, provoquant ainsi le plus de dégradation aux sols (0.4, 0.5 et 0.6 mm).

Le calcul de la moyenne du diamètre moyen pondéré des trois tests, identifié par le MWD_{MOY} , est utilisé comme indicateur de la classe de sol la plus stable. Le MWD_{MOY} a montré que la classe des sols rouges est la plus stable avec une moyenne de 1.89 mm.

L'analyse des régressions simples, entre la stabilité structurale ($MWD_{DM, HR, HL, MOY}$) et l'ensemble des paramètres physico-chimiques, a révélée des coefficients de corrélation positifs avec l'argile, les différentes fractions de la MO, le PS, le $CaCO_3$ et la CEC. et inversement proportionnelle avec la teneur en sable.

Les régressions multiples ont permis de construire des modèles de prédiction représentant le comportement de la stabilité structurale sur la base de l'ensemble des paramètres pédologiques étudiées. Les huit hypothèses validées (structurelles et stochastiques) ont permis d'obtenir des modèles représentatifs des relations entre les différents tests et les paramètres les plus influents. Les principaux résultats se résument comme suit:

- le test d'humectation rapide est influencé par l'effet des deux formes de la matière organique (liée et légère) ($\beta_{(HR-MO)} = 0.132$).
- l'amélioration de la stabilité des agrégats au test d'humectation lente est plus sensible à la matière organique légère ($\beta_{(HL-ML)} = 0.252$).
- l'effet maximum de la matière organique liée sur la stabilité structurale est observé avec le test de désagrégation mécanique ($\beta_{(DM-MLi\acute{e}e)} = 0.033$).
- le calcaire total semble intervenir d'avantage sur le test DM ($\beta_{(DM-CaCO_3)} = 0.024$) que pour le test HR ($\beta_{(HR-CaCO_3)} = 0.005$).
- le plus grand effet des polysaccharides est observé pour le test à HL ($\beta_{(HL-PS)} = 0.001$), bien qu'ils soient considérés comme des *simples agents transitoires d'agrégation*.

- la matière organique liée, identifiée par les substances humiques, est considérée comme l'un des agents agrégants persistants les plus importants, améliorant ainsi l'activité biologique des sols. Cette activité a un effet favorable sur les propriétés du sol, par la cohésion et l'hydrophobicité des particules élémentaires du sol.
- la résistance des agrégats aux forces de désagrégation repose sur deux processus simultanés de l'hydrophobicité et de la cohésion interparticulaires à l'intérieur des agrégats. Le premier diminue la mouillabilité des agrégats, réduisant ainsi le phénomène d'éclatement, et le second limite l'éclatement et la désagrégation mécanique.
- les agents persistants (les substances humiques) sont associés à la cohésion des micro-agrégats inférieurs 250 µm, alors que les agents transitoires et temporaires (les polysaccharides) permettraient de regrouper ces micro-agrégats pour former des macro-agrégats supérieurs 250 µm.
- la stabilité des agrégats est majoritairement due à l'effet de la matière organique, l'argile, le calcaire total, et les polysaccharides.

L'équation de régression la plus représentative est celle de la moyenne des trois tests ($R^2 = 0.55$), incluant l'ensemble des paramètres matière organique (Matière organique légère et Matière organique liée), argile, calcaire total et polysaccharides.

$$MDW_{MOY3} = 0.348 MO + 0.022 A + 0.002 PS + 0.035 CaCO_3 - 2.046$$

$(R^2 = 0.55)$

Cependant pour des raisons pratiques, dépendants principalement des moyens disponibles en matière d'analyses, nous avons jugé utile d'opter pour le modèle d'équation contenant uniquement des paramètres facilement accessibles.

$$MWD_{MOY1} = 0.23 MO + 0.02 A + 0.03 CaCO_3$$

$(R^2 = 0.33)$

Ce dernier modèle de prédiction est statistiquement représentatif. Sur l'ensemble des variables étudiées, trois paramètres (MO, $CaCO_3$, A) semblent être impliqués dans la stabilité de la structure des sols.

En raison du nombre restreint de données, il est utile d'indiquer que les modèles obtenus doivent être considérés plutôt comme une démarche de modélisation basée sur des résultats expérimentaux, que comme des modèles de prédiction proprement dits.

Le travail présenté est loin de venir à bout de la problématique envisagée, et sa continuité devrait être portée sur les axes suivants :

- les résultats obtenus doivent être confirmés par des travaux portant sur un nombre plus important d'échantillons.
- il aurait également été plus intéressant de pouvoir réaliser des modèles propres à chaque classe de sol.
- intégrer d'autres paramètres qui n'ont pas pu être mesurés ou pris en considération dans notre étude, à l'exemple du climat, le fer, les types de cultures (végétation), la pente et la minéralogie des argiles.

Tenir compte de ces recommandations permettra une meilleure compréhension du phénomène complexe qu'est la stabilité structurale des sols.

*Références
bibliographiques*

- Références bibliographiques -

- **Abiven S., 2004** – Relations entre caractéristiques des matière organiques apportées, dynamique de leur décomposition et évolution de la stabilité structurale du sol. Thèse de doctorat, Agrocampus Rennes, 262p.
- **Abiven S., Menasseri S., Chenu C., 2009** – The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability – A literature analysis. *Soil Biology & Biochemistry*, N° 41, pp. 1- 12.
- **Acton C.J., Rennie D.A., Paul E.A., 1962** – The relationship of polysaccharides to soil aggregation, *Can. J. Soil Sci.*, N° 43, pp. 201-209.
- **Albrecht A., Rangon L. et Barret P., 1992** – Effets de la matière organique sur la stabilité structurale et la détachabilité d'un vertisol et d'un ferrisol (Martinique). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, Vol. XXVII, N° 1, pp. 121-133.
- **Amézketa E., 1999** – Soil aggregate stability: A review. *Journal of Sustainable Agriculture* 14, pp. 83-151.
- **Andreux F., Dupuis T., Guillet B. et Jambu P., 1984** – Constituants organiques et interactions organo-minérales dans les sols. Livre jubilaire, AFES, pp 241-251.
- **Annabi M. 2005** – Stabilisation de la structure d'un sol limoneux par des apports de composts d'origine urbaine : relation avec les caractéristiques de leur matière organique. Thèse docteur ingénieur. INA-PG, 269p.
- **Antoni V., Le Bissonais Y., Thorette J., Zaidi N., Laroche B., Barthès S., Daroussin J. et Arrouays D., 2006** – Modélisation de l'aléa érosif des sols en contexte méditerranéen à l'aide d'un référentiel régional pédologique au 1/250 000 et confrontation aux enjeux locaux. *Etude et gestion des sols*, Vol. 13 (3), pp. 201- 222.
- **Auzet A.V., Boiffin J., Papy F., Maucorp J. and Ouvry J.F., 1990** – An approach to the assessment of erosion forms and erosion risk on agricultural land in the Northern Paris Basin. France. Ed. John Wiley and Sons Publishers, 400 p.
- **Bachelier G. et Gavinelli R., 1966** – Dosage global des glucides du sol par les méthodes colorimétriques à l'antrone et à l'orcinol. *Cah. ORSTOM. Sér.Pédol.*, Vol. IV (3), pp. 97-103.
- **Baize D., 1988** – Guide des analyses courantes en pédologie. Ed. INRA, Paris, 172 p.
- **Balesdent J., 1996** – Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols de France. *Etude et gestion des sols*, Vol. 3 (4), pp. 245-260.
- **Barthès B. et Roose É., 2001** – La stabilité de l'agrégation, un indicateur de la sensibilité des sols au ruissellement et à l'érosion : validation à plusieurs échelles. *Cahiers Agricultures*, N° 10, pp. 185-194.
- **Blanchet G., 2007** – Test d'homoscédasticité. Département de sciences biologique. Université de Montréal. 9 p.
- **Blume T., Weisbrod N., Selker J.S., 2005** – On the critical salt concentration for particle detachment in homogeneous sand and heterogeneous Hanford sediments. *Geoderma*, Vol. 124 (1), pp. 121-132.

- **Bresson, L.M, Boiffin, J., 1990** – Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field. *Geoderma*, Vol. 47 (3), pp. 301-325.
- **Boardman J., 1998** – Severe erosion on agricultural land in east Snssex. *Soil Technology*, Vol.1, pp. 333-348.
- **Boiffin J., 1984** – La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse de docteur-ingenieur. INA-PG, 320 p.
- **Bouajila A. and Gallali T., 2008** – Soil Organic Fractions and Aggregate Stability in Carbonated and No Carbonated Soils in Tunisia. *Journal of Agronomy*, Vol. 7 (2), pp. 127-137.
- **Boujila A. and Gallali T., 2007** – Protection of particulate organic matter by good structural stability in some Tunisian forest soils. In: *Proceedings of the 9th International Meeting on soils with Mediterranean Type of Climate*, Aix-en-Provence, France, pp.1-4.
- **Bourbonnais R., 1998** – *Econométrie*, Ed. Dunod, Paris, 306 p.
- - **Calvet R., 2003** – *Le sol propriétés et fonction, Tome 1: Constitution et structure phénomènes aux interfaces*. Ed. France Agricole, 456 p.
- **Cambardella, C.A. and Elliott, E.T., 1993** – Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions. *Geoderma*, Vol. 56 (4), pp. 449-457.
- **Capriel, P., Beck, T., Borchert, H. & Härter, P. 1990** – Relationships between soil aliphatic fraction extracted with supercritical hexane, soil microbial biomass, and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 54 (2), pp. 415-420.
- **Casenave A., Valentin C. 1988** – *Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*. Ed. ORSTOM, Paris, 230 p.
- **Chamayou H. et Legros J-P., 1989** – *Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol*. Ed. Presses universitaires de France, Paris, 593 p.
- **Chaney, K. & Swift, R. S. 1984** – The influence of organic matter on aggregate stability in some British soils. *Journal of Soil Science*, Vol. 35 (2), pp. 223-230.
- **Chantigny, M. H., Angers, D. A., Prevoist, D., Vezina, L. P. & Chalifour, F. P., 1997**– Soil aggregation and fungal and bacterial biomass under annual and perennial cropping systems. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 61(1), pp. 262-267.
- **Chenu C., 1989** – Influence of a fungal polysaccharide, scleroglucan, on clay microstructures. *Soil Biol. Biochem.*, Vol. 21(2), pp. 299-305.
- **Chenu C., Le Bissonnais, Y., Arrouays, D., 2000** – Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 64 (5), pp.1479-1486
- **Chenu, C., Balabane M., 2001** – Matière organique et activités biologiques des sols cultivés - une approche des matières organiques par leurs fonctions. *Perspectives agricoles*, 272, pp. 42-45.
- **Chenu C., 2003** – Comment caractériser les matières organiques du sol? Actes des 6^{ème} rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre. 18-19 nov. 2003, INRA-INAP, Grignon, pp.107-117.
- **Chenu C., 2006** – Mise au point d'outils de prévision de l'évolution de la stabilité de la structure de sols sous l'effet de la gestion organique des sols. Exposé colloque GESSOL, MEDD, 10p.

