



HAL
open science

Détermination des particules susceptibles d'être mobilisées par le lessivage des sols

Gabriel Coelho

► **To cite this version:**

Gabriel Coelho. Détermination des particules susceptibles d'être mobilisées par le lessivage des sols. [Stage] Observatoire des Sciences de l'Univers en région Centre (OSUC). Université d'Orléans (UO), Orléans, FRA. 2010, 51 p. hal-02816658

HAL Id: hal-02816658

<https://hal.inrae.fr/hal-02816658>

Submitted on 6 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UNIVERSITE D'ORLEANS
Observatoire des Sciences de l'Univers en région Centre

Master Géochimie et Terre Durable
2° année
2009-2010

Rapport de stage recherche

Détermination des particules susceptibles d'être mobilisées par le lessivage des sols

par Gabriel COELHO

sous la direction de : **Mme A. SAMOUELIAN** et **Mme
S. CORNU**

Centre de Recherche INRA d'Orléans – Unité de Science du sol
2163, avenue de la pomme de pin
CS 40001 ARDON 45075 Orléans cedex 2

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier la direction de l'unité Science du Sol de l'INRA d'Orléans pour m'avoir accepté au sein du laboratoire. Ce stage m'a permis de vivre les conditions de travail d'un chercheur pendant près de cinq mois. Ce stage recherche, intégré dans ma formation universitaire, m'a permis de consolider et compléter mes connaissances et mes compétences sur les techniques et les méthodes utilisées en laboratoire. De plus, ce stage m'a permis de développer, à l'aide d'une équipe de travail, une démarche scientifique, ce qui a renforcé mon idée de poursuivre mon cursus universitaire avec une thèse. C'est pourquoi, je remercie tout d'abord Guy Richard et Frédéric Darboux pour leur accueil au sein de leur unité.

Je tiens particulièrement à remercier :

- Laurence Quenard qui m'a aidé et conseillé tout au long de ce stage.
- Olivier Josière et Adeline Besnault pour les différentes analyses réalisées mais aussi pour leur aide précieuse (manipulations en laboratoire, calculs...).
- Guillaume Giot pour m'avoir prêté ses habits de terrain sans quoi je n'aurais pas survécu aux averses.
- Bernard Renaux pour son expérience du terrain et pour son aide sur le granulomètre laser.
- Odile Duval et Franck Rogeon pour tous les articles scientifiques qu'ils ont pu trouver pour moi.
- Gerald Yart pour l'installation de logiciels nécessaires au bon déroulement de ce stage.
- Karine Robineaud pour sa réunion d'informations sur les bases de données de l'INRA.
- Marie-Pierre Poussineau et Magalie Marolleau pour leur accueil et leur disponibilité.
- Sung Won, Gu, Baptiste, Nelly, Marion, Maud, Arlène, Sébastien, Estelle, Elodie, Sara et Maxime pour m'avoir intégré au sein du groupe des « jeunes ». Merci pour leur accueil et leur humour, notamment dans les moments de pause. Merci pour tous leurs avis et conseils notamment dans le cadre de ma future thèse.
- Justine, Florent, Armand et Camille pour les différents échanges que l'on a pu avoir pendant leurs stages.

Enfin, je voudrais remercier mes encadrantes Anatja Samouelian et Sophie Cornu. Elles ont su me faire confiance dans le travail qu'elles m'ont confié. Grâce à elles, je me suis senti intégré dans une équipe de recherche en me faisant participer à de nombreuses réunions où je pouvais donner mon avis sur le sujet. Mais encore, grâce à elles, j'ai su me faire confiance dans mes choix et être autonome pendant toute la durée de ce stage. Elles étaient toujours présentes pour moi et leurs aides étaient précieuses. Leurs critiques, leurs conseils et leurs explications m'ont aidé à remplir les objectifs de mon stage et à approfondir mes connaissances dans le domaine de la pédologie. Je tiens aussi à remercier toutes les personnes de l'unité Science du Sol, j'ai trouvé l'ambiance du laboratoire particulièrement positive où je me suis senti à mon aise dès le début de ce stage.

SOMMAIRE

PRESENTATION DU LABORATOIRE : INRA Science du Sol - Orléans.....	4
INTRODUCTION.....	5
I. Les différents facteurs de dispersion des colloïdes dans les sols : nature et hiérarchie.....	7
A) Facteurs de dispersion physico-chimique	7
A) 1. Mécanismes de dispersion physico-chimique.....	7
A) 2. Paramètres mesurables pour mettre en évidence ces mécanismes de dispersion physico-chimiques.....	8
B) Facteurs de dispersion mécanique.....	9
D) Hiérarchisation des différents facteurs.....	10
II. Nature et abondance de la fraction mobilisable.....	11
A) Matériel et méthode	11
A) 1. Echantillonnage, préparation et caractérisation globale des échantillons.....	11
A) 2. Test de dispersion et fractionnement granulométrique	11
B) Résultats et discussion.....	13
B) 1. Analyses du L1 total et de sa fraction 0-2 µm.....	13
B) 2. Comparaison des analyses du L1 LE-WDC et des différentes fractions granulométriques du L1	13
III. Les traceurs du lessivage et leur sensibilité aux différentes méthodes d’analyse	18
A) Matériel et méthode	18
A) 1. Caractérisation de l’échantillon L2	18
A) 2. Tests de dopage : mélange de la fraction 0-2 µm du L1 avec le L2 total	18
B) Résultats et discussion.....	19
B)1. Comparaison des échantillons L1 et L2	19
B)2. Détection des particules mobilisées	22
CONCLUSION	27
BIBLIOGRAPHIE	28
LISTE DES FIGURES	30
LISTE DES ANNEXES	31

PRESENTATION DU LABORATOIRE : INRA Science du Sol - Orléans

Mon stage s'est déroulé à l'INRA d'Orléans dans l'unité de recherche Science du Sol. Les travaux de cette unité comportent deux axes de recherche prioritaires : 1) évolution et fonctionnement spatialisé des sols et 2) valorisation et protection des sols. Mon stage a fait parti du premier axe de recherche dans le thème du lessivage des argiles dans le cadre de la thèse de Laurence Quenard, encadrée par Anatja Samouelian et Sophie Cornu de l'INRA d'Aix en Provence (**Figure 1**). Nous avons donc interagi tous les quatre tout au long de ce stage. Afin de caractériser au mieux les échantillons issus de sols faiblement lessivés, certaines analyses (granulométrie, chimie totale et matière organique) ont été réalisées au laboratoire d'analyses de l'INRA d'Arras. Afin de déterminer les particules potentiellement mobilisables des échantillons, j'ai moi-même réalisé toutes les expérimentations de laboratoire (séparation granulométrique, caractérisation minéralogique au DRX, test de dispersion, test de dopage, granulomètre laser). Les analyses de CEC (capacité d'échange cationique) ont été réalisées par Adeline Besnault (assistante ingénieur). En plus de cela, je me suis senti parfaitement intégré au sein de l'unité car j'ai participé à toutes les réunions d'informations, les assemblées générales et les différents exposés scientifiques (intervenants extérieurs, stagiaires M1, doctorants, présentations congrès EGU). Enfin, environ toutes les deux semaines, un point était réalisé sur mon stage avec mes deux encadrantes. On m'a mis en confiance et j'ai su être autonome en proposant un protocole de test de dispersion afin de déterminer au mieux la fraction la plus mobilisable. Finalement, mon stage recherche s'est intégré dans une structuration scientifique dont l'objectif est de quantifier et de caractériser le lessivage des sols.

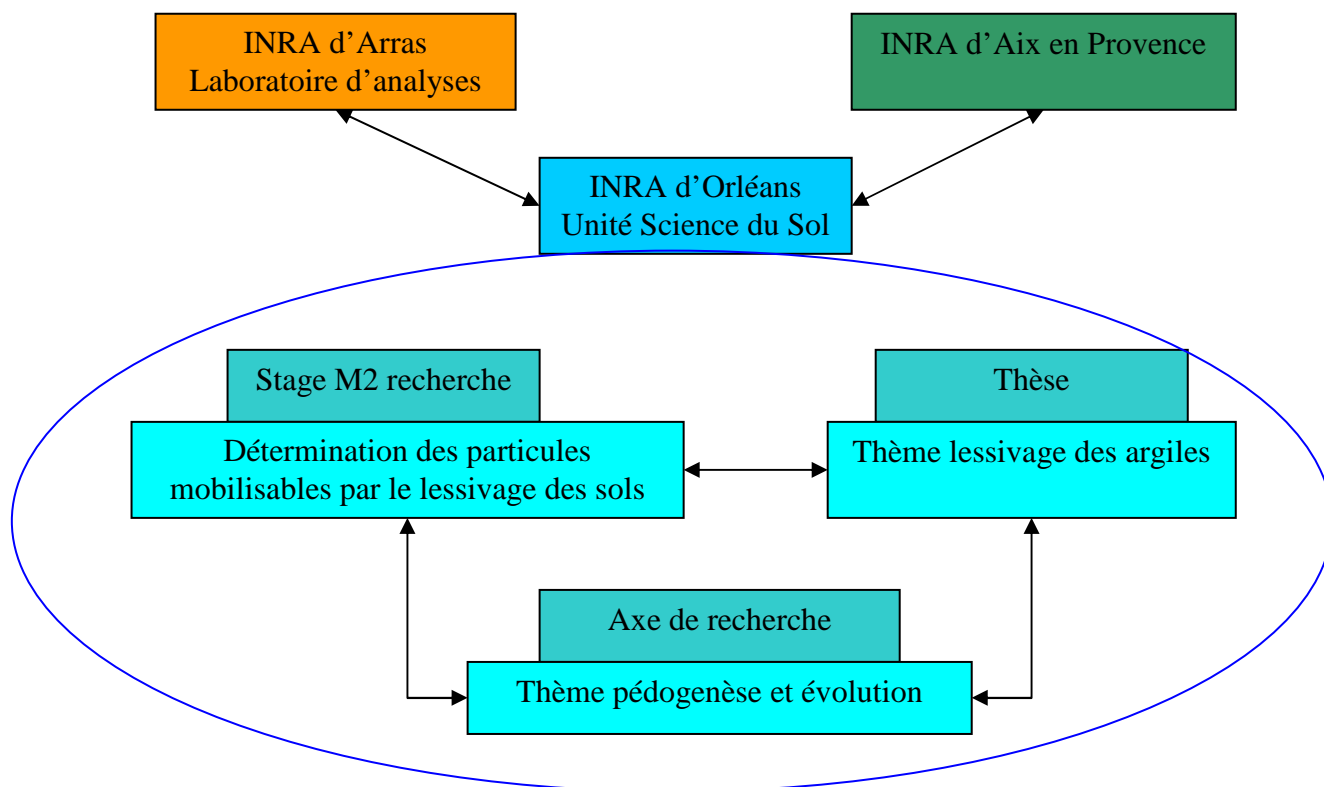


Figure 1 : Inter-relations dans le cadre de ce stage M2 recherche

INTRODUCTION

Le **lessivage**, ou argilluviation, est un transfert de particules fines des horizons A et E, dits éluviaux, vers les horizons sous-jacents B, dits illuviaux (**Figure 2**). Dans la littérature, il a été montré que les fractions inférieures à 2 μm (Kaplan et al., 1997 ; par exemple) ou à 10 μm pour certains auteurs (de Jonge et al., 2004), sont mobilisables dans les sols. Les **indicateurs** du transfert de particules sont les horizons argiliques ainsi que les revêtements argileux en profondeur, notamment dans les luvisols (Légende FAO) (Jamagne, 1973). Les horizons argiliques sont caractérisés par une accumulation d'argile illuviale (Lozet et Mathieu, 1997). On observe dans cet horizon des revêtements argileux, ou argilanes, sur les faces des pores et sur les unités structurales ou entre les grains de sables. Ces revêtements argileux attestent de redistributions particulières organo-argileuses depuis l'horizon superficiel vers l'horizon B. La conséquence directe du lessivage est l'obtention d'un sol à texture contrastée, c'est-à-dire, un sol présentant un ou des horizon(s) à texture « grossière » superposant un horizon à texture « fine ». La plupart des sols lessivés sont cultivés et très présents à la surface du globe et notamment en Europe.

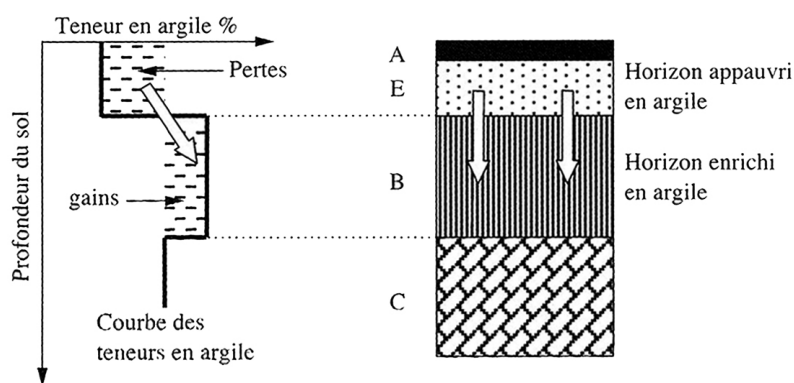


Figure 2 : Modèle classique du lessivage (Duchaufour, 1983 ; illustré par Legros, 2007)

Le lessivage des sols est un processus pédogénétique décrit dans de nombreux sols, mais contesté (Legros, 2007 notamment) car peu quantifié et modélisé. Il met en jeu les processus suivants : le détachement (ou mobilisation) de particules, leur transfert et leur dépôt (**Figure 3**), pour lesquels de nombreuses interrogations demeurent. La mobilisation des particules est conditionnée par d'autres processus tels que la floculation et la dispersion. Il existe différents facteurs contrôlant le lessivage des sols.

Le **facteur climatique** est un facteur important dans le lessivage et la formation de sols lessivés. En effet, un climat humide et des températures douces favorisent le transfert de particules fines en profondeur (Legros, 2007). C'est pourquoi les sols lessivés sont extrêmement bien représentés en Europe. L'exemple des planosols (Légende FAO) des Andes de Colombie en climat sec (Faivre et Chamarro, 1995) illustre très bien l'importance du facteur climatique. En effet, malgré le climat sec de la région, les sols observés ont subi un lessivage intense du fait des pluies orageuses violentes.

Faivre et Chamarro (1995) ont démontré aussi l'importance des **facteurs biotiques** dans le lessivage particulière dans les sols. En effet, dans des brunizems (groupe de la sous classe des sols isohumiques ; CPCS) étudiés dans les Andes de Colombie, l'activité biologique y étant très intense (vers de terre notamment), le contraste textural n'est pas évident du fait de l'homogénéisation. Par contre, dans des planosols situés plus en aval, l'activité biologique y étant restreinte du fait de la trop faible humidité, la texture est contrastée et le changement de texture est brutal. Les propriétés intrinsèques des sols, comme

la minéralogie et la nature de la garniture cationique, ne permettent pas d'expliquer à elles seules les différences morphologiques observées entre ces deux profils, notamment l'importance plus ou moins accentuée du lessivage. En fait, en absence d'activités biologiques, les facteurs favorables au lessivage s'expriment complètement dans le cas des planosols étudiés. Par contre, il existe des cas où l'activité biologique produit des effets équivalents au lessivage. En effet, un contraste textural évident a été observé dans des ultisols (Soil Taxonomy) de Caroline du Nord où les activités biologiques sont diversifiées (Phillips, 2007). Les activités animales, les racines présentes tout le long des profils pédologiques observés, ainsi que les bioturbations permettent de recycler le matériel profond à la surface. En fait, une combinaison du transfert des particules fines de la surface aux horizons profonds, et de bioturbations recyclant le matériel à la surface peut expliquer la texture contrastée verticale de ces ultisols.

Selon Jamagne (1973), le **facteur « temps »** est incontestablement le facteur le plus important. Plus le matériau est ancien, plus l'évolution d'un sol lessivé est poussée. Cependant, d'autres facteurs comme la **nature du matériau** et **l'action de l'homme** modulent le processus du lessivage en l'accéléralant ou le ralentissant (Duchaufour, 1983). En effet, en présence de calcaire actif, le lessivage est à peu près nul et les particules fines sont immobilisées au sein d'agrégats très stables. Par contre, si la décarbonatation intervient rapidement, une certaine quantité de particules se trouve libérée et entraînée mécaniquement dans les pores laissés par le départ des carbonates. Si le matériau est caractérisé par une texture superficielle plus grossière (limon sableux), l'acidification est plus rapide et le lessivage s'accroît. De plus, le processus du lessivage est étroitement lié au type d'humus. Ce dernier dépend directement de la végétation qui peut être modifiée par l'homme.

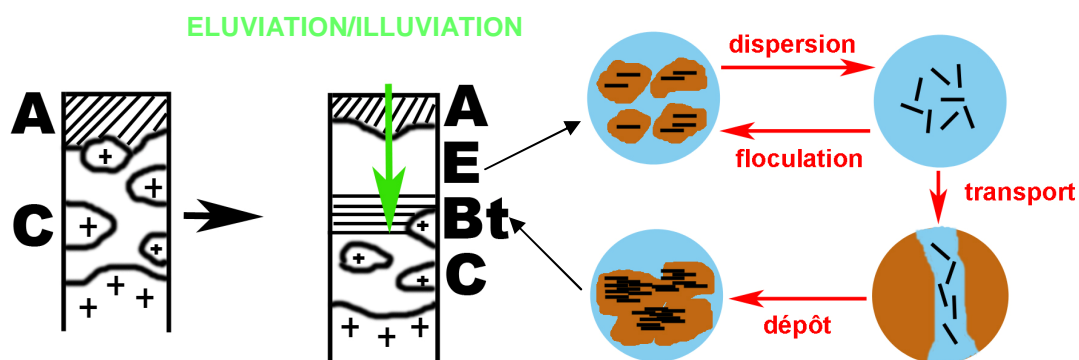


Figure 3 : Illustration conceptuelle des principaux processus à considérer lors de la mobilisation in situ des particules fines (de Jonge et al., 2004 ; modifié)

Le principal objectif de cette étude est de déterminer la fraction mobilisable par le lessivage dans les sols. Tout d'abord, nous nous intéresserons aux différents facteurs de dispersion mentionnés dans la littérature afin d'approfondir nos connaissances sur la mobilisation des particules. Puis, nous identifierons précisément les particules susceptibles d'être mobilisées par le lessivage. Finalement, nous étudierons la possibilité d'utiliser les différentes propriétés des fractions mobilisables comme traceurs du lessivage lors d'expérimentations au laboratoire et la sensibilité de telles approches.

I. Les différents facteurs de dispersion des colloïdes dans les sols : nature et hiérarchie

Dans la littérature, de nombreuses études ont été réalisées sur le transfert des colloïdes dans les sols, études le plus souvent associées à des problématiques environnementales. D'après Hiemenz et Rajagopalan (1997), un **colloïde** est une particule ayant une dimension linéaire entre 10^{-9} m (1 nm) et 10^{-6} m (1 μ m). Mais la définition d'un colloïde en Science de la Terre a souvent une acceptation plus large. Ils sont définis comme des particules larges de 1 à 10 nm et ont un diamètre compris entre 2 et 10 μ m selon les auteurs (Stumm, 1992 et Buffle et Leppard, 1995 ; cités par de Jonge et al., 2004). Ils sont constitués notamment de phyllosilicates, de sesquioxydes (oxy-hydroxydes de Fe et Al), de macromolécules organiques. Cette dernière acceptation du terme colloïdes correspond aux particules impliquées dans le processus de lessivage.

Il existe deux types de facteurs à l'origine de la dispersion ou de la floculation des particules mobiles du sol. Tout d'abord, il y a les **facteurs de dispersion physico-chimique**. Ces derniers jouent directement sur la charge de surface des colloïdes (**cations échangeables, matière organique, type d'argiles, oxydes de Fe et Al**). Ensuite, il y a les **facteurs de dispersion mécanique** qui jouent sur la liaison ou la séparation des colloïdes.

Dans cette partie, nous nous intéresserons aux facteurs gouvernant la dispersion et la libération des colloïdes dans les sols en les séparant selon les deux types précédemment décrits.

A) Facteurs de dispersion physico-chimique

A) 1. Mécanismes de dispersion physico-chimique

Plus le colloïde est chargé négativement, plus la répulsion électrostatique est importante et meilleure est la dispersion (Kretzschmar et al., 1993). En fait, une charge de surface élevée réduit les interactions électrostatiques entre les colloïdes et entre la matrice du sol et les colloïdes, ce qui stabilise les colloïdes en suspension (Kaplan et al., 1997). De plus, la désagrégation et la libération de colloïdes augmentent à mesure que la concentration en sodium et la concentration électrolytique augmentent (Saidi et al., 2004).

Tout d'abord, les processus de dispersion et de floculation des colloïdes dépendent directement des **cations échangeables** à leur surface. Dans la littérature, le sodium est connu pour son effet dispersif (Robert et Tessier, 1974). En effet, si le complexe d'échange est saturé majoritairement en sodium, les colloïdes ont tendance à se disperser. Par contre, il existe aussi des cations « floculants » comme le calcium et l'aluminium (Duchaufour, 1983). C'est pourquoi, ces cations peuvent jouer le rôle de frein à l'égard du lessivage des sols. Ces processus de dispersion ou de floculation sont observés pour différentes gammes de pH selon le ou les cations majoritaires.

La présence de ciments organiques dans le sol améliore sa résistance mécanique ainsi que sa stabilité structurale (Le Bissonnais, 1988 ; par exemple). Par contre, la **matière organique dissoute** (MOD) a un tout autre rôle. En effet, d'après de nombreuses études sur les colloïdes, la MOD du sol favorise la dispersion des colloïdes (Kjaergaard et al., 2004 ; par

exemple). Il a été démontré que les colloïdes associés à la MOD ont une meilleure stabilité en suspension, c'est-à-dire une capacité à résister à l'agrégation (Seta et Karathanasis, 1997). Il a été démontré aussi que les charges de surface négatives sont favorisées lorsque les colloïdes sont associés à la MOD. Cela est dû au fait que la MOD est constituée de substances colloïdales électronégatives (Lozet et Mathieu, 1997). Ainsi, les revêtements organiques améliorent la stabilité des colloïdes en suspension en neutralisant certains sites positifs, ce qui minimise l'agrégation entre les colloïdes (Kaplan et al., 1997).

Finalement, le dernier facteur de dispersion physico-chimique des colloïdes correspond à leur propre nature. Seta et Karathanasis (1996) ont observé que lorsqu'un sol est riche en **oxydes de fer et d'aluminium**, les colloïdes ont tendance à flocculer et non à se disperser. En fait, ces oxydes neutralisent la charge de surface des colloïdes. Les études expérimentales de Goldberg et al. (1990) confirment l'effet négatif de ces oxydes sur la dispersion des colloïdes. Les oxydes de fer et d'aluminium ont donc un rôle de ciment. De plus, Seta et Karathanasis (1996 et 1997) ont démontré l'importance de la **nature minéralogique des argiles** pour la dispersion. En effet, trois paramètres intrinsèques interviennent dans la mobilité des minéraux argileux. Il s'agit de leur taille, de l'importance des charges négatives et de leur aptitude à fixer des molécules organiques (Duchaufour, 1983). D'après les études de Seta et Karathanasis (1996 et 1997), les sols riches en smectites se dispersent mieux, tandis que la dispersion est moins intense pour les sols riches en kaolinite. Ainsi, une majorité d'argiles de type 2:1 (comme la smectite) favoriserait une charge de surface élevée contrairement aux argiles de type 1:1 (comme la kaolinite).

A) 2. Paramètres mesurables pour mettre en évidence ces mécanismes de dispersion physico-chimiques

Le **pH du sol** est un des paramètres les plus faciles à mesurer. D'après de nombreux auteurs, plus le pH est élevé, plus la dispersion des colloïdes est importante (Seta et Karathanasis, 1997 par exemple). En effet, il a été démontré qu'une augmentation du pH permet de charger plus négativement les colloïdes en suspension. La répulsion électrostatique se retrouve alors accrue. Kaplan et al. (1997) ont montré que la dispersion est favorisée à partir d'un pH de 6.2. Par ailleurs, d'après de nombreuses études sur le lessivage, l'éluviation a généralement lieu pour des pH compris entre 5.5 et 6.5, au delà de ces valeurs des liaisons de particules avec l'aluminium (pH<5.5) ou bien avec le calcium (pH>6.5) limitent la dispersion des particules fines.

La **force ionique**, plus difficile à mesurer, est un des principaux facteurs influençant l'activité des ions en solution aqueuse. De nombreux auteurs (Levy et al., 1993 ; Miller et al., 1990 ; Kaplan et al., 1997 ; Saidi et al., 2004) ont démontré que plus la force ionique est faible, plus la dispersion des colloïdes est favorisée.

Des paramètres caractérisant la surface des colloïdes peuvent être mesurés comme la **capacité d'échange cationique** (CEC) (Miller et al., 1990) et la **mobilité électrophorétique** (Kaplan et al., 1997). La CEC correspond à la quantité totale de cations qu'un sol peut adsorber et échanger dans des conditions de pH bien définies (Lozet et Mathieu, 1997). Elle correspond donc au nombre de sites négatifs dans la matrice du sol. La mobilité électrophorétique est proportionnelle à la charge ionique de l'échantillon. Ainsi, plus la CEC et la mobilité électrophorétique sont importantes, plus la surface des colloïdes est chargée négativement et plus la répulsion électrostatique est importante.

La saturation du complexe d'échange joue aussi sur la dispersion des colloïdes. Lorsque celle-ci est saturée en sodium, d'autres paramètres caractérisant la surface des colloïdes peuvent être mesurés comme le **SAR** (Sodium Adsorption Ratio) et l'**ESP**

(Exchangeable Sodium Percentage). Plusieurs études ont montré que la dispersion des colloïdes est favorisée à partir d'un SAR de 1,5 (Kaplan et al., 1997) ou de 2 (Saidi et al., 2004) et à partir d'un ESP de 5% (Saidi et al., 2004). Enfin de la même manière, le taux de saturation en calcium du complexe d'échange est aussi un indicateur de la stabilité du sol à la dispersion.

B) Facteurs de dispersion mécanique

Action des pluies :

La **pluie**, par l'action des gouttes de pluies, est le premier phénomène à l'origine de la désagrégation et de la libération de colloïdes à la surface des sols (Le Bissonnais, 1988). Les gouttes de pluie arrivant à la surface du sol entraînent une rupture mécanique désagréant les agrégats en surface. L'infiltration de l'eau dans les agrégats peut être à l'origine d'un éclatement de ces derniers du fait de la pression exercée par l'air emprisonné lors de l'humectation (Le Bissonnais, 1988 et 1996). Enfin, un gonflement différentiel peut entraîner une fissuration des agrégats. Enfin, il a été démontré que le **potentiel matriciel initial du sol** constitue également un facteur important dans la dispersion des colloïdes (Kjaergaard et al., 2004). Ainsi, plus le potentiel matriciel initial du sol est loin de la saturation plus les colloïdes auront tendance à se lier entre eux et à flocculer.