- **Cheshire M.V. and Hayes M.H.B., 1990** – Composition, Origins, Structures and reactivities of soil polysaccharides. In Soil colloids and their associations in aggregates. Plenum, Ed. New York and London, pp. 307-336.
- **Cheshire M.V., Dumat C., Fraser, A.R., Hillier, S., Stauton, S., 2000** – The interaction between soil organic matter and soil clay minerals by selective removal and controlled addition of organic matter. Eur. J. Soil Sci., Vol. 51(4), pp. 497-509.
- **Christen M., 2009** – Plantation, 1ere partie: étude des sols et préparation des parcelles. Chambre d'agriculture, Brèves, N° 33, 6 p.
- **Christensen B.T., 1992** – Physical Fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. Advances in Soil Science, Vol. 2 (1), pp.1-90.
- **Churchman G.J. and Tate K.R., 1987** – Stability of aggregates of different size grades in allophonic soil from volcanic ash in Zealand. Journal of Soil Science, Vol. 38 (1), pp.19-27.
- **Concaret, J., 1967** – Study of destruction mechanisms of soil aggregates in contact with aqueous solutes. Annales Agronomiques, Vol.18 (1), pp. 99-144.
- **Cosentino D. J., 2006** – Contribution des matières organiques à la stabilité de la structure des sols limoneux cultivés. Effet des apports organiques à Court terme. Thèse Doct. en Agronomie. Institut National Agronomique, Paris – Grignon, 186p.
- **Cosentino D., Chenu C., Michel J. et Tessier D., 2006** – Evolution de l'hydrophobie d'un sol et stabilisation de la structure suite à des apports de résidus de culture : Les Matières Organiques en France. Co-organisé par le Réseau Matières Organiques et le Groupe Français de l'IHSS, Grignon, 22-24 janvier 2006, 3 p.
- **Cosentino D., Chenu C. et Garnier P., 2007** – Evolution de la stabilité structurale lors d'un apport organique au sol : relations quantitatives et modélisation. Journées Nationales de l'Etude des Sols, 3-4-5 avril 2007, Association Française pour l'Etude des Sols, Angers, pp.188-189.
- **Crucianu M., 2010** – Reconnaissance des formes et méthode neuronales. Chapitre 3: Régression. CNAM, Paris – RCP 208, 8 p.
- **Dabin B., 1976** – Méthode d'extraction et de fractionnement des matières organiques. Application à quelques études pédologiques et agronomiques dans les sols tropicaux. Cah. ORSTOM Ser. Pédol., Vol. XIV (4), pp. 287-297.
- **Darboux F., Fox D., et Robin J., 2007** – Érosion des sols à la suite d'un feu de forêt : conséquences sur l'érodibilité et pour la conservation des sols. Journées Nationales de l'Etude des Sols, 3-4-5 avril 2007, Angers, pp. 319-320.
- **Degens B.P., Sparling G.P., 1996** – Changes in aggregation do not correspond with changes in labile organic C fractions in soil amended with 14 C-glucose. Soil Biol. Biochem., 28, pp. 453-462.
- **Degens B.P., Sparling G.P., Abbott L.K., 1996** – Increasing the length of hyphae in a sandy soil increases the amount of water-stable aggregates, Appl. Soil Ecol., 3, pp.149-159.
- **De Leo P.C., Baveye P., Ghiorse W.C., 1997** – Use of confocal laser scanning microscopy on soil thin-sections for improved characterization of microbial growth in unconsolidated soils and aquifer materials. J. Microbiol. Meth., 30, pp. 193-203.

- **Denis J.-B., Ritz M., 2005** – Notions de Base Utiles en Modélisation Stochastique de Phénomènes Complexes. Glossaire idéologique. INRA. 58p.
- **Dionot J.P., 2000** – Un nouvel éclairage scientifique sur l'amendement. Comité d'Etudes et de liaison des Amendements basique. Info, N°13, 3p.
- **Disnar J.R., Guillet B., Lottier N., Lebert M et Forgeard F., 2002** – Dégradation du bois de hêtres dans des litières forestières : évolution des polysaccharides (hémicellulose) et de la lignine. Journées Nationales de l'étude des sols, Orléans, AFES, Actes des 7eme Journées, pp. 165-166.
- **Djili K., 2000** – Contribution à la connaissance des sols du nord de l'Algérie. Création d'une banque de donnée informatisée et utilisation d'un système d'information géographique pour la spatialisation et valorisation des données pédologiques. Thèse Doct. D'état INA (El Harrach). 243 p.
- **Dormont B., 1999** – Introduction à l'économétrie. Ed. Montchrestien, E.J.A., Paris. 450p.
- **Dutartre, P., Bartoli, F., Andreux, F., Portal, J.M., Ange, A., 1993** – Influence of content and nature of organic matter on the structure of some sandy soils from West Africa. Geoderma, Vol. 56 (4), pp. 459-478.
- **Duchaufour P., Banneau M., Jacquin F., 1970** – Précis de pédologie. Ed. Masson, Paris, 481p.
- **Duval O., Darboux F., Lebugle F., Jacquot S. et Le Bissonnais Y., 2007** – Prédiction de la stabilité structurale des sols cultivés. Analyse statistique de la base de données Agresta. Journées Nationales de l'Etude des Sols, 3-4-5 avril 2007, Angers, pp. 331-332.
- **Ecrément Y., 1971** – Etude agro-pédologique de la Mitidja. DEMRH, 130p.
- **Elliott E.T., 1986** – Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. Soil Science Society of America Journal, Vol. 50 (4), pp. 627-633.
- **El-Swaify S.A., Emerson W.W., 1975** – Changes in the physical properties of soil clay due to precipitated aluminium and iron hydroxides. I. Swelling and aggregate stability after drying. Soil Sci. Soc. Am. Proc, Vol. 39 (5), pp. 1056-1063.
- **Emerson W.W., 1967** – A classification of soil aggregates based on their coherence in water. Aust.J.Soil Res., Vol. 5 (1), pp. 47-57.
- **Feller C., François C., Villemin G., Portal J.M., Toutain F., Morel J.L., 1991** – Nature des matières organiques associées aux fractions argileuses d'un sol ferrallitique. Comptes rendus de l'académie des sciences de Paris, 312, pp.1491-1497.
- **Fiès J. C. et Panini T., 1995** – Infiltrabilité et caractéristiques physique des croûtes formées sur massifs d'agrégats initialement secs ou humides soumis à des pluies simulées. Agronomie, Vol.15 (2), pp. 205-220.
- **Fortun, A., Fortun, C., Ortega, C., 1989** – Effect of farmyard manure and its humic fractions on the aggregate stability of a sandy-loam soil, J. Soil Sci., Vol. 40 (2), pp. 293-298.
- **Gaillard, V., Chenu, C., Recous, S., Richard, G., 1999** – Carbon, nitrogen and microbial gradients induced by plant residues decomposing in soil. Eur. J. Soil Sci., Vol. 50 (4), pp. 567-578.
- **Golchin A., Oades J.M., Skjemstad J.O., Clarke P., 1994** – Soil structure and carbon cycling. Aust. J. Soil Res., Vol. 32 (5), pp. 1043-1068.

- **Grasset L., 1997** – Etude de l’humine et des acides humiques des sols : Importance de la composante lipidique. Thèse de doctorat - Université de Poitiers.291p.
- **Guckert A., Chone T., Jacquin F., 1975** – Microflore et stabilité structurale des sols, Rev. Ecol. Biol. Sol, Vol. 12 (2), pp. 211-223.
- **Guérif, J., 1988** – Tensile strength of soil aggregates: influence of clay and organic matter content and variation with water content. Agronomie, Vol. 8 (2), pp. 379-386.
- **Guillet B., Disnar J.R., Karroum M., Lottier N., Laggoun-Défarge F., Toutain F., Villemin G., 2002** – Destin des polysaccharides et la lignine dans les mulls et moderns des sols d'une chronoséquence de hêtraie en forêt de Fougères. Composition, variabilité et dynamique microbienne. Journées Nationales de l'étude des sols, Orléans, AFES, Actes des 7eme Journées, pp. 165-166.
- **Haider, K., 1992** – Problems related to the humification processes in soils of temperate climates. In : G. Stotzky & J.M. Bollag éd., Soil Biochemistry, Vol. 7, New York, pp. 55-94.
- **Harris, R. F., Chesters, G., and Allen, O. N. 1966** – Dynamics of soil aggregation. Adv. Agron. 18, pp. 107-169.
- **Haynes, R.J., Swift R.S. & Stephen R.C., 1991** – Influence of mixed cropping rotations (pasture - arable) on organic matter content, stable aggregation and clod porosity in a group of soils. Soil and Tillage Research, Vol. 19 (1), pp. 77-87.
- **Haynes R.J., Francis G.S., 1993** – Changes in microbial biomass C, soil carbohydrate composition and aggregate stability induced by growth of selected crop and forage species under field conditions. J. Soil Sci., Vol. 44 (4), pp. 665-675.
- **Heddadj D. 1995** – La lutte contre l'érosion en Algérie. INRA. Alger. Algérie. pp. 168-175.
- **Hénin S., Monnier G., Combeau A., 1958** – Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. Annales Agronomiques, Vol. 9 (1), pp. 73-92.
- **Hénin, S., Gras, R., Monnier, G., 1969** – Le profil cultural : L'état physique du sol et de ses conséquences agronomiques. Paris, Masson, 332 p.
- **Hénin S., 1976** – Cours de physique du sol. Ed. ORSTOM, Paris, Vol. I, 159p.
- **Imache A., Chabaca M., Djebbara M., Merabet B., Hartani T., Bouarfa S., Palagos B., Kuper M., Le Goulven P., Le Grusse P. 2006** – Demandes en eau des exploitations agricoles du périmètre irrigué de la Mitidja ouest (Algérie). Economies d'eau en Systèmes IRrigués au Maghreb. Deuxième atelier régional du projet Sirma, Marrakech, Maroc, 29-31 mai 2006, 14 p.
- **Jamet R., 1986** – Les oxydisol de polynésie française caractérisation et fertilité. Cah. OROSTOM, Sér. Pédol., Vol. XXII (3), pp.285-299.
- **Jouany C., Chenu C. et Chassin D., 1992** – Détermination de la mouillabilité des constituants du sol à partir de mesures d'angles de contacts. Revue bibliographique ; Science du sol, Vol. 30 (1), pp.33-47.
- **Kay B.D., 1990** – Rates of changes of soil structure under different cropping systems. Advances in Soil Science, Vol. 12 (1), pp. 1-52.