Importance de la structure du sol :

La macroporosité favorise le transport des colloïdes car elle est associée à des chemins d'écoulement rapide au sein de la matrice (Seta et Karathanasis, 1997). Ces macropores résultent de l'activité biologique et/ou du climat. Ainsi, la **structure du sol** est un facteur important qui contrôle directement la mobilisation des colloïdes (Poulsen et al., 2006). Si l'on modifie la structure d'un sol par des actions de travail du sol, la macroporosité peut en être modifiée, modifiant par la même le transport des colloïdes. Watts et al. (1996) expliquent une meilleure dispersion des colloïdes par l'effet du labour qui détruit les agrégats et libère des micro-agrégats et des colloïdes. Il a été démontré que plus le labour est intense, plus la libération de colloïdes est importante. L'intensité du labour dépend directement de l'outil agricole utilisé. De la même manière, le drainage peut influencer la mobilisation des colloïdes et intensifie le processus d'éluviation (Montagne et al., 2009). Il a été démontré que le drainage, en modifiant la structure du sol à l'aplomb du drain, augmente l'infiltration et réduit le ruissellement. Ces modifications sont à l'origine de transferts d'eau plus rapides dans les sols drainés, pouvant alors entraîner mécaniquement des colloïdes en profondeur.

Quantité de matière mobilisable :

D'après les études expérimentales de Seta et Karathanasis (1997) la **quantité de matière mobilisable** joue dans les processus de dispersion et de floculation. En effet, ils ont remarqué qu'à partir d'une certaine concentration en colloïdes en suspension, la floculation est favorisée. En fait, plus la concentration en colloïdes en suspension est importante, plus la fréquence de collision entre eux est importante.

D) Hiérarchisation des différents facteurs

Les facteurs de dispersion des colloïdes décrits précédemment sont liés à deux types de paramètres : certains sont liés à la nature du sol et d'autres liés à l'eau.

Les paramètres naturels liés à la phase solide du sol sont assez stables dans le temps. Des paramètres comme la structure et la composition du sol sont les paramètres les plus importants dans la dispersion des colloïdes. En effet, un sol, qui ne regroupe pas les facteurs favorables à la dispersion liés à sa phase solide, ne pourrait être que faiblement lessivé. Par ailleurs, la texture du sol peut être un paramètre intrinsèque à considérer lors du lessivage du sol mais son effet sur la dispersion des colloïdes est encore mal connu. En effet, dans la littérature liée aux colloïdes, de nombreux auteurs (Seta et Karathanasis, 1996 ; par exemple) ont démontré une relation positive entre le pourcentage de fraction inférieure à 2 μm et la quantité de particules mobilisables lors de tests de dispersion à haute énergie. Par contre, Kjaergaard et al. (2004) ont démontré une relation négative entre le pourcentage de fraction inférieure à 2 μm et la quantité de particules mobilisables lors de tests de dispersion à faible énergie.

Les paramètres liés à l'eau sont des paramètres plus transitoires. L'eau, qu'elle soit rare ou abondante, aura toujours les mêmes effets sur le sol : désagrégation et libération de colloïdes. L'intensité de ces effets est néanmoins fortement dépendante de la chimie de l'eau. Bien évidemment, s'il ne pleut pas le sol ne peut être lessivé puisque l'eau est le vecteur qui permet le transfert des particules mobilisables.

Enfin, selon l'échelle de temps considérée, l'importance de tous ces paramètres n'est pas la même. En effet, sur des temps très courts, un lessivage intense peut avoir lieu lors de pluies orageuses violentes. C'est le cas des planosols étudiés par Faivre et Chamarro (1995) dans les Andes de Colombie. En fait, un gradient d'humidité est observé dans cette région et les planosols sont les résultats d'une illuviation intense qui est à l'origine de la formation d'un horizon Bt argilique imperméable. De même pour les paramètres liés à la phase solide du sol, si toutes les conditions favorables à la dispersion des colloïdes sont réunies, le sol évoluera rapidement (quelques centaines d'années au lieu de quelques milliers d'années ; Duchaufour, 1983). Dans ces conditions, la réserve de calcium échangeable est plus rapidement éliminée : Ca^{2+} est alors remplacé par Al^{3+} . De plus, l'action de l'homme peut accélérer le processus du lessivage notamment via les pratiques culturales comme le labour et le drainage, pratiques pouvant être à l'origine d'une augmentation de la macroporosité du sol.

II. Nature et abondance de la fraction mobilisable

Le premier objectif de notre étude est de quantifier et de caractériser la fraction mobilisable d'un horizon E d'un luvisol peu développé, appelé L1 dans la suite de ce manuscrit. Il existe des tests de dispersion dans la littérature censés représenter la dispersion naturelle des colloïdes dans les sols (Kjaergaard et al., 2004 ; par exemple). Un protocole, issue de ces travaux a été mis au point afin d'estimer la mobilisation des particules tant quantitativement que qualitativement. Les résultats ainsi obtenus sont comparés aux analyses de différentes fractions granulométriques du même sol pour identifier au mieux la fraction mobilisable.

A) Matériel et méthode

A) 1. Echantillonnage, préparation et caractérisation globale des échantillons

Un horizon E d'un luvisol a été prélevé. Il a été choisi avec des caractéristiques de pH et de minéralogie favorables au lessivage d'après l'analyse précédente. Ce premier échantillon appelé L1, a été prélevé à Saint-Ouen-de-la-Cour, dans l'Orne (X = 470948 et Y = 2379798 ; coordonnées en Lambert 2 étendu). Il a été prélevé à la tarière entre 35 et 45 cm de profondeur, séché à l'étuve à 35°C, décompacté et tamisé à 2 mm.

Des mesures de pH du sol ont été réalisées sur l'échantillon total, ainsi que de CEC et des cations échangeables. La granulométrie et la chimie totale de l'échantillon ont été déterminées à l'INRA d'Arras.

A) 2. Test de dispersion et fractionnement granulométrique

De nombreux protocoles existent dans la littérature pour estimer la stabilité structurale des sols et la dispersibilité des fractions fines sous l'effet de la pluie. Nous avons adapté le protocole à basse énergie développé par Kjaergaard et al. (2004) (« Low Energy-Water Dispersible Colloids », abrégé LE-WDC dans la suite de ce rapport) pour estimer la fraction dispersible de l'échantillon L1. Cette dispersion est effectuée sur sol sec. Un échantillon de sol est mis en contact avec de l'eau distillée avec un rapport sol/eau de 1/8 et agité manuellement pendant une minute (10 retournements manuels). Les fractions mobiles dans les sols étant inférieures à 10 µm, deux fractions granulométriques ont ensuite été prélevées : la fraction inférieure à 10 µm, pour une caractérisation minéralogique, et celle inférieure à 2 µm pour avoir une analyse plus détaillée de la distribution granulométrique (prélèvements réalisés sur deux dispersions indépendantes de deux sous-échantillons) (**Figure 4**). La fraction 0-10 µm a été caractérisée par diffraction des rayons X (DRX) (D8 de Bruker) sur lames normales, glycolées et chauffées (avec un pas de temps de 0,02 degrés par pas, un temps de comptage de 5 s par pas et pour une plage angulaire allant de 3 à 50 degrés pour les lames normales et de 3 à 17 degrés pour les autres) sans étape de saturation, la dispersion à NaPO₃ ayant saturée les argiles en Na. Le granulomètre laser (Malvern S banc long) a été utilisé pour analyser la distribution des particules au sein de ces fractions (deux répétitions pour chacun des échantillons).

Afin de déterminer si la dispersion réalisée dans le test de dispersion fractionnait préférentiellement certaines classes granulométrique de l'échantillon, un fractionnement granulométrique (en dispersant directement avec du NaPO_3) de la fraction inférieure à $10\ \mu\text{m}$, à $5\ \mu\text{m}$ et à $2\ \mu\text{m}$ a été réalisé par décantations (en suivant la loi de Stokes) et les fractions inférieures à $0,05\ \mu\text{m}$, $0,1\ \mu\text{m}$, $0,2\ \mu\text{m}$, $1\ \mu\text{m}$ ont été obtenues par centrifugation. Les fractions granulométriques ainsi obtenues ont été caractérisées comme décrit précédemment (*Figure 5*). De plus, la capacité d'échange cationique (CEC) à la cobaltihexamine a été mesurée pour chacune des fractions granulométriques.

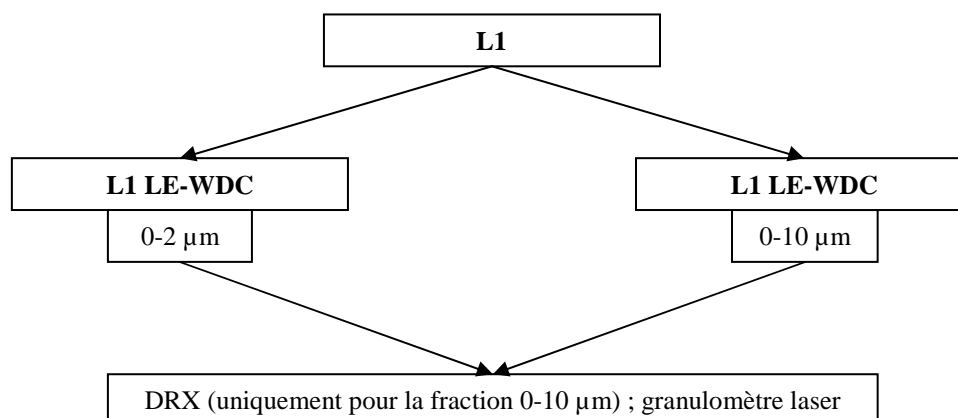


Figure 4 : Les différentes analyses réalisées sur les échantillons dispersés à l'eau distillée (rapport sol/eau = 1/8)

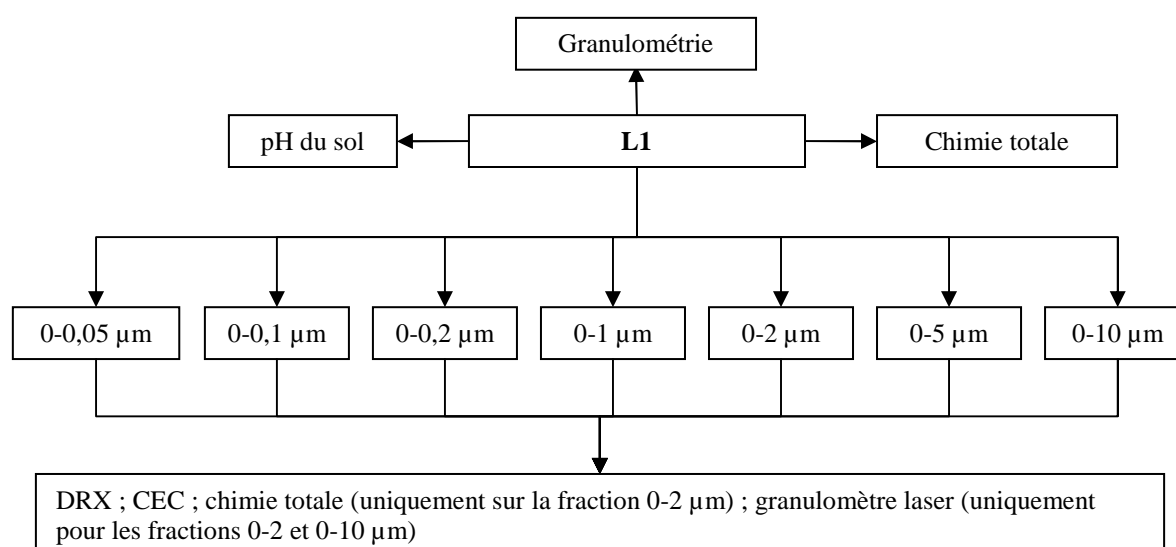


Figure 5 : Les différentes analyses réalisées sur l'échantillon L1

B) Résultats et discussion

B) 1. Analyses du L1 total et de sa fraction 0-2 μm

Le **pH du sol** est de 6.19 (*Annexe 1*), l'échantillon L1 est donc favorable à la dispersion des colloïdes d'après Kaplan et al. (1997). La **texture** du sol est plutôt limoneux-argileuse, avec notamment presque 60 % de limons, 30 % d'argiles et 10 % de sables. Les analyses des **cations échangeables** montrent que la surface du complexe d'échange est principalement saturée en calcium (80.9 % de saturation en Ca^{2+}). Cela est donc défavorable à la dispersion des colloïdes. On remarque que la fraction 0-2 μm est enrichie en matière organique (11.2 g/kg) par rapport à l'échantillon total (6.12 g/kg). On pourrait alors penser que cette matière organique entre dans la constitution de complexes argilo-humiques.

B) 2. Comparaison des analyses du L1 LE-WDC et des différentes fractions granulométriques du L1

Minéralogie :

D'après les diffractogrammes superposés des trois traitements de la fraction 0-10 μm L1 LE-WDC (*Figure 6*), cette fraction contient de la **chlorite** (les pics à 14 et 7 Å persistent après le chauffage à 520°C), de la **smectite** (disparition du pic à 14 Å et apparition d'un pic à 17 Å sur la lame glycolée) ou de l'**interstratifié illite-smectite**, de l'**illite** (pic à 10 Å sur les lames normale et glycolée) et de la **kaolinite** (pic à 7.1 Å sur les lames normale et glycolée). On peut remarquer aussi notamment la présence de quartz (pic à 3.3 Å sur la lame normale) et de feldspaths (pics vers 3.2 Å sur la lame normale).