- **Kemper, W. D. & Rosenau, R. C., 1986** – Aggregate stability and size distribution. In Methods of soil analysis. Part I, Physical and mineralogical methods. Agronomy monograph N° 9, pp. 425-442.
- **Keren R., Ben-Hur M., 2003** – Interaction effects of clay swelling and dispersion and CaCO₃ content on saturated hydraulic conductivity. Aust. J. Soil. Res., Vol. 41(6), pp. 979-989.
- **Labreuche, J., Bodet, J.M., 2001**– Matières organiques et activités biologiques sur les sols cultivés. Conséquences des techniques de travail du sol. Perspectives agricoles 272 (1), pp. 54-57.
- - **Lamar R., Bresson L.M., 1989** – Etat d'agrégation et rôle du fer dans les horizons fersiallitiques. Sci. Sol. Vol. 27 (3), pp. 243-256.
- **Le Bissonnais, Y., 1988** – Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terres sous l'action des pluies. Thèse Doct. de Science de la Terre. Univ.Orléans. 196p.
- **Le Bissonnais Y. et Le Souder C., 1995** – Mesure de la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. Etude et Gestion des Sols, Vol. 2 (1), pp. 43-56.
- **Le Bissonnais Y., 1996a** – Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. Eur. J. Soil Sci., 47 (3), pp. 425-437.
- **Le Bissonnais Y., 1996b** – Soil Characteristics and Aggregate Stability. In Soil Erosion, Conservation and Rehabilitation. Ed. M. Agassi, Ch. 3, pp. 41-60.
- **Le Bissonnais Y. and Arrouays D., 1997** – Aggregate stability and assessment of soil cru stability and erodibility : application to humic loamysoils with various organic carbon contents. Eur. J. of Soil Sci., Vol.48 (1), pp. 39-48.
- **Le Bissonnais Y. et Gascuel-Odoux C., 1998** – L'érosion hydrique des sols cultivés en milieu tempéré. In Sol interface fragile. Ed. INRA, Paris, pp. 129-142.
- **Le Bissonnais Y., Thorette J., Bardet C., et Daroussin J., 2002** – L'érosion hydrique des sols de France. Ed. INRA/IFEN, Orléans, 106 p.
- **Leguedois, S. & Le Bissonnais, Y., 2004** – Size fractions resulting from an aggregate stability test, interrill detachment and transport. Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 29 (9), 1117-1129.
- **Legout C., 2006** – Risques hydrométéorologiques, crues et inondations. Cours 5 : "hydrologie". Science de la terre, de l'univers et de l'environnement, Grenoble, 24 p.
- **Léonard, J., Ancelin, O., Ludwig, B., Richard, G. 2006** – Analysis of the dynamics of soil infiltrability of agricultural soils from continuous rainfall-runoff measurements on small plots. Journal of Hydrology, 326, pp. 122-134.
- **Lesty M., 2008** – Corrélations partielles et « corrélations duales ». Revue MODULAD, N°39. 22 p.
- **Lichtfouse E., Chenu, C., Baudin F., Leblond C., Da Silva M., Behard F., Derenne S., Largeau C., Wehrung P., Albrecht P., 1998** – A novel pathway of soil organicmatter formation by selective preservation of resistant straight-chain biopolymers: chemical and isotope evidence. Org. Geochem., Vol. 28 (6), pp. 411-415.
- **Liu A., Ma L., Bomke A., 2005** – Effects of Cover Crops on Soil Aggregate Stability, Total Organic Carbone, and Polysaccharides. Soil Sci. Soc. Am. J. Vol. 69 (6), pp. 2041- 2048.

- **Lynch J.M. and Bragg E., 1985** – Microorganisms and soil aggregate stability. *Advances in Soil Science*, 2 (2), pp. 133-171.
- **Marshall T.J. and Holmes J.W., 1988** – Soil physics, Cambridge University Press, 374p.
- **Martens D.A., 2000** – Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration. *Soil Biol. Biochem.*, 32 (3), pp. 361-369.
- **Martens, D.A., 2002** – Relationship between plant phenolic acids released during soil mineralization and aggregate stabilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66(6), pp. 1857-1867.
- **Matta N., Sidoumou K., Ninova G., Atifi H., 2009** – Modélisation d'une analyse pragmatolinguistique d'un forum de discussion. 7ème Colloque du chapitre français de l'ISKO, Lyon Intelligence collective et organisation des connaissances. 9 p.
- **McCarthy P., Clapp C.E., Malcom R.L. and Bloom P.R., 1990** – Humic substances in soil and crop sciences : Selected readings. American Society of Agronomy, Madison, pp 187- 202.
- **Messahel M. et Benhafid M.S., 2008** – Gestion du périmètre d'irrigation de la Mitidja Ouest. Tranche 1 (Algerie), ENSH, pp. 59-66.
- **Mezali M. 2003** – Forum des Nations Unies sur les forets. (3^{ème} session, Genève). Alger, Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural Direction Générale des Forêts, 9 p.
- **Monnier G., 1965** – Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols, Thèse de la faculté des sciences de Paris, 140p.
- **Monnier G., 1984** – Recherches sur la stabilité structurale (exemples d'application). Livre jubilaire, AFES, pp. 293-297.
- **Morris D.C., 1948** – Quantitative determination of carbohydrates with Dreywood's Anthrone reagent. *Science*, Vol. 107 (2775), pp. 254-255.
- **Mutin L., 1977** – La Mitidja. Décolonisation et espace géographique. Ed. Office Pres. Univ., Alger, 607p.
- **N'Dayegamiye A. et Drapeau A., 2009** – Influence de la nature des fertilisants apportée sur la dynamique de la structure et les teneurs en carbone et en substances humiques pour un loam argileux. Sainte-Rosaline. Agrosolution, Vol 20 (1), pp.15-22.
- **Oades J.M., 1993** – The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure, *Geoderma*, 56 (4), pp. 377- 400.
- **Orcel J., Hénin S. et Cailère S., 1963** – Minéralogie des argiles. Ed. Masson, Paris, 355 p.
- **Piccolo, A. & Mbagwu, J. S. C. 1999** – Role of hydrophobic components of soil organic matter in soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 63 (6), pp. 1801-1810.
- **Puget P., Chenu, C., Balesdent J., 1995** – Total and young organic matter distributions in aggregates of silty soils. *Eur. J. Soil Sci.*, Vol. 46 (4), pp. 449-459.
- **Quantin P. et Zebrowski C., 1993** – Impact de l'homme sur l'érosion des sols a "Tepetate" de la région de Mexico. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* Vol. 28 (2), pp. 175-185.

- **Raissi O., 1992** – Cartographie des sols et pédogenèse de la plaine de Mitidja (centre Algérien). Symposium n°: 15. p. 13.
- **Rathore T.R., Ghildyal B.P., Sachan R.S., 1982** – Germination and emergence of soybean under crusted soil conditions. *Plant & Soil*, Vol. 65 (1), pp. 73-77.
- **Richard G., 1988** – La germination des semences de betteraves sucrières (*Beta Vulgaris L.*) en conditions d'hypoxie : modélisation, contribution à un diagnostic au champ. Thèse de docteur ingénieur de l'INA-PG, 108p.
- **Richard G., Boiffin J., 1990** – Effet de l'état structural du lit de semences sur la germination et la levée des cultures. In *La structure du sol et son évolution*, Ed. INRA, Paris, pp. 111-136.
- **Roose E. 1977** – Erosion et ruissellement en Afrique de l'ouest. Ed. ORSTOM, Paris, N° 78, 108 p.
- **Roose E., 1984** – Impact du défrichement sur la dégradation des sols tropicaux, Ed. Mach. Agric.TROP., Paris, N° 87, pp. 24-36.
- **Saidi D., 2004** – Influence de la phase saline sur les propriétés physiques des matériaux argileux du bas Chelif. Thèse de doctorat d'Etat en Sciences agronomiques, INA, El harrach. 181p.
- **Sall S. N. 2010** – Evaluation de la dégradation des sols. Projet LADA-L. Atelier de Formation.75 p.
- **Sanchez-Monédéro M.A., Cegarra J., Garcia D., Roig A. 2002** – Chemical and structural evolution of humic acids during organic waste composting. *Biodegradation* N° 13, pp 361–371.
- **Sarag M., 1983** – Méthodologie de la matière organique des sols cas de la matière organique des sols du semi aride (Hodna). Cours photocopié, INA, El-harrach, 17 p.
- **Schubetzer C., Bastide G. et Feix I., 2007** – Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturelles Sans Labour (TCSL) en France. Etude réalisée par ARVALIS - Institut du végétal, AREAS, INRA de Dijon, AgroParisTech – INRA de Paris- Grignon, 86 p.
- **Sidi H. et Pansu M., 1990** – Effets d'apport organiques et de gypse sur la stabilité structurale de deux sols méditerranéens. *Science du sol*, Vol. 28, (3), pp. 237-256.
- **Six J., Elliot E.T., Paustian K., 2000** – Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation : a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biol. Biochem.*, Vol. 32 (8), pp. 2099-2103.
- **Six J., Feller C., Deneff K., Ogle SM., Moraes J.C., Albrecht A., 2002** – Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils: Effects of no-tillage. *Agronomie*, Vol. 22 (6), pp. 755-772.
- **Stevenson F.J., 1982** – Extraction, fraction and general chemical composition of soil organic matter. Ed. *Humus Chemistry, Genesis, Composition, Reactions*. Ed. John Wiley and Sons, New York, pp 26-54.
- **Stevenson F.J., 1985** – Geochemistry of soil humic substances. In *Humic substances in soil, sediment and water*. Ed. New York, Wiley-Interscience, pp. 13-52.
- **Stevenson F.J., 1994** – *Humus chemistry: Genesis, composition, reactions*. 2nd Ed. John Wiley & Sons, New York, 496p.