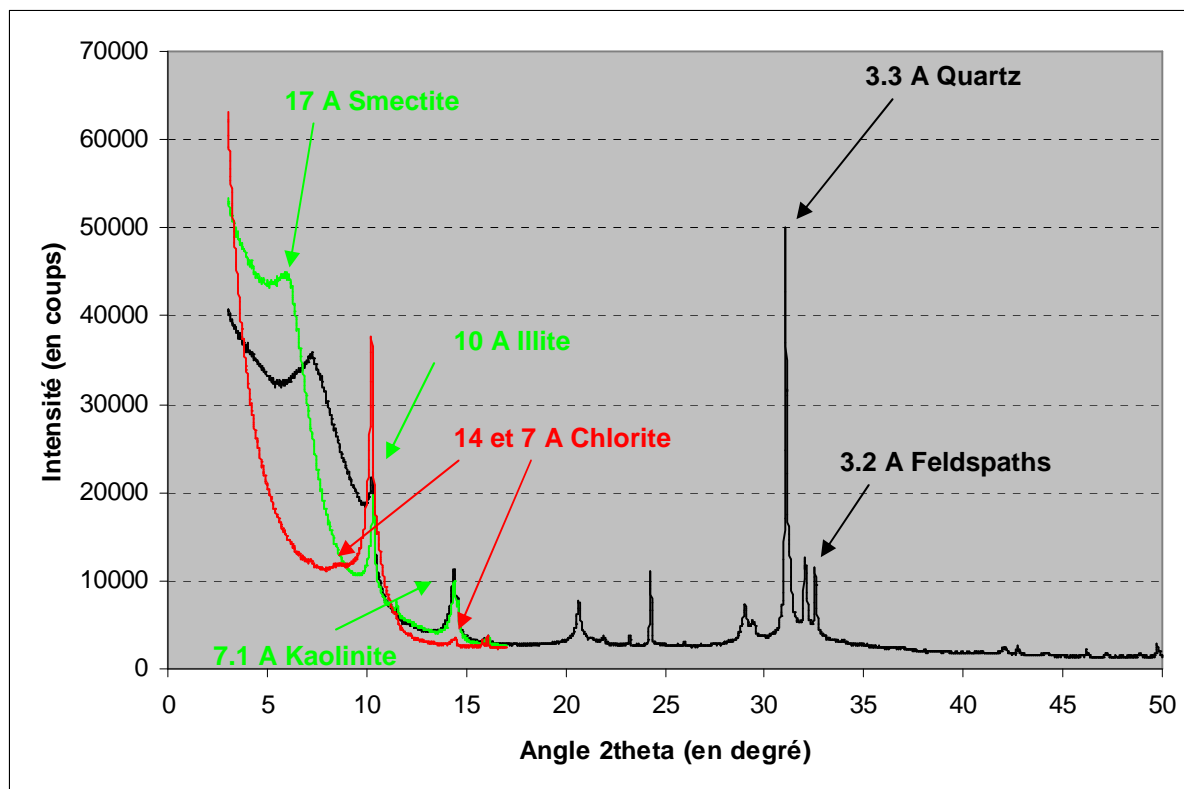


Figure 6 : Diffractogrammes superposés de l'échantillon L1 LE-WDC 0-10 µm pour les trois traitements (lames normale, glycolée et chauffée)

Les minéraux argileux et la CEC ont été déterminés pour chaque fraction granulométrique du L1. D'après les diffractogrammes de la fraction 0-10 µm totalement dispersée (*Annexe 2*), on retrouve le même cortège minéralogique que l'échantillon L1 LE-WDC. Des rapports de hauteurs des pics (001) ont été calculés afin de réaliser une semi-quantification de la chlorite, du quartz, de la kaolinite, de l'illite et de la smectite (*Figure 7*). Chaque hauteur de pic a été normée à la plus grande hauteur du même pic pour identifier l'évolution de chaque minéral avec la granulométrie. Plus la fraction granulométrique est grossière, plus il y a de quartz, de chlorite et d'illite et moins il y a de smectite. Par contre, la kaolinite est la plus abondante dans la fraction 0-2 µm. De plus, on remarque que plus la fraction granulométrique est fine, plus la CEC est importante (*Figure 8*). En effet, la CEC est en relation avec la surface spécifique et les charges de surface (Lozet et Mathieu, 1997). C'est pourquoi les plus petits minéraux argileux comme la smectite ont une CEC plus importante. Dans les trois fractions les plus grossières, qui sont riches en kaolinite, illite, chlorite et quartz, les CEC mesurées sont quasi identiques (51 cmol+/kg pour la fraction 0-2 µm, 49.1 cmol+/kg pour la fraction 0-5 µm et 53.9 cmol+/kg pour la fraction 0-10 µm).

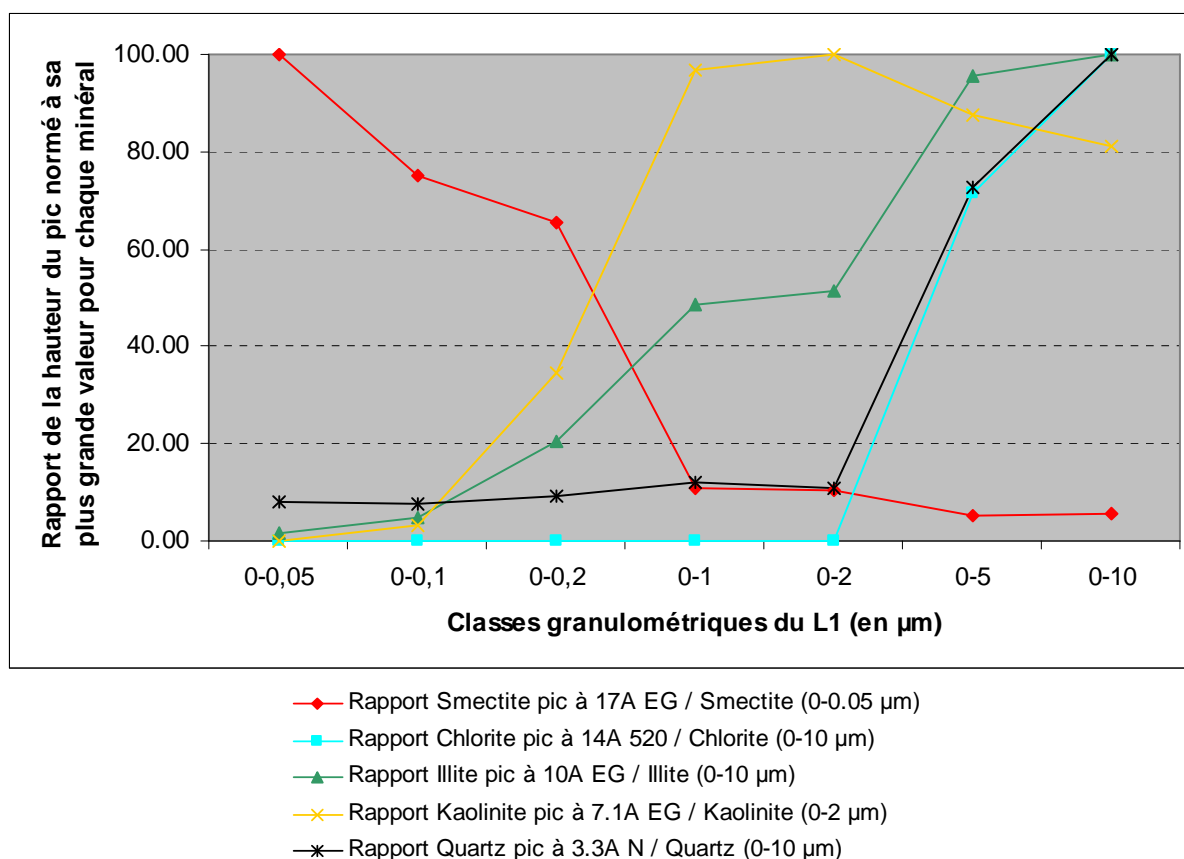


Figure 7 : Evolution des rapports des pics (001) de l'échantillon L1 avec la granulométrie

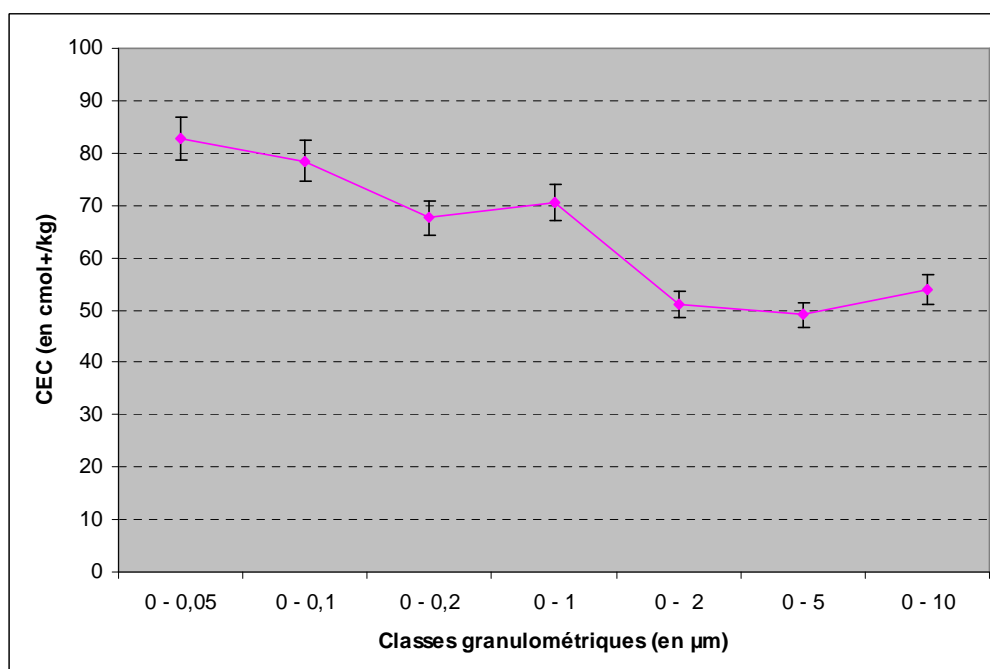


Figure 8 : Evolution de la CEC de l'échantillon L1 avec la granulométrie

Si l'on compare les diffractogrammes des lames normales des fractions L1 LE-WDC 0-10, et du L1 0-10 et 0-2 μm après dispersion totale (Figure 9), la fraction L1 LE-WDC 0-10

μm est enrichie en smectites, habituellement abondantes dans les fractions les plus fines. La fraction 0-10 du L1 LE-WDC a été dispersée à l'eau et agitée faiblement à la main. La fraction ainsi obtenue est constituée d'agrégats ou de micro-agrégats et/ou de colloïdes faiblement dispersés contrairement aux fractions granulométriques obtenues après dispersion totale. Ainsi, ces expériences montrent que le lessivage favorise préférentiellement le départ de micro-agrégats riches en particules fines comme la smectite et en minéraux plus grossiers comme le quartz, les feldspaths et la chlorite.

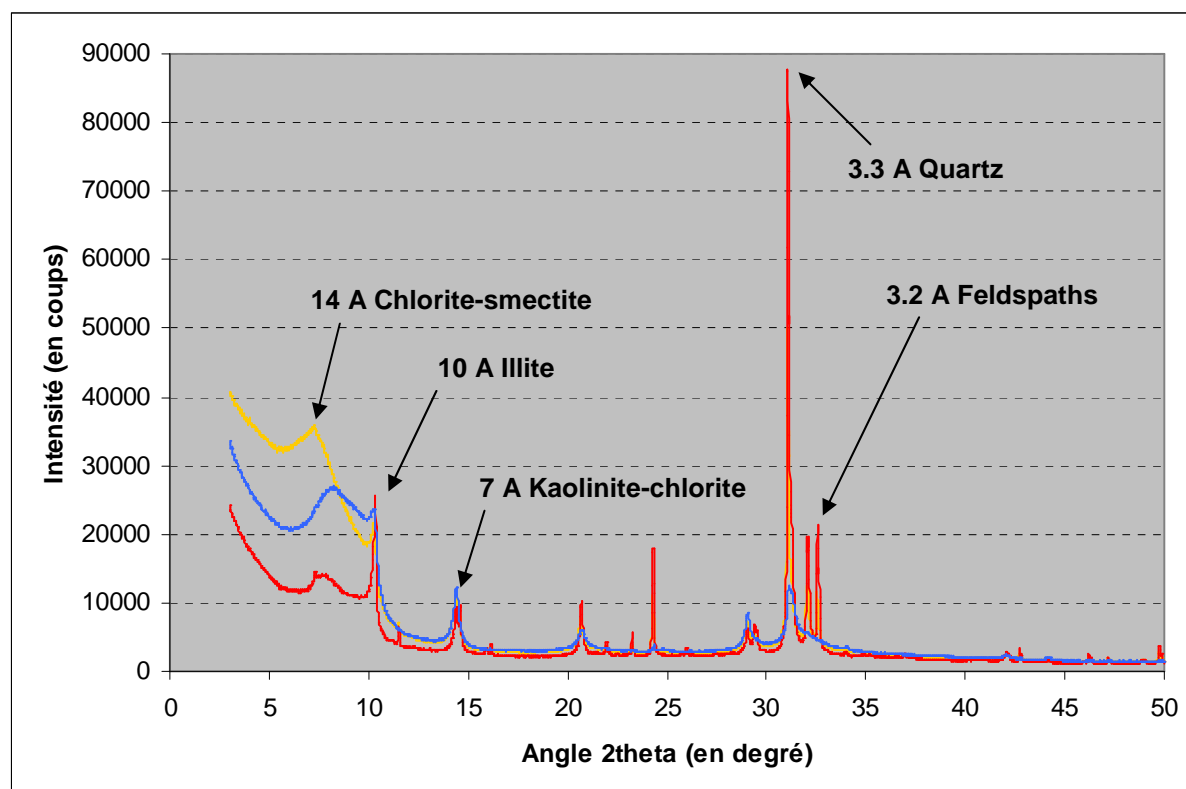


Figure 9 : Comparaison des diffractogrammes des lames normales des échantillons L1 LE-WDC 0-10 μm et du L1 des fractions 0-2 et 0-10 μm totalement dispersées

Distribution granulométrique des fractions 0-2 et 0-10 μm :

La distribution granulométrique a été analysée sur les échantillons L1 et L1 LE-WDC du 0-10 et du 0-2 μm (**Figure 10**). On constate que la fraction 0-10 μm de l'échantillon L1 comporte deux modes correspondant aux classes granulométriques 0,2-1 et 2-10 μm . La fraction 0-10 μm de l'échantillon L1 LE-WDC possède une distribution granulométrique qui se rapproche de l'échantillon précédent, aucun enrichissement en particule fine n'est observé alors qu'un tel enrichissement aurait pu être attendu du fait de l'enrichissement en smectites de la fraction L1 LE-WDC 0-10 μm . Cette contradiction est peut être liée à la technique de granulomètre laser utilisée qui sous-estime les particules fines dans le cas de la population multimodales. Par contre, si l'on s'intéresse à la fraction 0-2 μm des échantillons L1 et L1 LE-WDC, on remarque que la fraction 0,2-1 μm est enrichie dans l'échantillon L1 LE-WDC au détriment principalement de la fraction 2-5 μm . On pourrait alors penser que ce sont les fractions les plus fines (inférieures à 1 μm) qui sont les plus mobilisables par le lessivage des sols, ce qui est en accord avec les résultats minéralogiques. En effet d'après les analyses précédentes, cette fraction est très enrichie en smectites (cf Figure 7).