- **Stotzky G., 1997** – Soil as an environment for microbial life. In: *Modern Soil Microbiology*. Ed. Modern soil microbiology, New York, pp. 1-20.
- **Tardieu, F., 1990** – Effets de l'état structural du sol sur l'enracinement. Que prendre en compte pour la modélisation ? In *La structure du sol et son évolution*, Laon (France), 9 janvier 1990, Ed. INRA Paris, pp. 91-109.
- **Tate R.L., 1987** – Soil organic matter: biological and ecological effects. Ed. John Wiley & Sons, New York, 291 p.
- **Theng B.K.G., 1970** – interactions of clay minerals with organic polymers. Some practical applications. *Clays and Clay Minerals*, Vol. 18, pp. 357-362.
- **Tisdall J.M. et Oades J.M., 1982** – Organic matter and water-stable aggregates in soils, *J. Soil Sci.*, Vol. 33 (2), pp. 141-163.
- **Tisdall, J. M., 1996** – Formation of soil aggregates and accumulation of soil organic matter. In *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils*. Carter, M.R and Stewart, B.A. (eds.). *Advances in Soil Science*, 469 (1), pp. 57-96.
- **Toutain P.L. & Bousquet-Mélou A., 2007** – Modèles et modélisation. Diplôme Universitaire de Pharmacocinétique de Toulouse UMR 181 de Physiopathologie et Toxicologie Expérimentales INRA/ENVT Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, 14p.
- **Uzêda M., Espíndola C., Cardoso E., 1995** – Effets d'une culture intensive sur le carbone organique et microbien du sol et ses conséquences dans la structure d'un Oxisol du Brésil. *Symposium N° 11*, 6p.
- **Volkoff B. et Cerri C., 1978** – Quelques propriétés de l'humus d'un sol ferrallitique humifère sur granite du Parana (Brésil). (Extrait de *Science du Sol - Bulletin de l'A.F.E.S.*), N° 4, pp. 269-280.
- **Wright S. F., Starr, J. L., and Paltineanu, I. C., 1999** – Changes in aggregate stability and concentration of glomalin during tillage management transition. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol. 63 (5), pp. 1825-1829.
- **Wuddivira M.N. & Camps-Roach G., 2006** – Effects of organic matter and calcium on soil structural stability. *Journal compilation, British Society of Soil Science*, pp. 722-727.
- **Yoder RE. 1936** – A direct method of aggregate analysis of soils and a study of nature of erosion losses. *Journal of the American Society of Agronomy*, Vol. 28 (3), pp. 337-351.
- **Young I. M. & Crawford, J. W., 2004** – Interactions and Self-Organization in the Soil-Microbe Complex. *Science* 340, pp. 1634-1637.
- **Zhu Y.G., Miller, R.M., 2003** – Carbon cycling by arbuscular mycorrhizal fungi in soil-plant systems. *Trends Plant Sci.*, Vol. 8 (9), pp. 407-409.
- **Zibilske Larry M. et Bradford Joe M., 2007** – Soil Aggregation, Aggregate Carbon and Nitrogen, and Moisture Retention Induced by Conservation Tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 71 (3), pp. 793 - 802.

Annexes

Annexe 1

Localisation des profils

| Profil | Classe de sols (CPCS, 1967) | Localisation | |
|--------|-----------------------------|---------------|-----------------|
| | | X | Y |
| 1 | calcimagnésique | 2° 29' 34.59" | 6° 32' 37.87" |
| 2 | calcimagnésique | 2° 28' 45.83" | 36° 32' 42.82" |
| 3 | calcimagnésique | 2° 26' 32.31" | 36° 32' 5.60" |
| 4 | peu évolué | 2° 26' 36.85" | 36° 31' 43.33" |
| 5 | sol rouge | 2° 25' 55.57" | 36° 30' 29.56" |
| 6 | sol rouge | 2° 26' 36.24" | 36° 30' 23.06" |
| 7 | sol rouge | 2° 25' 52.46" | 36° 30' 45.15" |
| 8 | sol rouge | 2° 25' 46.49" | 36° 30' 51.052" |
| 9 | sol rouge | 2° 25' 40.00" | 36° 30' 55.94" |
| 10 | peu évolué | 2° 27' 9.29" | 36° 30' 32.17" |
| 11 | peu évolué | 2° 35' 45.39" | 36° 33' 48.60" |
| 12 | peu évolué | 2° 35' 44.05" | 36° 34' 2.36" |
| 13 | peu évolué | 2° 35' 21.50" | 36° 34' 10.21" |
| 14 | calcimagnésique | 2° 31' 24.27" | 36° 33' 18.42" |
| 15 | vertisol | 2° 31' 39.68" | 36° 33' 2.15" |
| 16 | vertisol | 2° 32' 34.32" | 36° 31' 56.17" |
| 17 | vertisol | 2° 32' 34.79" | 36° 31' 45.69" |
| 18 | vertisol | 2° 32' 35.87" | 36° 31' 36.64" |
| 19 | vertisol | 2° 32' 36.33" | 36° 31' 26.41" |
| 20 | vertisol | 2° 32' 53.09" | 36° 31' 16.78" |
| 21 | peu évolué | 2° 34' 2.15" | 36° 30' 34.43" |
| 22 | peu évolué | 2° 33' 53.51" | 36° 30' 30.44" |
| 23 | sol rouge | 2° 34' 24.60" | 36° 30' 30.94" |
| 24 | sol rouge | 2° 34' 33.13" | 36° 30' 26.12" |
| 25 | vertisol | 2° 34' 7.70" | 36° 29' 40.61" |
| 26 | vertisol | 2° 34' 6.92" | 36° 29' 25.62" |
| 27 | vertisol | 2° 34' 26.65" | 36° 28' 29.79" |
| 28 | sol rouge | 2° 35' 51.66" | 36° 28' 13.97" |
| 29 | peu évolué | 2° 36' 42.01" | 36° 28' 17.42" |
| 30 | peu évolué | 2° 37' 43.69" | 36° 31' 6.17" |
| 31 | vertisol | 2° 33' 54.41" | 36° 29' 19.28" |
| 32 | vertisol | 2° 34' 54.17" | 36° 28' 30.56" |
| 33 | vertisol | 2° 34' 55.26" | 36° 28' 22.93" |
| 34 | vertisol | 2° 35' 1.08" | 36° 28' 15.28" |
| 35 | vertisol | 2° 35' 10.17" | 36° 28' 8.55" |
| 36 | vertisol | 2° 35' 14.25" | 36° 28' 26.61" |
| 37 | vertisol | 2° 35' 23.28" | 36° 28' 16.07" |
| 38 | sol rouge | 2° 35' 42.85" | 36° 28' 42.11" |
| 39 | sol rouge | 2° 35' 40.59" | 36° 28' 50.93" |
| 40 | peu évolué | 2° 36' 45.97" | 36° 28' 26.43" |
| 41 | peu évolué | 2° 36' 22.78" | 36° 28' 18.27" |
| 42 | sol rouge | 2° 37' 42.88" | 36° 28' 34.35" |

Annexe 1
Localisation des profils (suite)

| Profil | Classe de sols (CPCS, 1967) | Localisation | |
|--------|-----------------------------|---------------|----------------|
| | | X | Y |
| 43 | sol rouge | 2° 37' 52.94" | 36° 28' 34.03" |
| 44 | sol rouge | 2° 37' 55.42" | 36° 28' 42.34" |
| 45 | peu évolué | 2° 37' 31.19" | 36° 28' 45.38" |
| 46 | sol rouge | 2° 37' 46.97" | 36° 28' 52.88" |
| 47 | peu évolué | 2° 37' 33.46" | 36° 29' 0.12" |
| 48 | sol rouge | 2° 37' 58.28" | 36° 28' 57.55" |
| 49 | peu évolué | 2° 37' 35.28" | 36° 30' 56.71" |
| 50 | peu évolué | 2° 37' 52.82" | 36° 30' 39.93" |

Annexe 2

Principe de la méthode DABIN (1976)

La méthode utilisée est celle de Dabin (1971). Par des épuisements successifs à l'acide phosphorique, au pyrophosphate de sodium et à la soude, on extrait et on sépare les matières légères, les acides fulviques libres, les acides humiques et fulviques pyrophosphate, les acides humiques et fulvique soude. Le résidu non extrait est l'humine.

- Au départ, le sol est broyé à 0,2 mm puis traité par une solution d'acide phosphorique (2 M) pour séparer la matière végétale légère des acides fulviques libres.
- La technique du fractionnement de la matière humique du sol (la fraction extractible) comporte l'extraction par des sels et l'extraction par des réactifs alcalins, deux opérations successives :
- l'extraction des substances humiques par le pyrophosphate de sodium (0.1 M) semble la plus efficace par sa dispersion parfaite du complexe argilo humique. Ces acides humiques extraits, qui restent intimement liés à l'argile, sont communément appelés les acides humiques gris,
- l'extraction des substances humiques par la soude diluée (0.1 M) donne des acides humiques bruns, qui restent faiblement liées aux argiles.
- sur une autres aliquote, les acides humiques sont précipitées par H_2SO_4 . Le précipité est lavé et le carbone déterminé comme précédemment. Les acides fulviques sont obtenus par différence.
- une aliquote de chaque solution est desséchée à l'étuve et le carbone est dosé par le bichromate de potassium. On détermine ainsi les matières humiques totales (A. fulvique + A. humique).
- Pour ce qui est de l'humine qui est l'une des substances humiques non extractible, en raison de sa liaison très intime avec l'argile, Tiurin et Gutkina (1940) in Duchaufour (1970) estiment que seule la destruction des silicates permet de la libérer du fait qu'elle soit considérée non soluble dans les réactifs alcalins.

Principe de la méthode Dosage des polysaccharides (méthode colorimétrique à l'anthrone) (Bachelier et Gavinelli, 1966)

- On procède tous d'abord par une extraction des polysaccharides par une hydrolyse acide (H_2SO_4 3N) selon la méthode de Brink (1960), suivie par un dosage par la méthode colorimétrique à l'anthrone (Morris 1948).
- D'après Morris (1948), l'anthrone réagit avec tous les oses, diosides et polysaccharides testés, dont notamment l'amidon et les diverses dextrans. Elle paraît aussi réagir avec les polysaccharides de nombreuses gammes bactériennes.

Technique de dosage

- 1 g d'anthrone est dissous dans 1 demi-litre d'acide sulfurique à 95 % (acide préparé par addition d'un litre d'acide sulfurique pur à 50 ml d'eau distillée)
- 5 ml de la solution sucrée à analyser sont placés dans un tube en verre de 25 mm de diamètre, puis recouverts par 10 ml du réactif sulfurique à l'anthrone.

Après agitation du tube pour homogénéisation, ce dernier est placé au moins 10 mn dans un portoir et la couleur qui se développe au cours de l'échauffement du mélange est ensuite mesurée dans un photo-colorimètre 580 ou 620 *mu*. Une courbe d'étalonnage avec des solutions plus ou moins diluées de glucose.

Annexe 3

1. Régression pas à pas ascendante

Le principe

On sélectionne dans un premier temps la variable explicative dont le coefficient de corrélation simple est le plus élevé avec la variable à expliquer, soit x_i cette variable. La deuxième étape consiste alors à calculer les coefficients de corrélation partielle r_{yx_j, x_i}^2 pour $j \neq i$ et à retenir la variable explicative ayant le coefficient le plus élevé.

Après chaque incorporation d'une nouvelle variable explicative, nous examinons les t de *Student* de chacune des variables explicatives préalablement sélectionnées et nous éliminons du modèle celle(s) dont le t de *Student* est inférieur au seuil critique.

2. Tests de validation des modèles de régression

Le modèle de régression linéaire (simple & multiple) repose sur certaines hypothèses ; ces dernières doivent être vérifiées afin que le modèle soit valide (Dormont, 1999 et Bourbonnais, 1998).

2.1. Hypothèses stochastiques

- **H₁** : les valeurs $x_{i,t}$ (variables explicatives) sont observées sans erreurs.
- **H₂** : $E(\varepsilon_i) = 0$, l'espérance mathématique de l'erreur est nulle ; pratiquement, nous voulons avoir un modèle qui pourrait nous fournir des estimateurs dont la différence avec les vraies valeurs est en moyenne nulle.
- **H₃** : $E(\varepsilon_i^2) = \sigma^2$, la variance de l'erreur est constante ($\forall i$) (*homoscédasticité*) / le risque de l'amplitude de l'erreur est le même quelque soit la période ou l'observation.

Lors de la visualisation des nuages de points, il ne s'agira pas de se focaliser sur la tendance des données, mais plutôt sur la forme de la distribution du nuage dans l'espace. Ainsi, un nuage de forme conique peut être le signe révélateur d'une variance croissante ou décroissante ou les deux à la fois, dans ces cas, l'hypothèse est considérée comme non valide (Blanchet, 2007).

- **H₄** : $E(\varepsilon_i \varepsilon_{i'}) = 0$ si $i \neq i'$, les erreurs sont non corrélées entre elles ; la présence d'une autocorrélation peut être l'effet d'une ou plusieurs variables explicatives non prises en considération dans le modèle.

Cette hypothèse est vérifiée à l'aide du test de *Durbin & Watson*.

Afin de tester l'hypothèse H₀, *Durbin & Watson* ont tabulé les valeurs critiques de DW au seuil de 5 % en fonction de la taille de l'échantillon n et du nombre de variables explicatives (k). La lecture de la table permet de déterminer deux valeurs, par exemple : si $d_1 = 1,38$ et $d_2 = 1,72$ et $DW = 1,99$, nous pouvons accepter l'hypothèse nulle (figure 1).

| | | | | | | | | |
|----------|-------|---|-------|----------|---------|---|---------|----------|
| 0 | d_1 | ? | d_2 | 2 | $4-d_2$ | ? | $4-d_1$ | 0 |
| Corr > 0 | | | | Corr = 0 | | | | Corr < 0 |
| 0 | 1,38 | | 1,72 | 2 | 2,28 | | 2,62 | 4 |

Figure 1. Interprétation du test de Durbin et Watson (Bourbonnais, 1998)

Annexe 3

Cependant si l'hypothèse n'est pas vérifiée, nous devons réestimer le modèle en appliquant d'autres méthodes prévues dans le cas d'autocorrélation des erreurs (résidus) (Bourbonnais, 1998).

L'une des procédures consiste à estimer d'abord l'autocorrélation ρ à partir de la statistique de *Durbin et Watson* $\hat{\rho} = 1 - \frac{DW}{2}$, puis transformer les variables et effectuer la régression sur les quasi-différences :

$$y_i - \hat{\rho} y_{i-1} = b_0 + a_1(x_{1i} - \hat{\rho} x_{1i-1}) + \dots + a_k(x_{ki} - \hat{\rho} x_{ki-1}) + v_i \quad \text{et} \quad \hat{a}_0 = \hat{b}_0 / (1 - \hat{\rho})$$

- **H₅** : $Cov(x_{ij}, \varepsilon_j) = 0$; le principe est que les erreurs d'estimation ne doivent pas être liées aux valeurs prises par une variable explicative. Le test se base sur la matrice de corrélation ; si tel n'est pas le cas, il y a sûrement une variable explicative importante encore cachée dans les erreurs et non considérée dans le modèle.
- **H₆** : $\varepsilon_i \rightarrow N(0, \sigma^2_\varepsilon)$; l'hypothèse est valide si les erreurs sont de loi normale (espérance nulle et variance constante σ^2 hypothèses 2 & 3). La normalité est une condition nécessaire pour la construction des tests statistiques et définir la loi de probabilité des estimateurs. L'hypothèse est vérifiée à l'aide du test *Shapiro-Wilk*.

2.2. Hypothèses structurelles

- **H₇** : absence de *colinéarité* entre les variables explicatives.
- **H₈** : $n > k + 1$, le nombre d'observations est supérieur au nombre des séries explicatives

Les hypothèses étant validées, nous pouvons vérifier la significativité de la régression et estimer les coefficients du modèle sensé être stable et fiable.

Toutefois, il est utile de soutenir les régressions obtenues par quelques statistiques. Les étapes appliquées se présentent comme suit :

- une représentation graphique des vraies valeurs des tests à celles obtenues en injectant les valeurs des variables explicatives dans les modèles et visualisation des écarts.
- calculer quelques statistiques descriptives :
 - ✓ Moyenne,
 - ✓ Variance,
 - ✓ Test de différence entre les moyennes (Anova ou *Mann & Whitney*).
- dans le cas d'un décalage significatif qui peut être soit dû au hasard ou à une variable explicative non prise en considération, nous pouvons affiner les fonctions pédotransfert qui sont sensées bien reproduire le test en question, en ayant recours à des techniques mathématiques telles que des transformations linéaires.

Annexe 4

Table *Durbin & Watson*

| Observations | | X variables, excluding the intercept | | | | | | | | | |
|--------------|-------|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| N | Prob. | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | |
| | | D-L | D-U | D-L | D-U | D-L | D-U | D-L | D-U | D-L | D-U |
| 15 | 0.05 | 1.08 | 1.36 | 0.95 | 1.54 | 0.82 | 1.75 | 0.69 | 1.97 | 0.56 | 2.21 |
| | 0.01 | 0.81 | 1.07 | 0.7 | 1.25 | 0.59 | 1.46 | 0.49 | 1.70 | 0.39 | 1.96 |
| 20 | 0.05 | 1.20 | 1.41 | 1.10 | 1.54 | 1.00 | 1.68 | 0.90 | 1.83 | 0.79 | 1.99 |
| | 0.01 | 0.95 | 1.15 | 0.86 | 1.27 | 0.77 | 1.41 | 0.68 | 1.57 | 0.60 | 1.74 |
| 25 | 0.05 | 1.29 | 1.45 | 1.21 | 1.55 | 1.12 | 1.66 | 1.04 | 1.77 | 0.95 | 1.89 |
| | 0.01 | 1.05 | 1.21 | 0.98 | 1.30 | 0.90 | 1.41 | 0.83 | 1.52 | 0.75 | 1.65 |
| 30 | 0.05 | 1.35 | 1.49 | 1.28 | 1.57 | 1.21 | 1.65 | 1.14 | 1.74 | 1.07 | 1.83 |
| | 0.01 | 1.13 | 1.26 | 1.07 | 1.34 | 1.01 | 1.42 | 0.94 | 1.51 | 0.88 | 1.61 |
| 40 | 0.05 | 1.44 | 1.54 | 1.39 | 1.60 | 1.34 | 1.66 | 1.39 | 1.72 | 1.23 | 1.79 |
| | 0.01 | 1.25 | 1.34 | 1.20 | 1.40 | 1.15 | 1.46 | 1.10 | 1.52 | 1.05 | 1.58 |
| 50 | 0.05 | 1.50 | 1.59 | 1.46 | 1.63 | 1.42 | 1.67 | 1.38 | 1.72 | 1.34 | 1.77 |
| | 0.01 | 1.32 | 1.40 | 1.28 | 1.45 | 1.24 | 1.49 | 1.20 | 1.54 | 1.16 | 1.59 |
| 60 | 0.05 | 1.55 | 1.62 | 1.51 | 1.65 | 1.48 | 1.69 | 1.44 | 1.73 | 1.41 | 1.77 |
| | 0.01 | 1.38 | 1.45 | 1.35 | 1.48 | 1.32 | 1.52 | 1.28 | 1.56 | 1.25 | 1.60 |
| 80 | 0.05 | 1.61 | 1.66 | 1.59 | 1.69 | 1.56 | 1.72 | 1.53 | 1.74 | 1.51 | 1.77 |
| | 0.01 | 1.47 | 1.52 | 1.44 | 1.54 | 1.42 | 1.57 | 1.39 | 1.60 | 1.36 | 1.62 |
| 100 | 0.05 | 1.65 | 1.69 | 1.63 | 1.72 | 1.61 | 1.74 | 1.59 | 1.76 | 1.57 | 1.78 |
| | 0.01 | 1.52 | 1.56 | 1.50 | 1.58 | 1.48 | 1.60 | 1.46 | 1.63 | 1.44 | 1.65 |