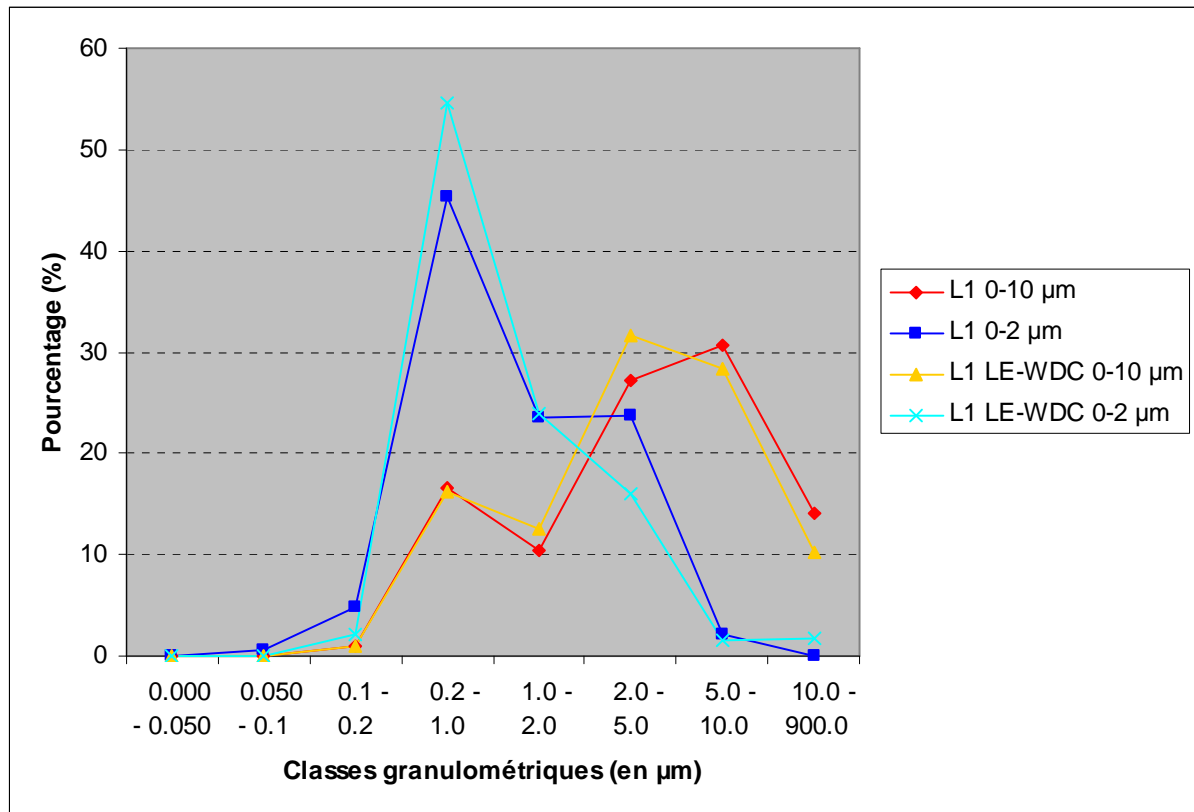


Figure 10 : Comparaison de la distribution granulométrique des échantillons L1 LE-WDC et L1 des fractions 0-2 et 0-10 µm

III. Les traceurs du lessivage et leur sensibilité aux différentes méthodes d'analyse

Le second objectif de notre étude est de déterminer la sensibilité de l'analyse minéralogique et de la CEC comme traceurs du lessivage dans une expérimentation au laboratoire consistant à superposer deux colonnes de matériaux limoneux contrastés minéralogiquement. La question est de savoir quelle quantité de fractions inférieure à 2 µm du limon éluvié doit migrer pour être détectable dans le limon illuvié. Ceci a été déterminé en mélangeant la fraction 0-2 µm de l'échantillon L1 avec un échantillon de minéralogie contrasté, appelé L2 et prélevé à Vancé, dans la Sarthe (X = 471090 et Y = 2316012 ; coordonnées en Lambert 2 étendu), dans un horizon E d'un luvisol peu développé entre 30 et 45 cm de profondeur.

A) Matériel et méthode

A) 1. Caractérisation de l'échantillon L2

Afin de déterminer au mieux la sensibilité de l'analyse minéralogique et de la CEC comme traceurs du lessivage, l'échantillon L2 total a été analysé comme l'échantillon L1 total (pH, CEC, cations échangeables, granulométrie, chimie totale et matière organique, cf paragraphe IIA1). De plus, l'échantillon L2 a subi le même fractionnement granulométrique que l'échantillon L1 (cf paragraphe IIA2). Toutes les fractions ainsi obtenues ont été caractérisées comme celles du précédent échantillon (DRX, CEC, distribution granulométrique pour la fraction 0-2 µm, chimie totale pour la fraction 0-2 µm et matière organique pour la fraction 0-2 µm).

A) 2. Tests de dopage : mélange de la fraction 0-2 µm du L1 avec le L2 total

La fraction 0-2 µm de l'échantillon L1 étant la fraction la plus mobilisable, elle a été mélangée à l'échantillon L2 total afin de « simuler expérimentalement » une arrivée de colloïdes dans un horizon sous-jacent. La fraction 0-2 µm de l'échantillon L1 a été mélangée dans 30 g de l'échantillon L2 total selon plusieurs proportions (0,1% ; 0,5% ; 1% ; 5% ; 10%) (**Figure 11**). Afin d'éviter tout problème d'agrégation de nos échantillons, les différents mélanges ont été réalisés directement en suspension et non après séchage. Puis, la fraction 0-2 µm de chaque mélange a été prélevée par décantation (en suivant la loi de Stokes) et caractérisée comme précédemment (DRX, CEC, distribution granulométrique, cf paragraphe IIA2). Trois répétitions ont été réalisées pour l'analyse au DRX pour tous les mélanges « L1+L2 ».

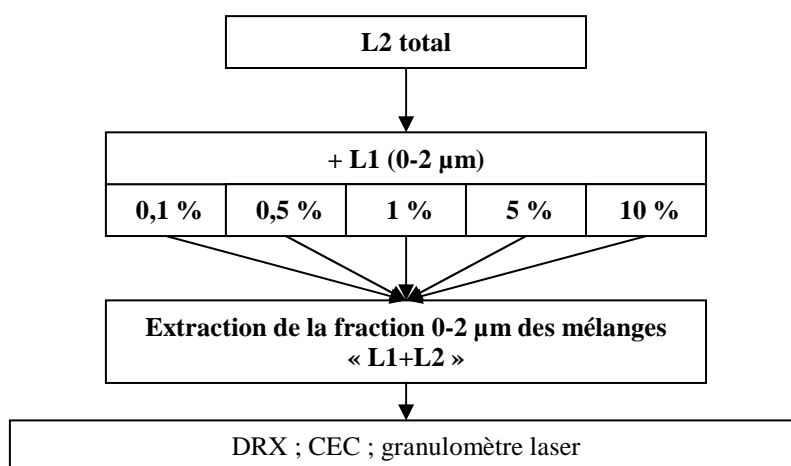


Figure 11 : Les différentes analyses réalisées sur les mélanges des échantillons L1 et L2

B) Résultats et discussion

B)1. Comparaison des échantillons L1 et L2

La CEC de l'échantillon L2 total (7.3 cmol+/kg) (*Annexe 3*) est plus faible que celle de l'échantillon L1 total (17.8 cmol+/kg). Ainsi, l'échantillon L1 serait plus favorable à la dispersion des colloïdes. Le **pH du sol** de l'échantillon L2 (7.03) étant supérieur à 6.5, le L2 est favorable à la floculation des colloïdes et donc à leur piégeage. La **texture** de l'échantillon L2 est plutôt limoneuse (69.9 % de limons, 15.6 % d'argiles et 14.5 % de sables) alors que celle de l'échantillon L1 est plutôt limoneuse argileuse (58.7 % de limons, 30.7 % d'argiles et 10.6 % de sables). Tout comme pour l'échantillon L1, les analyses des **cations échangeables** montrent que la surface du complexe d'échange est majoritairement saturée en un cation floculant, le calcium (75.3 % de saturation en Ca^{2+}).

La minéralogie et la CEC ont été déterminées sur toutes les fractions granulométriques de l'échantillon L2. Si l'on superpose les trois traitements de la fraction 0-10 µm (*Figure 12*) pour identifier le cortège minéralogique, on remarque qu'il est constitué de quartz, de feldspaths, de kaolinite, d'illite, de chlorite et de **vermiculite** (disparition du pic à 14 Å et apparition d'un pic à 10 Å après chauffage ; pic à 14 Å toujours présent sur la lame glycolée). Des rapports des pics (001) ont été calculés à partir des diffractogrammes correspondants (*Annexe 4*) afin de suivre l'évolution de chaque minéral avec la granulométrie (*Figure 13*). La principale différence avec l'échantillon précédent est la présence de vermiculite (minéral défavorable à la dispersion) et l'absence de smectite (minéral favorable à la dispersion). La vermiculite est le minéral le plus représenté dans la fraction la plus grossière et non dans la fraction la plus fine, contrairement à la smectite de l'échantillon L1. Le quartz et la vermiculite sont les minéraux les plus représentés dans les fractions supérieures à 1 µm. Leurs abondances diminuent dans les fractions inférieures ou égales à 1 µm et restent relativement faibles dans les fractions inférieures ou égales à 0.2 µm hormis pour la vermiculite. L'illite et la chlorite sont absentes dans les fractions inférieures ou égales à 0.2 µm mais leurs abondances augmentent avec la granulométrie à partir des fractions supérieures à 0.2 µm. De même que pour les minéraux précédents, la kaolinite est absente dans les fractions inférieures

ou égales à 0.2 μm . Par contre, son abondance atteint un maximum dans les fractions proches de 2 μm puis elle diminue quand la granulométrie augmente.

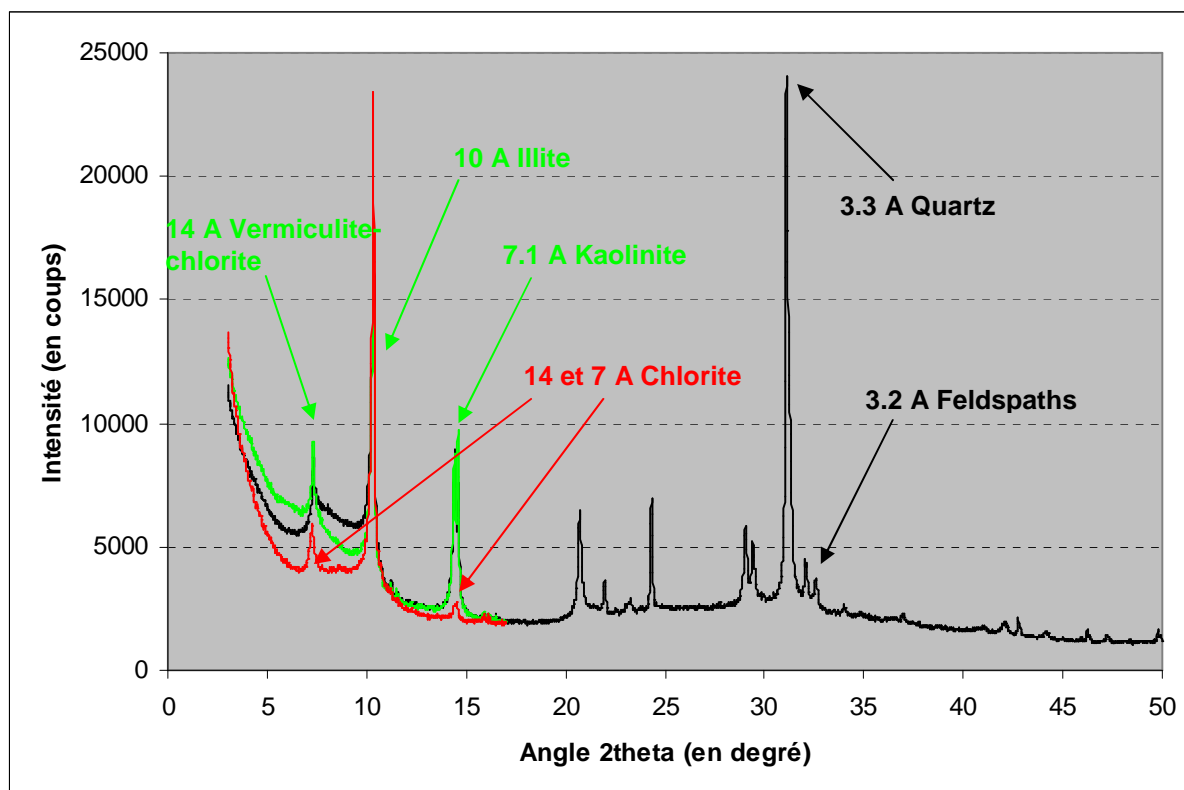


Figure 12 : Diffractogrammes superposés de l'échantillon L2 0-10 μm pour les trois traitements (lames normale, glycolée et chauffée)