Annexe 4

Les valeurs critiques de r pour $\alpha = 0,05 ; 0,01 ; 0,001$
(table de FISHER ajustée)

| α k | 0,05 | 0,01 | 0,001 |
|---------------|---------------|----------------|----------------|
| 1 | 0,99692 | 0,999871 | 0,9999988 |
| 2 | 0,95000 | 0,990000 | 0,99900 |
| 3 | 0,8783 | 0,95873 | 0,99116 |
| 4 | 0,8114 | 0,91720 | 0,97406 |
| 5 | 0,7545 | 0,8745 | 0,95074 |
| 6 | 0,7067 | 0,8343 | 0,92493 |
| 7 | 0,6664 | 0,7977 | 0,8982 |
| 8 | 0,6319 | 0,7646 | 0,8721 |
| 9 | 0,6024 | 0,7348 | 0,8471 |
| 10 | 0,5760 | 0,7079 | 0,8233 |
| 11 | 0,5529 | 0,6835 | 0,8010 |
| 12 | 0,5324 | 0,6614 | 0,7800 |
| 13 | 0,5139 | 0,6444 | 0,7603 |
| 14 | 0,4973 | 0,6226 | 0,7426 |
| 15 | 0,4824 | 0,6055 | 0,7246 |
| 16 | 0,4683 | 0,5897 | 0,7084 |
| 17 | 0,4555 | 0,5751 | 0,6932 |
| 18 | 0,4438 | 0,5614 | 0,6787 |
| 19 | 0,4329 | 0,5487 | 0,6652 |
| 20 | 0,4227 | 0,5368 | 0,6524 |
| 25 | 0,3809 | 0,4869 | 0,5974 |
| 30 | 0,3494 | 0,4487 | 0,5541 |
| 35 | 0,3246 | 0,4182 | 0,5189 |
| 40 | 0,3044 | 0,3932 | 0,4896 |
| 45 | 0,2875 | 0,3721 | 0,4648 |
| 50 | 0,2732 | 0,3541 | 0,4433 |
| 60 | 0,2500 | 0,3248 | 0,4078 |
| 70 | 0,2319 | 0,3017 | 0,3799 |
| 80 | 0,2172 | 0,2830 | 0,3568 |
| 90 | 0,2050 | 0,2673 | 0,3375 |
| 100 | 0,1946 | 0,2540 | 0,3211 |
| / | / | / | / |
| / | / | / | / |
| / | / | / | / |
| / | / | / | / |
| 200 | 0,1381 | 0,18088 | 0,22978 |
| 500 | 0,0875 | 0,11488 | 0,1464 |

Valeurs calculées {

Annexe 5

Tableau I. Matrice de corrélations entre résidus & variables explicatives pour le test d'humectation rapide

| Variable | Résidus | MO | CaCO ₃ |
|-------------------|---------|------|-------------------|
| Résidus | 1,00 | 0,00 | 0,00 |
| MO | 0,00 | 1,00 | 0,04 |
| CaCO ₃ | 0,00 | 0,04 | 1,00 |

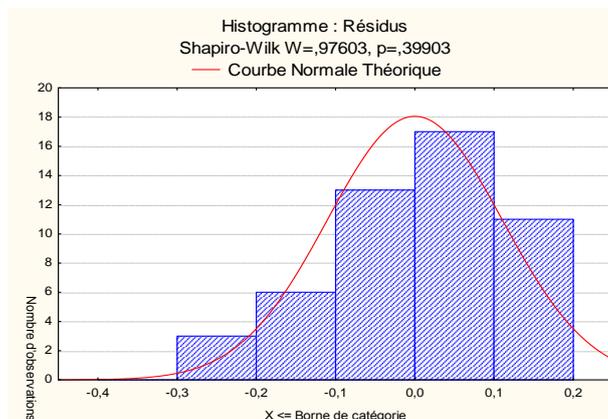


Figure 1. Normalité des résidus test de Shapiro-Wilk pour le traitement d'humectation rapide

Tableau II. Valeurs prévues & résidus de la régression multiple pour le test d'humectation rapide

| N° d'Obs. | Valeurs Prévues & Résidus (Data Base Données Brutes MWDHR) Var. dépendante : MWDHR | | | | | |
|-----------|---|---------------|-----------|--------------------|------------------|--------------------|
| | Valeur Observée | Valeur Prévue | Résidus | Standard Val. Prév | Standard Résidus | Err.Type Val. Prév |
| 28 | 0,570405 | 0,646868 | -0,076463 | 1,18126 | -0,66323 | 0,036323 |
| 29 | 0,658938 | 0,608302 | 0,050637 | 0,85718 | 0,43921 | 0,021751 |
| 30 | 0,530065 | 0,495192 | 0,034873 | -0,09330 | 0,30248 | 0,033819 |
| 31 | 0,519745 | 0,519707 | 0,000037 | 0,11271 | 0,00033 | 0,040484 |
| 32 | 0,453975 | 0,566412 | -0,112437 | 0,50518 | -0,97526 | 0,036185 |
| 33 | 0,553130 | 0,521255 | 0,031875 | 0,12571 | 0,27648 | 0,030571 |
| 34 | 0,492160 | 0,572675 | -0,080515 | 0,55780 | -0,69837 | 0,040336 |
| 35 | 0,372061 | 0,605181 | -0,233120 | 0,83096 | -2,02204 | 0,033453 |
| 36 | 0,454645 | 0,448930 | 0,005715 | -0,48205 | 0,04957 | 0,023365 |
| 37 | 0,421378 | 0,687567 | -0,266190 | 1,52327 | -2,30888 | 0,038245 |
| 38 | 0,527650 | 0,553135 | -0,025485 | 0,39361 | -0,22105 | 0,028636 |
| 39 | 0,482950 | 0,508201 | -0,025251 | 0,01602 | -0,21902 | 0,034250 |
| 40 | 0,544170 | 0,562528 | -0,018358 | 0,47254 | -0,15924 | 0,039853 |
| 41 | 0,419411 | 0,455062 | -0,035651 | -0,43052 | -0,30923 | 0,025199 |
| 42 | 0,534550 | 0,374363 | 0,160187 | -1,10865 | 1,38944 | 0,040122 |
| 43 | 0,372904 | 0,313047 | 0,059857 | -1,62389 | 0,51919 | 0,036439 |
| 44 | 0,404626 | 0,366576 | 0,038049 | -1,17408 | 0,33003 | 0,041577 |
| 45 | 0,373117 | 0,370216 | 0,002902 | -1,14349 | 0,02517 | 0,050706 |
| 46 | 0,530775 | 0,440547 | 0,090228 | -0,55249 | 0,78262 | 0,028896 |
| 47 | 0,315780 | 0,427596 | -0,111816 | -0,66131 | -0,96988 | 0,048328 |
| 48 | 0,310035 | 0,275134 | 0,034901 | -1,94248 | 0,30272 | 0,041159 |
| 49 | 0,483581 | 0,354687 | 0,128895 | -1,27399 | 1,11801 | 0,031858 |
| 50 | 0,859290 | 0,683454 | 0,175836 | 1,48870 | 1,52517 | 0,037838 |
| Minimum | 0,254600 | 0,275134 | -0,266190 | -1,94248 | -2,30888 | 0,021751 |
| Maximum | 0,966897 | 0,771813 | 0,195084 | 2,23119 | 1,69212 | 0,055600 |
| Moyenne | 0,506295 | 0,506295 | 0,000000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,035650 |
| Médiane | 0,483266 | 0,501622 | 0,004565 | -0,03926 | 0,03960 | 0,035357 |

Tableau III. Qualité d'ajustement du test d'humectation rapide

| Statistique | Valeur |
|-------------------------|----------|
| R Multiple | 0,73285 |
| R ² Multiple | 0,53707 |
| R ² Ajusté | 0,49592 |
| F(4,45) | 13,05179 |
| p | 0,00000 |
| Err-Type Estimations | 0,11529 |

Tableau IV. La statistique de Durbin & Watson pour le test d'humectation rapide

| D de Durbin-Watson (Data Base Données Brutes MWDHR) et autocorrélation des résidus | |
|--|--------------------|
| D Durbin Watson | Auto-Corr. |
| Estimat. | 1,991860 -0,056511 |

Annexe 6

Tableau I. Matrice de corrélations entre résidus & variables explicatives pour le test d'humectation lente

| Variable | A | PS | ML | Résidus |
|----------|-------|-------|-------|--------------|
| A | 1,00 | -0,16 | 0,10 | 0,00 |
| PS | -0,16 | 1,00 | -0,55 | -0,00 |
| ML | 0,10 | -0,55 | 1,00 | 0,00 |
| Résidus | 0,00 | -0,00 | 0,00 | 1,00 |