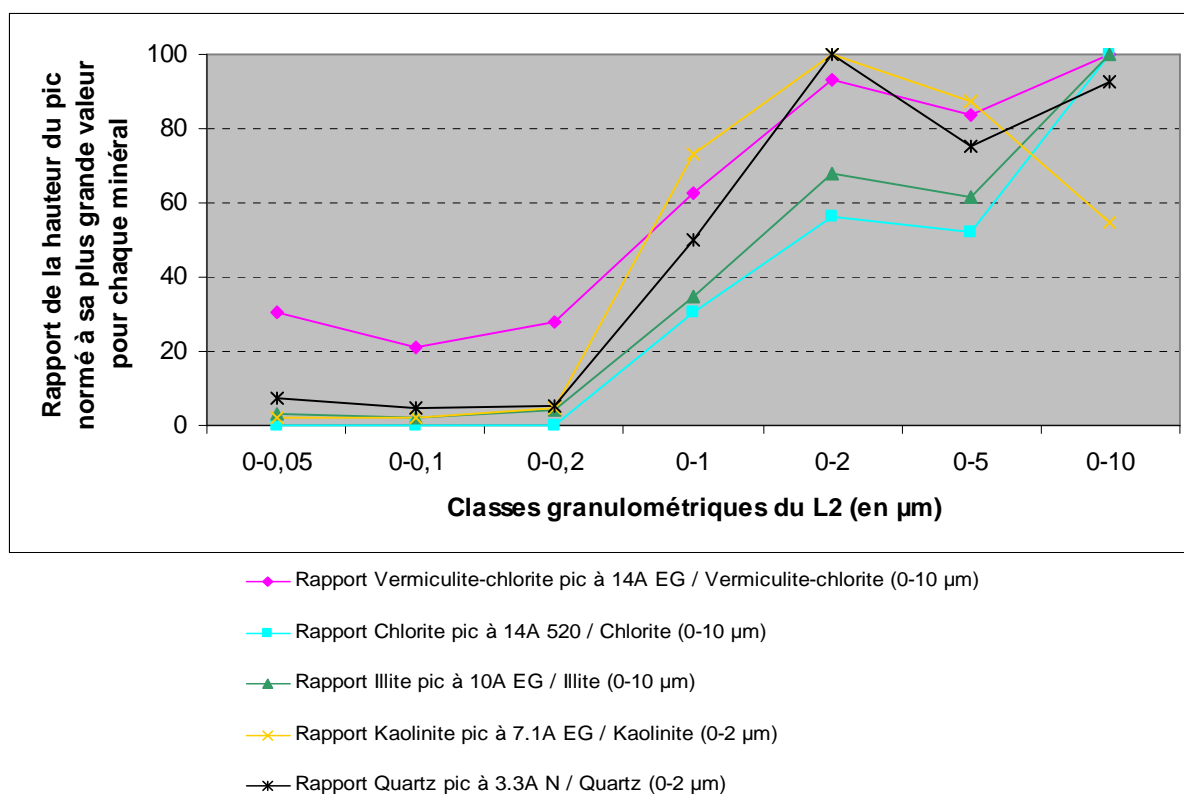


Figure 13 : Evolution des rapports des pics (001) de l'échantillon L2 avec la granulométrie

Naturellement, on remarque que plus la fraction granulométrique est petite, plus la CEC est importante (**Figure 14**). Si l'on compare la CEC de chaque fraction granulométrique entre les deux échantillons, on remarque que la CEC de l'échantillon L1 est toujours supérieure à celle de l'échantillon L2 sauf pour la fraction la plus fine. La CEC plus élevée dans le L1 s'explique par la présence de smectites (argiles développant une forte CEC) dans le L1, absentes dans le L2. Par contre, les valeurs de la CEC dans les trois fractions les plus fines sont quasi équivalentes (pourcentage d'erreur de 5 %). Sachant que la gamme des valeurs de la CEC pour chacun des deux minéraux est assez large (100-150 cmol+/kg pour la smectite et 70-120 cmol+/kg pour la vermiculite ; Girard et al., 2005), cela pourrait expliquer leurs valeurs assez homogènes dans les fractions les plus fines.

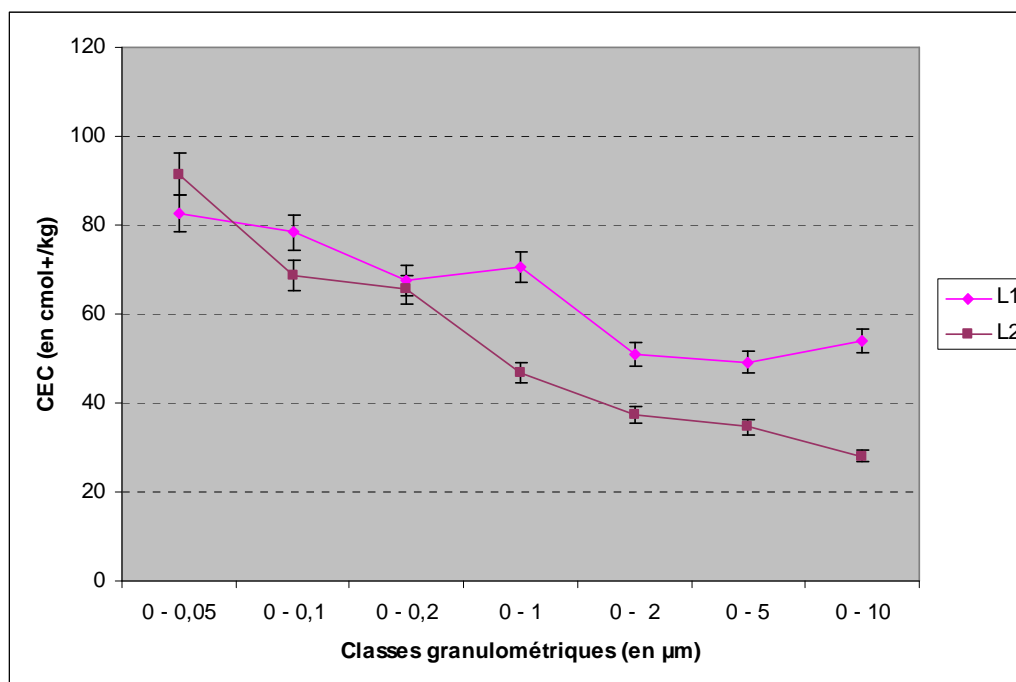


Figure 14 : Comparaison de la CEC des échantillons L1 et L2 selon la granulométrie

Les échantillons L1 et L2 ont donc une minéralogie contrastée. Les différences se situent au niveau de la nature du principal minéral argileux et au niveau des distributions granulométriques des différents minéraux. En effet, l'échantillon L1 contient de la smectite qui est facilement mobilisable lors du lessivage des sols contrairement à la vermiculite. L'échantillon L1 contenant plus de particules fines, sa CEC totale se retrouve alors plus importante. Ainsi l'échantillon L1 aurait plus de charges négatives à la surface des colloïdes par rapport l'échantillon L2. C'est pourquoi, la dispersion physico-chimique via les répulsions électrostatiques serait plus importante dans l'échantillon L1. Enfin, l'échantillon L1 serait favorable à l'éluviation (départ de colloïdes) tandis que l'échantillon L2 serait favorable à l'illuviation (dépôt de colloïdes) de part leur contraste minéralogique et leur pH.

B)2. Détection des particules mobilisées

Analyses de la minéralogie et de la CEC :

D'après les diffractogrammes des mélanges « L1+L2 » (*Annexe 5*), on détecte facilement la smectite issue de l'échantillon L1 dans les mélanges à 5% et 10% de L1. Tout comme pour les différentes fractions granulométriques des échantillons L1 et L2, les hauteurs des pics (001) des mélanges « L1+L2 » ont été mesurées sur les diffractogrammes correspondants. Afin d'étudier la relation entre les minéraux et le pourcentage de L1, des droites de mélanges (droites de régression linéaires) ont été réalisées pour chaque minéral (*Annexe 6 et figure 15*). La hauteur du pic de la smectite croît significativement en fonction de la quantité de fraction inférieure à 2 µm du L1 ajoutée dans le L2. Cette augmentation est nette à partir de 5% de fraction inférieure à 2µm de L1 ajoutée (*Figure 15*). Aucune tendance significative n'est observée pour les hauteurs de pic des autres minéraux (*Annexe 6*). Finalement, la smectite pourrait être un traceur du lessivage, ce minérale est en effet détectable au DRX à partir d'un apport de 5% de L1 dans le L2.

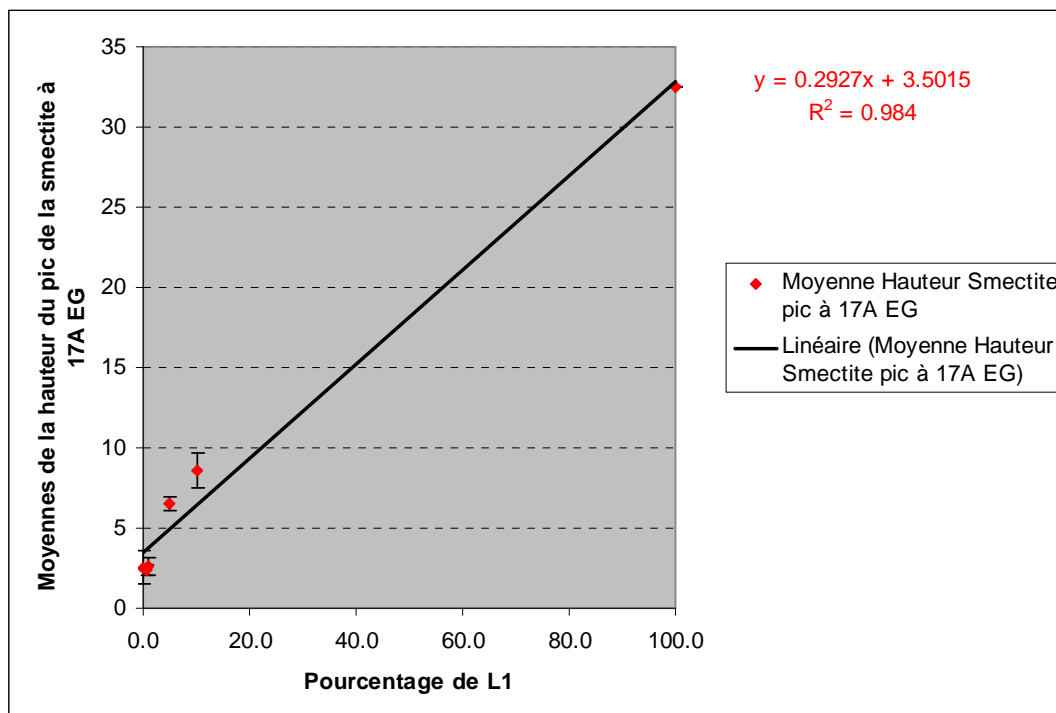


Figure 15 : Droite de mélanges de la smectite

La CEC a été analysée pour les cinq mélanges « L1+L2 ». D'après les résultats (**Figure 16**), la CEC est proche de 45 cmol+/kg pour tous les mélanges. Si l'on compare ces valeurs à celles des échantillons L2 0-2 μm et L1 0-2 μm , on remarque que les CEC des mélanges se situent entre ces deux pôles (entre 37,5 et 51 cmol+/kg). Un calcul de régression linéaire a été réalisé et le R^2 est de 0.4946. Cette méthode d'analyse n'est donc pas assez sensible pour détecter une arrivée de colloïdes, constitués de smectite, dans un horizon illuvié. Sachant que la fraction 0-2 μm de l'échantillon L1 est riche en minéraux argileux présentant une faible CEC comme la kaolinite et l'illite (respectivement 3-15 et 10-40 cmol+/kg ; Girard et al., 2005) (cf Figure 7), on pourrait alors penser qu'il faudrait rajouter beaucoup plus que 10% de L1 dans le L2 afin de voir la smectite influencer suffisamment la CEC de l'échantillon « L1+L2 » pour être détectable par cette méthode d'analyse.

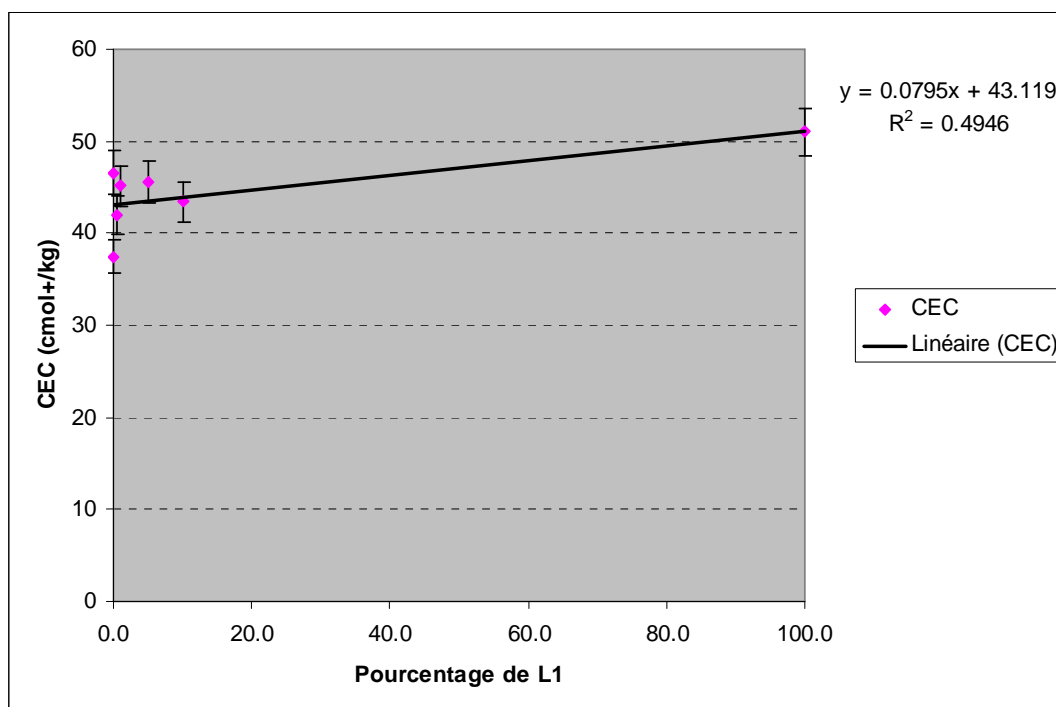


Figure 16 : Droite de mélanges de la CEC

Analyse de la distribution granulométrique :

La distribution granulométrique a été analysée au granulomètre laser pour les cinq mélanges « L1+L2 ». Les courbes ainsi obtenues ont été discrétisées en 35 classes, afin de détailler au mieux les distributions granulométriques. Les cinq courbes obtenues ont une allure similaire à celle des échantillons L1 et L2 0-2 μm (**Figure 17**) avec deux modes centrés sur les classes granulométriques 0,364-0,424 et 1,235-1,439 μm . On remarque que plus la quantité de L1 est importante, plus le second mode est faible et plus le premier mode est important. L'échantillon L1 étant riche en smectite dans les fractions granulométriques les plus fines (cf Figure 7), l'échantillon « L1+L2 » se retrouve enrichi en particules fines au fur et à mesure que l'on rajoute du L1. Afin de déterminer si ces évolutions sont quantitatives, des droites de mélanges ont été réalisées pour ces deux modes (**Figure 18**). Les calculs de régression linéaire montrent que le R^2 de la classe 0,364-0,424 μm est de 0,8881 et celui de la classe 1,235-1,439 μm est de 0,943. Par contre les pentes des droites des régressions obtenues sont très faibles, et l'absence de point entre 10% et le pole L1 ne nous a pas permis d'extrapoler les relations. De plus, les granulométries de l'échantillon L2 et du mélange de 0.1% de L1 sont confondues. Dans l'état actuel il semble que ce traceur soit plus un indicateur qualitatif que quantitatif.