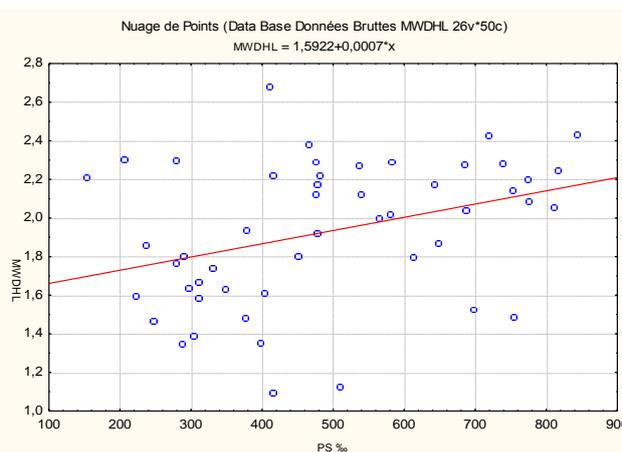
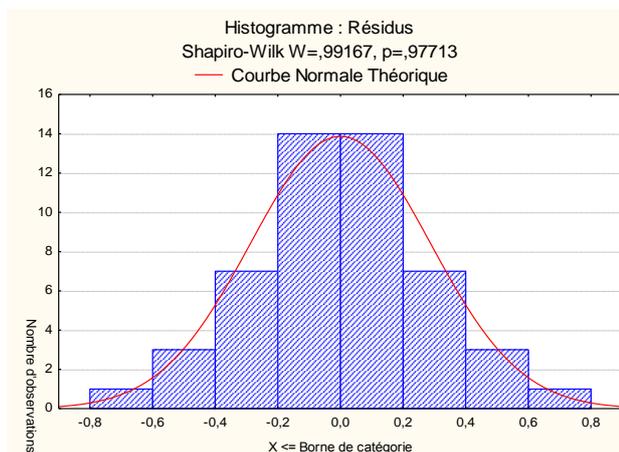


Figure 1. Normalité des résidus test de Shapiro -Wilk pour le traitement d'humectation lente

Figure 2. Nuage de points MWD_{HL} – PS.

Tableau II. Valeurs prévues & Résidus de la Régression Multiple pour le test d'humectation lente

| N° d'Obs. | Valeurs Prévues & Résidus (Data Base Données Brutes MWDHL) Var. dépendante : MWDHL | | | | | |
|-----------|---|---------------|-----------|-------------------|------------------|-------------------|
| | Valeur Observée | Valeur Prévue | Résidus | Standard Val.Prév | Standard Résidus | Err.Type Val.Prév |
| 28 | 2,297122 | 1,997698 | 0,299424 | 0,30270 | 1,00830 | 0,089918 |
| 29 | 2,217990 | 1,726025 | 0,491965 | -0,87511 | 1,65668 | 0,058621 |
| 30 | 1,465390 | 1,494092 | -0,028702 | -1,88064 | -0,09665 | 0,097850 |
| 31 | 1,800000 | 1,706359 | 0,093641 | -0,96037 | 0,31533 | 0,111291 |
| 32 | 1,590000 | 2,147971 | -0,557971 | 0,95420 | -1,87895 | 0,124717 |
| 33 | 1,610000 | 1,897937 | -0,287937 | -0,12980 | -0,96962 | 0,074742 |
| 34 | 2,220000 | 2,053463 | 0,166537 | 0,54447 | 0,56081 | 0,053689 |
| 35 | 1,802011 | 1,863069 | -0,061058 | -0,28097 | -0,20561 | 0,058551 |
| 36 | 2,382852 | 1,827298 | 0,555554 | -0,43605 | 1,87082 | 0,068402 |
| 37 | 2,290000 | 1,884169 | 0,405831 | -0,18949 | 1,36663 | 0,043534 |
| 38 | 2,274551 | 2,114929 | 0,159622 | 0,81095 | 0,53752 | 0,062698 |
| 39 | 2,424531 | 2,135509 | 0,289022 | 0,90017 | 0,97328 | 0,067426 |
| 40 | 2,020000 | 1,848169 | 0,171831 | -0,34557 | 0,57864 | 0,057830 |
| 41 | 1,526803 | 1,874360 | -0,347557 | -0,23202 | -1,17039 | 0,096433 |
| 42 | 2,430000 | 2,316692 | 0,113308 | 1,68567 | 0,38156 | 0,095548 |
| 43 | 2,086697 | 2,254248 | -0,167552 | 1,41495 | -0,56423 | 0,082491 |
| 44 | 2,142270 | 2,189337 | -0,047067 | 1,13354 | -0,15850 | 0,074510 |
| 45 | 2,000000 | 1,733397 | 0,266603 | -0,84315 | 0,89778 | 0,075987 |
| 46 | 2,037507 | 1,978291 | 0,059216 | 0,21857 | 0,19941 | 0,066050 |
| 47 | 1,795354 | 1,777414 | 0,017940 | -0,65232 | 0,06041 | 0,083827 |
| 48 | 2,121755 | 1,922075 | 0,199679 | -0,02515 | 0,67242 | 0,046102 |
| 49 | 1,350820 | 1,590621 | -0,239802 | -1,46214 | -0,80753 | 0,087345 |
| 50 | 1,920000 | 1,774829 | 0,145171 | -0,66353 | 0,48886 | 0,072467 |
| Minimum | 1,090000 | 1,493260 | -0,662053 | -1,88424 | -2,22945 | 0,043534 |
| Maximum | 2,675698 | 2,392919 | 0,635689 | 2,01615 | 2,14067 | 0,158994 |
| Moyenne | 1,927877 | 1,927877 | 0,000000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,081064 |
| Médiane | 2,010000 | 1,899612 | -0,003720 | -0,12254 | -0,01253 | 0,076467 |

Tableau III. La statistique de Durbin & Watson pour le test d'humectation lente

| D de Durbin-Watson (Data Base Données Brutes MWDHL) et autocorrélation des résidus | |
|--|------------|
| D Durbin Watson | Auto-Corr. |
| Estimat. | 0,062707 |

Tableau VI. Qualité d'ajustement du test d'humectation lente

| Statistique | Valeur |
|-------------------------------|-----------------|
| R Multiple | 0,625488 |
| R² Multiple | 0,391235 |
| R ² Ajusté | 0,351533 |
| F(3,46) | 9,854272 |

Annexe 7

Tableau I. Matrice de corrélations entre résidus & variables explicatives pour le test de désagrégation mécanique

| Variable | CaCO ₃ | PS | A | M liée | Résidus |
|-------------------|-------------------|-------|-------|--------|--------------|
| CaCO ₃ | 1,00 | -0,18 | -0,30 | 0,03 | 0,00 |
| PS | -0,18 | 1,00 | -0,16 | -0,47 | -0,00 |
| A | -0,30 | -0,16 | 1,00 | 0,43 | -0,00 |
| M liée | 0,03 | -0,47 | 0,43 | 1,00 | -0,00 |
| Résidus | 0,00 | -0,00 | -0,00 | -0,00 | 1,00 |

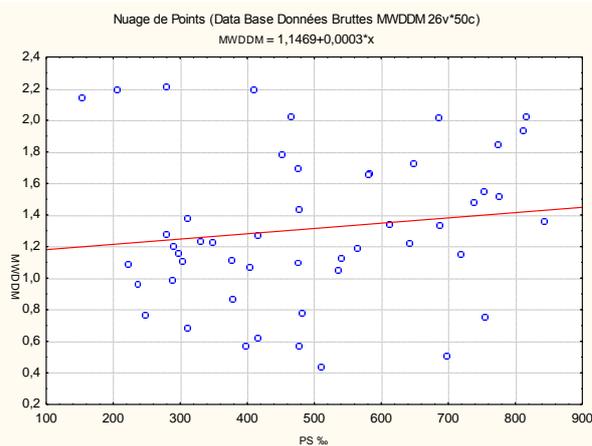
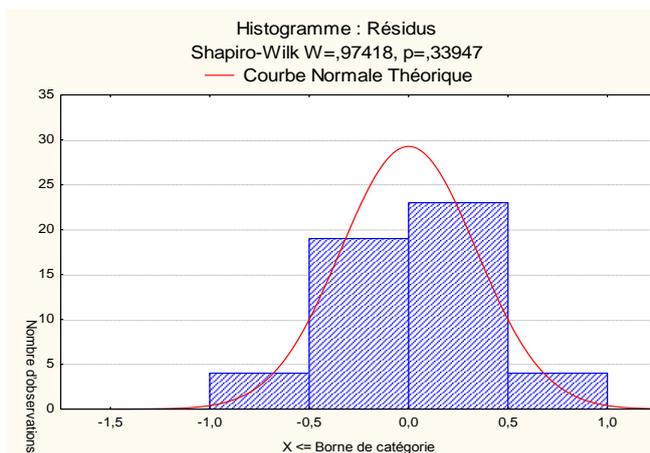


Figure 1. Normalité des résidus test de Shapiro-Wilk pour le traitement de dégradation mécanique

Figure 2. Nuage de points MWDDM – PS.