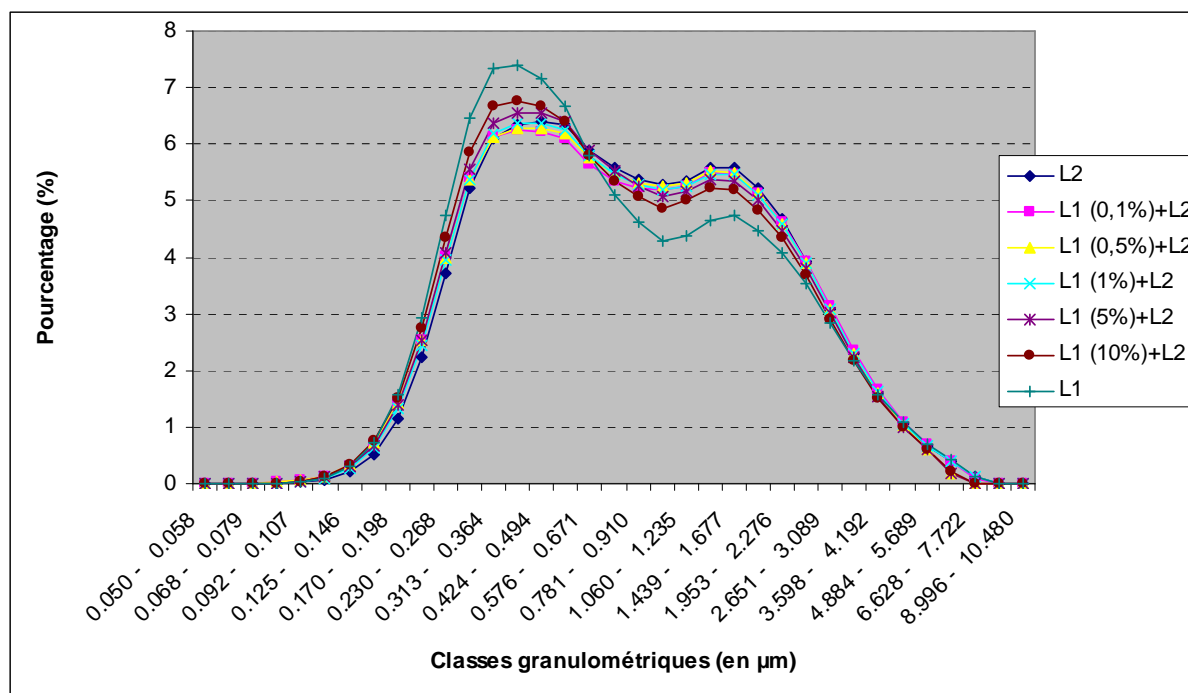


Figure 17 : Distributions granulométriques des mélanges « L1+L2 »

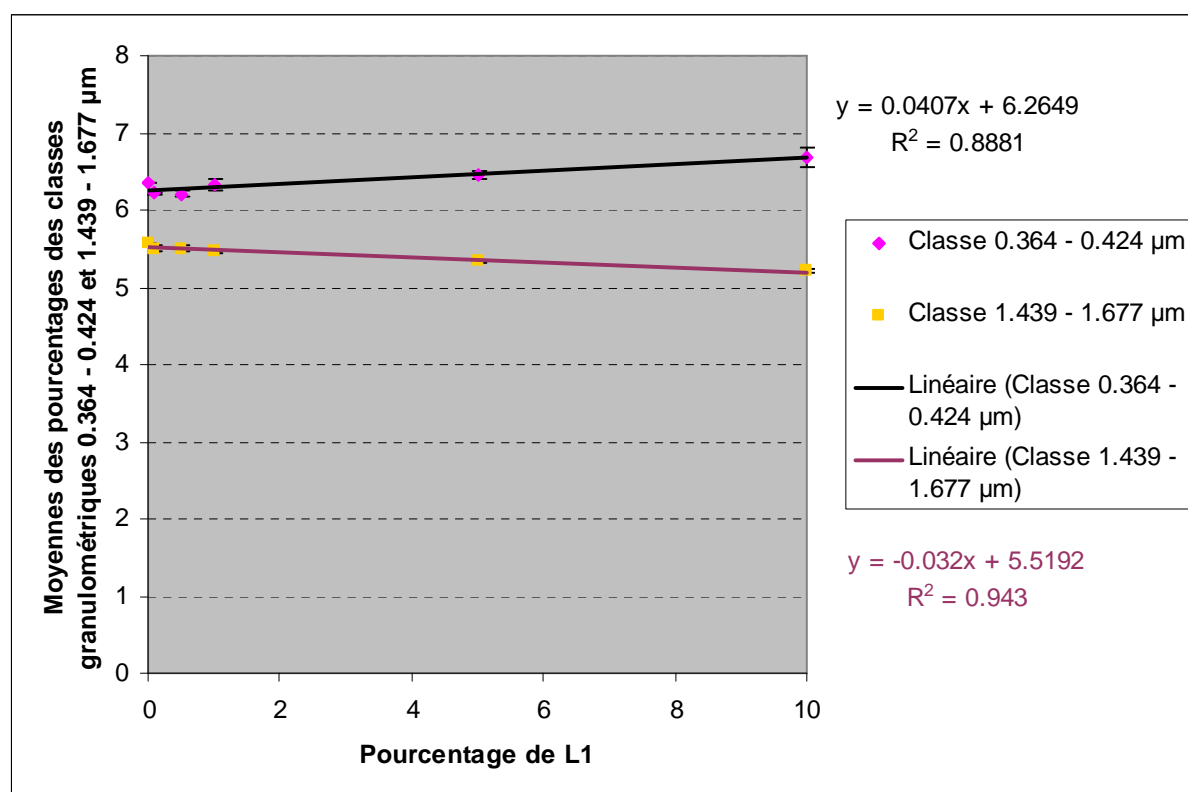


Figure 18 : Droites de mélanges des deux modes issus de la distribution granulométrique

La minéralogie et la distribution granulométrique peuvent donc être utilisées comme traceurs du lessivage expérimental d'horizons minéralogiquement contrastés. La diffraction des rayons X permet de détecter une arrivée de colloïdes à partir de 5% de matière issue de

l'horizon supérieur. L'utilisation quantitative des indicateurs granulométrie et CEC reste encore à démontrer par des analyses complémentaires de façon à conclure définitivement sur leur potentiel en tant que traceur et leur gamme d'utilisation. Enfin, les premières expérimentations sur colonne montrent qu'après 20 pluies d'orage, les quantités de matières éluviées sont de l'ordre de 0.1% (Quénard et al., 2010), gamme dans laquelle aucun des traceurs étudiés ne semble opérationnel à ce stade.

CONCLUSION

Les particules fines mobilisables par le lessivage des sols sont principalement constituées de quartz, de feldspaths, de phyllosilicates, de matière organique et certainement d'oxydes de fer (de Jonge et al., 2004). Des expérimentations de dispersion en basse énergie (LE-WDC) ont montré que la fraction mobilisable était enrichie en petits agrégats de smectites. Ces résultats sont cohérents avec la littérature. Plus le minéral argileux est petit, plus sa CEC est importante, plus il a d'affinité avec le COD et plus sa dispersion sera favorisée (Duchaufour, 1983) via les répulsions électrostatiques entre colloïdes et entre les colloïdes et la matrice du sol. C'est notamment le cas de la smectite. Ainsi la fraction mobilisable lors du lessivage a une signature minéralogique intermédiaire entre le 0,2 et le 2 μ m, conclusion confortée par l'analyse granulométrique de cette fraction.

Les traceurs identifiés pour suivre le transfert de particules dans des expérimentations au laboratoire sont la minéralogie et la distribution granulométrique. La diffraction des rayons X permet de quantifier un apport de fraction inférieure à 2 μ m riche en smectite dans un matériau n'en contenant pas initialement, dès 5% d'apport. Au cours du lessivage du sol, on devrait observer une augmentation de colloïdes au niveau des fractions granulométriques les plus fines (vers 0.4 μ m) et une diminution au niveau des plus grossières (vers 1.3 μ m). Cette indicateur ne reste que qualitatif dans l'état actuel de nos travaux. Par ailleurs, nous avons démontré que les principaux minéraux éluviés sont les smectites, argiles développant une très forte CEC. Ainsi l'analyse de la CEC pourrait permettre de détecter les colloïdes issus de l'horizon éluvié, mais dans l'état actuel nos travaux montrent que cette méthode d'analyse n'est pas assez sensible.

Par ailleurs, une question persiste : quelle est la dynamique des fractions mobilisables au cours du temps ? Les fractions mobilisables sont connues mais qu'en est-il de leurs évolutions au cours du temps (quantités et natures) ? Avec un protocole « LE-WDC » plus adapté, une cinétique de libération des fractions mobilisables aurait pu être déterminée. En effet, une telle cinétique peut être déterminée en libérant successivement des colloïdes type « LE-WDC » après séchage des échantillons. D'autre part, afin d'étudier au mieux les relations entre les traceurs du lessivage et le pourcentage de matériau éluvié, il faudrait réaliser plus de mélanges « L1+L2 » avec notamment des pourcentages de L1 supérieurs à 10%.

Finalement, la prochaine étape de cette étude serait de réaliser un protocole expérimental sur cylindres sous simulateur de pluie pour se rapprocher des conditions naturelles. En effet, il est possible de réaliser une « colonne de sol » avec l'horizon L1 superposant l'horizon L2. Les traceurs identifiés dans cette étude ne sont sensibles qu'à partir de 5% de matière illuviée. L'élaboration d'autres traceurs est nécessaire pour détecter un dépôt de particules inférieur à 5%.

BIBLIOGRAPHIE

- de Jonge L. W., Kjaergaard C. et Moldrup P. (2004) Colloids and colloid-facilitated transport of contaminants in soils : an introduction. *Vadose Zone Journal* 3 : 321-325.
- Duchaufour P. (1983) *Pédologie. 1. Pédogenèse et classification*. 2ème édition. Masson, Paris. p71-125 et p314-327.
- Faivre P. et Chamarro C. (1995) Facteurs biotiques et mécanismes de lessivage particulaire dans les sols. L'exemple des toposéquences caractéristiques des Andes de Colombie. *Etude et Gestion des Sols* 1 : 25-42.
- Girard M. C., Walter C., Rémy J. C., Berthelin J. et Morel J. L. (2005) *Sols et environnement*. Dunod, Paris. p39.
- Goldberg S., Kapoor B. S. et Rhoades J. D. (1990) Effect of aluminium and iron oxides and organic matter on flocculation and dispersion of arid zone soils. *Soil Sci.* 150 : 588-593.
- Hiemenz P. C. et Rajagopalan R. (1997) *Principles of colloid and surface chemistry*. 3^{ème} édition. Marcel Dekker, New-York.
- Jamagne M. (1973) *Contribution à l'étude pédogénétique des formations lœssiques du Nord de la France*. Thèse de doctorat, Université de Gembloux.
- Kaplan D. I., Bertsch P.M. et Adriano D.C (1997) Mineralogical and physicochemical differences between mobile and nonmobile colloidal phases in reconstructed pedons. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61 : 641-649.
- Kjaergaard C., de Jonge L. W., Moldrup P. et Schjonning P. (2004) Water-dispersible colloids : effects of measurement method, clay content, initial soil matric potential, and wetting rate. *Vadose Zone Journal* 3 : 403-412.
- Kretschmar R., Robarge W. P. et Weed S. B. (1993) Flocculation of kaolinitic soil clays : Effects of humic substances and iron oxides. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57 : 1277-1283.
- Le Bissonnais Y. (1988) *Analyse des mécanismes de désagrégation et de mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies*. Thèse de doctorat, Université d'Orléans.
- Le Bissonnais Y. (1996) Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *Eur. J. Soil Sci.* 47 : 425-437.
- Legros J.P. (2007) *Les grands sols du monde - Science et technologie de l'environnement - Sciences de la terre*. PPUR presses polytechniques : p295-311.
- Levy G.J., Eisenberg H. et Shainberg I. (1993) Clay dispersion as related to soil properties and water permeability. *Soil Sci.* 155 : 15-22.
- Lozet et Mathieu (1997) *Dictionnaire de Science du Sol*. Lavoisier TEC&DOC.