Tableau II. Valeurs prévues & Résidus de la Régression Multiple pour le test de désagrégation mécanique

| N° d'Obs. | Valeurs Prévues & Résidus (Data Base Données Brutes MWDDM) | | Standard Val.Prév | Standard Résidus | Err.Type Val.Prév | |
|-----------|--|----------------|-------------------|------------------|-------------------|----------|
| | Valeur Observée | Valeur Prévues | | | | Résidus |
| 32 | 1,091880 | 1,042572 | 0,049308 | -0,79284 | 0,13711 | 0,158912 |
| 33 | 1,070000 | 1,266932 | -0,196932 | -0,12983 | -0,54762 | 0,097423 |
| 34 | 0,780000 | 1,249277 | -0,469277 | -0,18201 | -1,30494 | 0,143799 |
| 35 | 1,779960 | 1,753232 | 0,026728 | 1,30723 | 0,07432 | 0,139717 |
| 36 | 2,023688 | 1,185335 | 0,838353 | -0,37096 | 2,33126 | 0,076221 |
| 37 | 1,694734 | 1,689080 | 0,005655 | 1,11766 | 0,01572 | 0,150760 |
| 38 | 2,018903 | 1,549915 | 0,468988 | 0,70641 | 1,30414 | 0,100210 |
| 39 | 1,147521 | 1,369868 | -0,222347 | 0,17435 | -0,61829 | 0,101851 |
| 40 | 1,651284 | 1,386761 | 0,264522 | 0,22427 | 0,73557 | 0,088029 |
| 41 | 0,510451 | 1,059670 | -0,549220 | -0,74231 | -1,52725 | 0,118809 |
| 42 | 1,356794 | 1,290637 | 0,066157 | -0,05978 | 0,18397 | 0,130270 |
| 43 | 1,521428 | 1,190863 | 0,330565 | -0,35463 | 0,91922 | 0,129326 |
| 44 | 1,552000 | 1,497035 | 0,054966 | 0,55014 | 0,15285 | 0,147893 |
| 45 | 1,185691 | 1,271023 | -0,085332 | -0,11775 | -0,23729 | 0,162207 |
| 46 | 1,328915 | 1,264010 | 0,064905 | -0,13847 | 0,18048 | 0,088607 |
| 47 | 1,335000 | 1,377071 | -0,042071 | 0,19564 | -0,11699 | 0,155842 |
| 48 | 1,130095 | 0,818653 | 0,311442 | -1,45455 | 0,86605 | 0,130471 |
| 49 | 0,570950 | 0,551559 | 0,019391 | -2,24384 | 0,05392 | 0,131603 |
| 50 | 1,438490 | 1,539211 | -0,100721 | 0,67478 | -0,28008 | 0,133912 |
| Minimum | 0,431050 | 0,551559 | -0,842334 | -2,24384 | -2,34233 | 0,076221 |
| Maximum | 2,211562 | 2,068199 | 0,889911 | 2,23799 | 2,47463 | 0,192795 |
| Moyenne | 1,310868 | 1,310868 | -0,000000 | -0,00000 | -0,00000 | 0,122039 |
| Médiane | 1,230990 | 1,320030 | 0,012523 | 0,02707 | 0,03482 | 0,123832 |

Tableau III. Qualité d'ajustement du test de désagrégation mécanique

| Statistique | Valeur |
|-------------------------------|-----------------|
| R Multiple | 0,704629 |
| R² Multiple | 0,496502 |
| R ² Ajusté | 0,439287 |

Tableau IV. La statistique de Durbin & Watson pour le test de désagrégation mécanique

| D de Durbin-Watson (Data Base Données Brutes MWDDM) et autocorrélation des résidus | |
|--|------------|
| D Durbin-Watson | Auto-Corr. |
| Estimat. | 1,998665 |
| | -0,024010 |

Annexe 8

Tableau I. Matrice de corrélations entre résidus & variables explicatives pour la moyenne synthétique

| Variable | Résidus | MO | PS | A | CaCO ₃ |
|-------------------|---------|-------|-------|-------|-------------------|
| Résidus | 1,00 | -0,00 | 0,00 | 0,00 | -0,00 |
| MO | -0,00 | 1,00 | -0,55 | 0,49 | -0,05 |
| PS | 0,00 | -0,55 | 1,00 | -0,22 | -0,13 |
| A | 0,00 | 0,49 | -0,22 | 1,00 | -0,31 |
| CaCO ₃ | -0,00 | -0,05 | -0,13 | -0,31 | 1,00 |

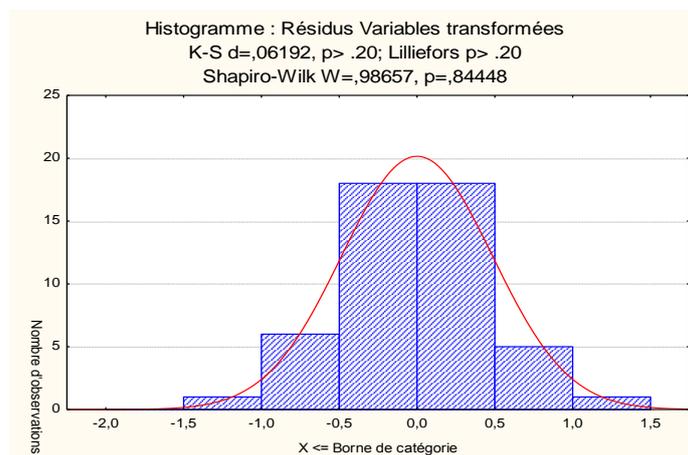
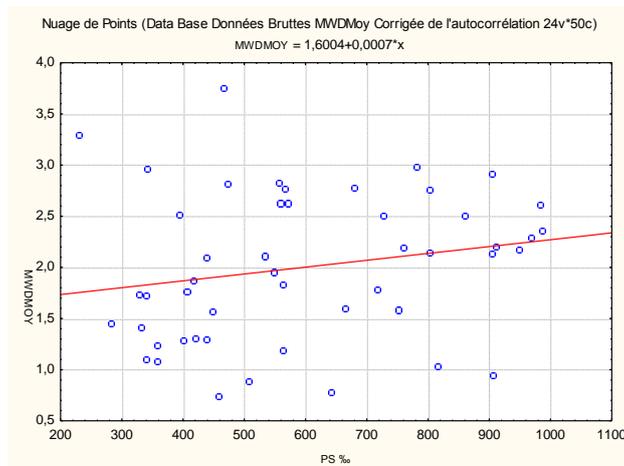
Figure 1. Normalité des résidus test de *Shapiro-Wilk* pour la moyenne synthétiqueFigure 2. Nuage de points MWD_{MOY} – PS

Tableau II. La statistique de Durbin & Watson pour la moyenne synthétique

| e Durbin-Watson (Data Base Do...) | | |
|---|-----------------|------------|
| D de Durbin-Watson (Data Base et autocorrélation des résidus) | | |
| | D Durbin Watson | Auto-Corr. |
| Estimat. | 2,409709 | -0,230692 |
| D de Durbin-Watson (Data Base Données Brutes M/V) | | |

Annexe 8

Tableau III. Valeurs prévues & résidus de la régression multiple pour la moyenne synthétique après réestimation du modèle grâce aux variables corrigées de l'autocorrélation

| valeurs Prévue & Résidus (Data Base Données Brutes MWD Moy Cor...) | | | | | | |
|--|-----------------|---------------|----------|--------------------|------------------|--------------------|
| Valeurs Prévue & Résidus (Data Base Données Brutes MWD Moy Cor...) | | | | | | |
| Var. dépendante : MWD MOY | | | | | | |
| N° d'Obs. | Valeur Observée | Valeur Prévue | Résidus | Standard Val. Prév | Standard Résidus | Err.Type Val. Prév |
| 29 | 1,405708 | 1,314485 | 0,09122 | -1,27470 | 0,17804 | 0,173443 |
| 30 | 1,723457 | 1,517860 | 0,20560 | -0,89631 | 0,40127 | 0,193790 |
| 31 | 1,442953 | 2,153246 | -0,71029 | 0,28587 | -1,38631 | 0,225106 |
| 32 | 1,567469 | 2,020700 | -0,45323 | 0,03926 | -0,88459 | 0,125835 |
| 33 | 1,834705 | 2,217458 | -0,38275 | 0,40534 | -0,74704 | 0,127559 |
| 34 | 1,950483 | 2,619232 | -0,66875 | 1,15287 | -1,30523 | 0,175873 |
| 35 | 2,828483 | 1,753933 | 1,07455 | -0,45708 | 2,09725 | 0,134089 |
| 36 | 2,624879 | 2,683973 | -0,05909 | 1,27332 | -0,11534 | 0,167362 |
| 37 | 2,976110 | 2,590197 | 0,38591 | 1,09885 | 0,75321 | 0,129567 |
| 38 | 2,503030 | 2,327667 | 0,17536 | 0,61039 | 0,34226 | 0,153228 |
| 39 | 2,497768 | 2,139615 | 0,35815 | 0,26051 | 0,69902 | 0,129096 |
| 40 | 1,026490 | 1,791333 | -0,76484 | -0,38749 | -1,49278 | 0,171917 |
| 41 | 2,360690 | 2,128641 | 0,23205 | 0,24009 | 0,45290 | 0,165112 |
| 42 | 2,168825 | 1,952077 | 0,21675 | -0,08842 | 0,42304 | 0,195540 |
| 43 | 2,197259 | 2,242173 | -0,04491 | 0,45132 | -0,08766 | 0,221684 |
| 44 | 1,777708 | 1,734800 | 0,04291 | -0,49268 | 0,08374 | 0,242842 |
| 45 | 2,142975 | 1,780901 | 0,36207 | -0,40690 | 0,70668 | 0,125710 |
| 46 | 1,580587 | 1,883410 | -0,30282 | -0,21618 | -0,59103 | 0,199757 |
| 47 | 1,587228 | 1,237474 | 0,34975 | -1,41799 | 0,68263 | 0,177383 |
| 48 | 0,887413 | 0,798702 | 0,08871 | -2,23435 | 0,17314 | 0,184894 |
| 49 | 2,626010 | 2,219759 | 0,40625 | 0,40962 | 0,79290 | 0,194511 |
| Minimum | 0,744355 | 0,798702 | -1,41798 | -2,23435 | -2,76753 | 0,116945 |
| Maximum | 3,752315 | 2,942373 | 1,07455 | 1,75409 | 2,09725 | 0,300168 |
| Moyenne | 1,999599 | 1,999599 | 0,00000 | -0,00000 | 0,00000 | 0,175234 |
| Médiane | 2,093186 | 2,101968 | -0,01907 | 0,19046 | -0,03722 | 0,171917 |

Tableau IV. La statistique de Durbin & Watson pour la moyenne synthétique après réestimation du modèle grâce aux variables corrigées de l'autocorrélation

| D de Durbin-Watson (Data Base Do...) | |
|--------------------------------------|------------|
| D de Durbin-Watson (Data Base Do...) | |
| et autocorrélation des résidus | |
| D Durbin Watson | Auto-Corr. |
| Estimat. | 1,969309 |
| | -0,011280 |

Tableau V. Qualité d'ajustement de la moyenne synthétique

| Classeur2* - Stats d... | |
|-------------------------------|----------------|
| Stats de E | |
| Statistique | Valeur |
| R Multiple | 0,74246 |
| R² Multiple | 0,55124 |
| R ² Ajusté | 0,49906 |
| F(5,43) | 10,56396 |
| p | 0,00000 |
| Err-Type Estimations | 0,51236 |