- Miller W.P., Frenkel H. et Newman K.D. (1990) Flocculation concentration and sodium/calcium exchange of kaolinitic soil clays. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54 : 346-351.
- Montagne D., Cornu S., Le Forestier L. et Cousin I. (2009) Soil drainage as an active agent of recent soil evolution: a review. *Pedosphere* 19 : 1-13.
- Phillips J. D. (2007) Development of texture contrast soils by a combination of bioturbation and translocation. *Catena* 70 : 92-104.
- Poulsen T. G., Moldrup P., de Jonge L. W. et Komatsu T. (2006) Colloid and bromide transport in undisturbed soil columns : application of two-region model. *Vadose Zone Journal* 5 : 649-656.
- Quénard L., Samouelian A., Cousin I., Cornu S. (2010) Quantification of lessivage and impact of extreme climatic events on this process: an experimental approach. 19th WCSS, 2-6 Aout Brisbane.
- Robert M., Tessier D. (1974) Méthode de préparation des argiles des sols pour des études minéralogiques. *Ann. Agron.* 25 (6) : 859-882.
- Saidi D., Le Bissonnais Y., Duval O., Daoud Y. et Halitim A. (2004) Effet du sodium échangeable et de la concentration saline sur les propriétés physiques des sols de la plaine du Cheliff (Algérie). *Étude et Gestion des Sols* 11 : 81-92.
- Seta A. K. et Karathanasis A. D. (1996) Water dispersible colloids and factors influencing their dispersibility from soil aggregates. *Geoderma* 74 : 255-266.
- Seta A. K. et Karathanasis A. D. (1997) Stability and transportability of water-dispersible soil colloids. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61 : 604-611.
- Watts C. W., Dexter A. R. et Longstaff D. J. (1996) An assessment of the vulnerability of soil structure to destabilisation during tillage. Part II. Field trials. *Soil and Tillage Research* 37 : 175-190.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Inter-relations dans le cadre de ce stage M2 recherche

Figure 2 : Modèle classique du lessivage (Duchaufour, 1983 ; illustré par Legros, 2007)

Figure 3 : Illustration conceptuelle des principaux processus à considérer lors de la mobilisation in situ des particules fines (de Jonge et al., 2004 ; modifié)

Figure 4 : Les différentes analyses réalisées sur les échantillons dispersés à l'eau distillée (rapport sol/eau = 1/8)

Figure 5 : Les différentes analyses réalisées sur l'échantillon L1

Figure 6 : Diffractogrammes superposés de l'échantillon L1 LE-WDC 0-10 μm des trois traitements (lames normale, glycolée et chauffée)

Figure 7 : Evolution des rapports des pics (001) de l'échantillon L1 avec la granulométrie

Figure 8 : Evolution de la CEC de l'échantillon L1 avec la granulométrie

Figure 9 : Comparaison des diffractogrammes des lames normales des échantillons L1 LE-WDC 0-10 μm et des fractions 0-2 et 0-10 μm totalement dispersées

Figure 10 : Comparaison de la distribution granulométrique des échantillons L1 LE-WDC et L1 des fractions 0-2 et 0-10 μm

Figure 11 : Les différentes analyses réalisées sur les mélanges des échantillons L1 et L2

Figure 12 : Diffractogrammes superposés de l'échantillon L2 0-10 μm pour les trois traitements (lames normale, glycolée et chauffée)

Figure 13 : Evolution des rapports des pics (001) de l'échantillon L2 avec la granulométrie

Figure 14 : Comparaison de la CEC des échantillons L1 et L2 selon la granulométrie

Figure 15 : Droite de mélanges de la smectite

Figure 16 : Droite de mélanges de la CEC

Figure 17 : Distributions granulométriques des mélanges « L1+L2 »

Figure 18 : Droites de mélanges des deux modes issus de la distribution granulométrique

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Analyses (pH, granulométrie, chimie totale, CEC et cations échangeables) du L1 total et de sa fraction 0-2 μm

Annexe 2 : Diffractogrammes de toutes les fractions granulométriques de l'échantillon L1

Annexe 3 : Analyses (pH, granulométrie, chimie totale, CEC et cations échangeables) du L2 total et de sa fraction 0-2 μm

Annexe 4 : Diffractogrammes de toutes les fractions granulométriques de l'échantillon L2

Annexe 5 : Diffractogrammes de tous les mélanges « L1+L2 »

Annexe 6 : Droites de mélanges des principaux minéraux

ANNEXE 1

Analyses (pH, granulométrie, chimie totale, CEC et cations échangeables) du L1 total et de sa fraction 0-2 μm

Tableau 1.A : Analyses (pH, granulométrie, chimie totale, CEC et cations échangeables) du L1 total et de sa fraction 0-2 µm

	L1 total	L1 0-2 µm
pH du sol	6,19	X
CEC (cmol+/kg)	17,8	51
Granulométrie		
Argile (< 2 µm)	30,7 %	X
Limons fins (2-20 µm)	28,5 %	
Limons grossiers (20-50 µm)	30,2 %	
Sables fins (50-200 µm)	8%	
Sables grossiers (200-2000 µm)	2,6 %	
Chimie totale		
Al (g/100g)	5,14	10,5
Ca (g/100g)	0,402	0,46
Fe (g/100g)	3,64	7,87
K (g/100g)	1,64	2,48
Mg (g/100g)	0,5	1,15
Mn (mg/kg)	472	677
Na (g/100g)	0,462	0,58
Si (g/100g)	35,9	22,9
Carbone (C) organique et azote (N) total		
Carbone (C) organique (g/kg)	3,54	6,48
Azote (N) total (g/kg)	0,515	1,27
C/N	6,87	5,09
Matière organique (g/kg)	6,12	11,2
Cations échangeables		
Ca (cmol+/kg)	14,4	X
Mg (cmol+/kg)	1,1	X
Na (cmol+/kg)	0	X
K (cmol+/kg)	0,4	X

ANNEXE 2

Diffractogrammes de toutes les
fractions granulométriques de
l'échantillon L1

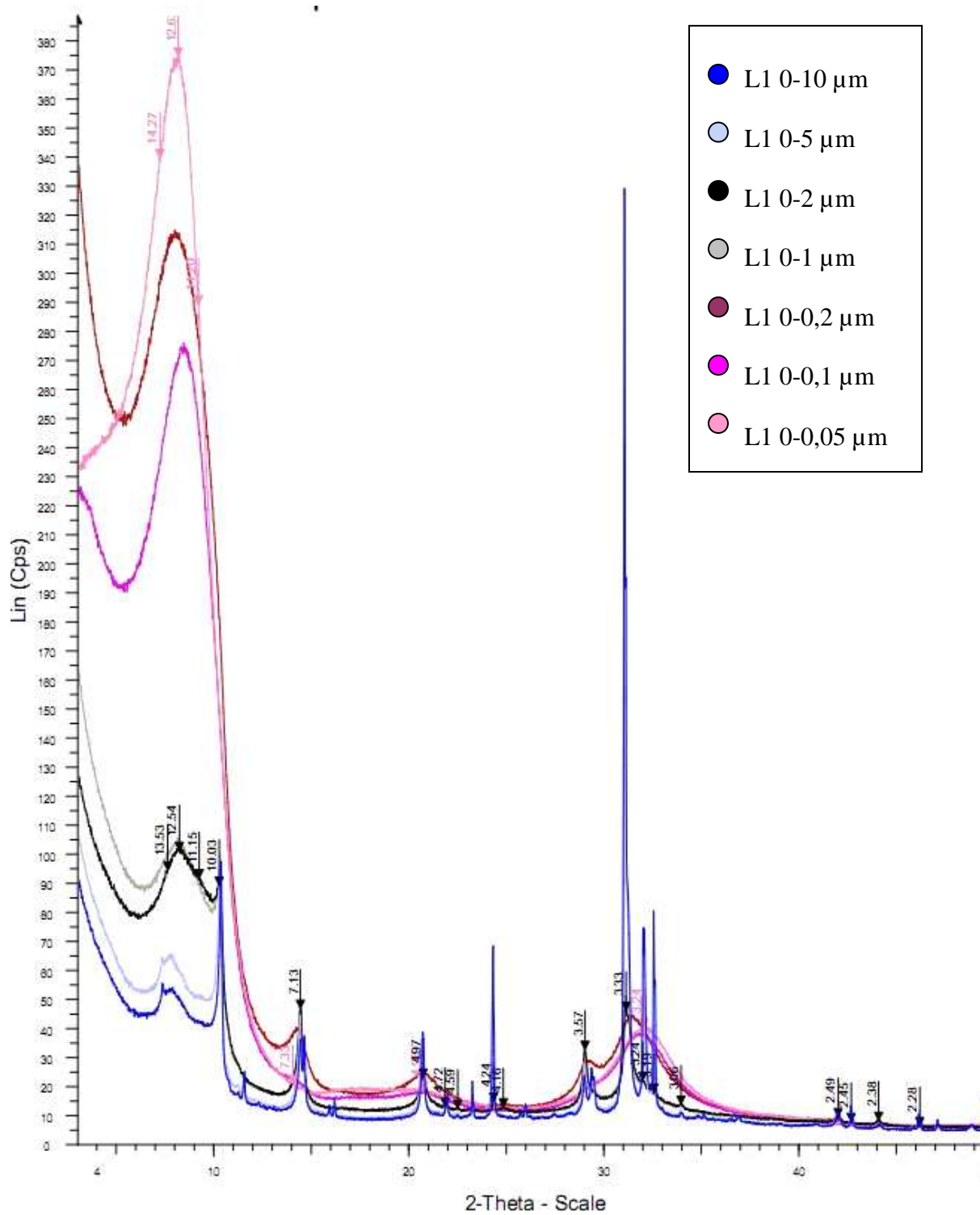


Figure 2.A : Diffractogrammes des lames normales de l'échantillon L1

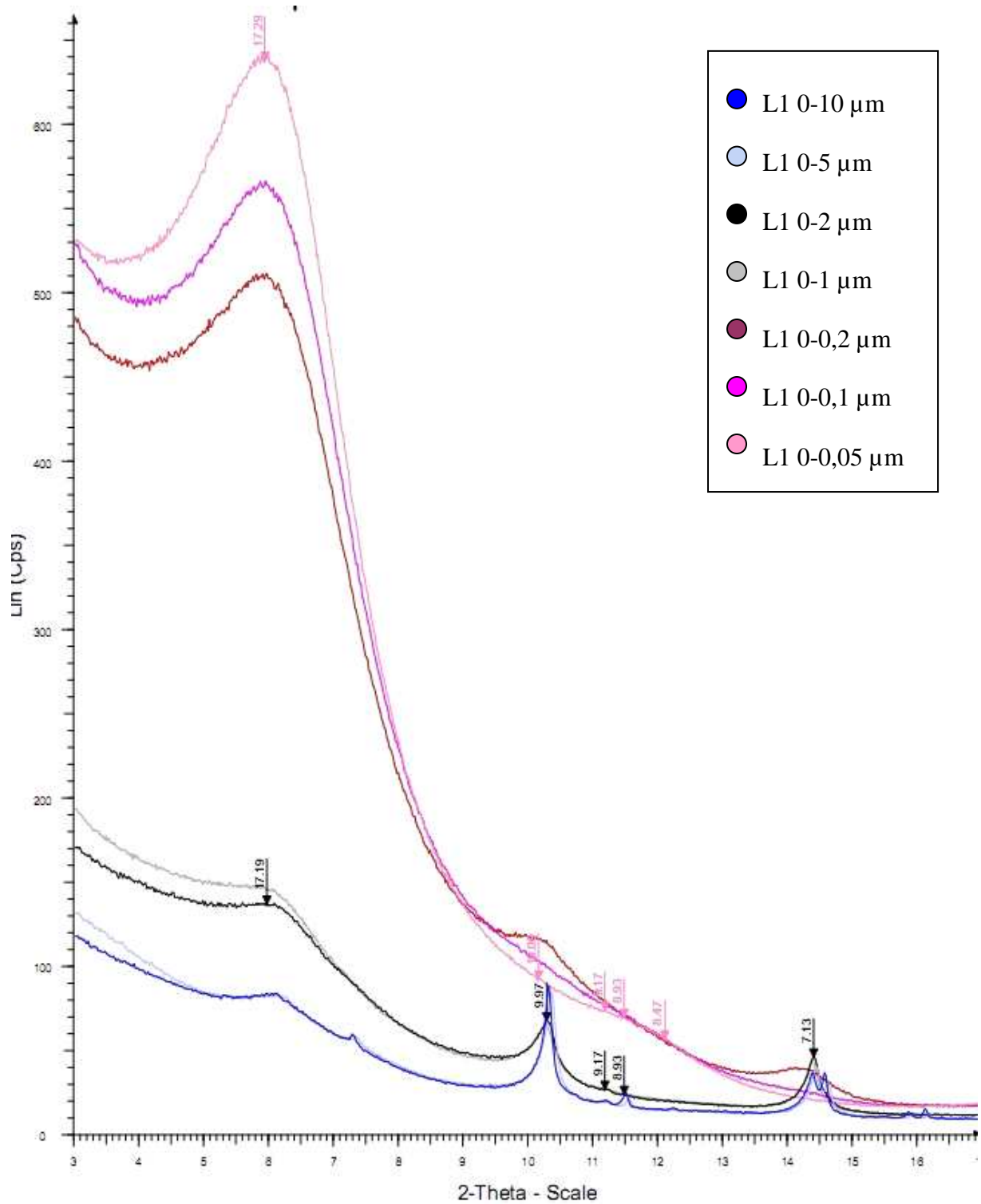


Figure 2.B : Diffractogrammes des lames glycolées de l'échantillon L1

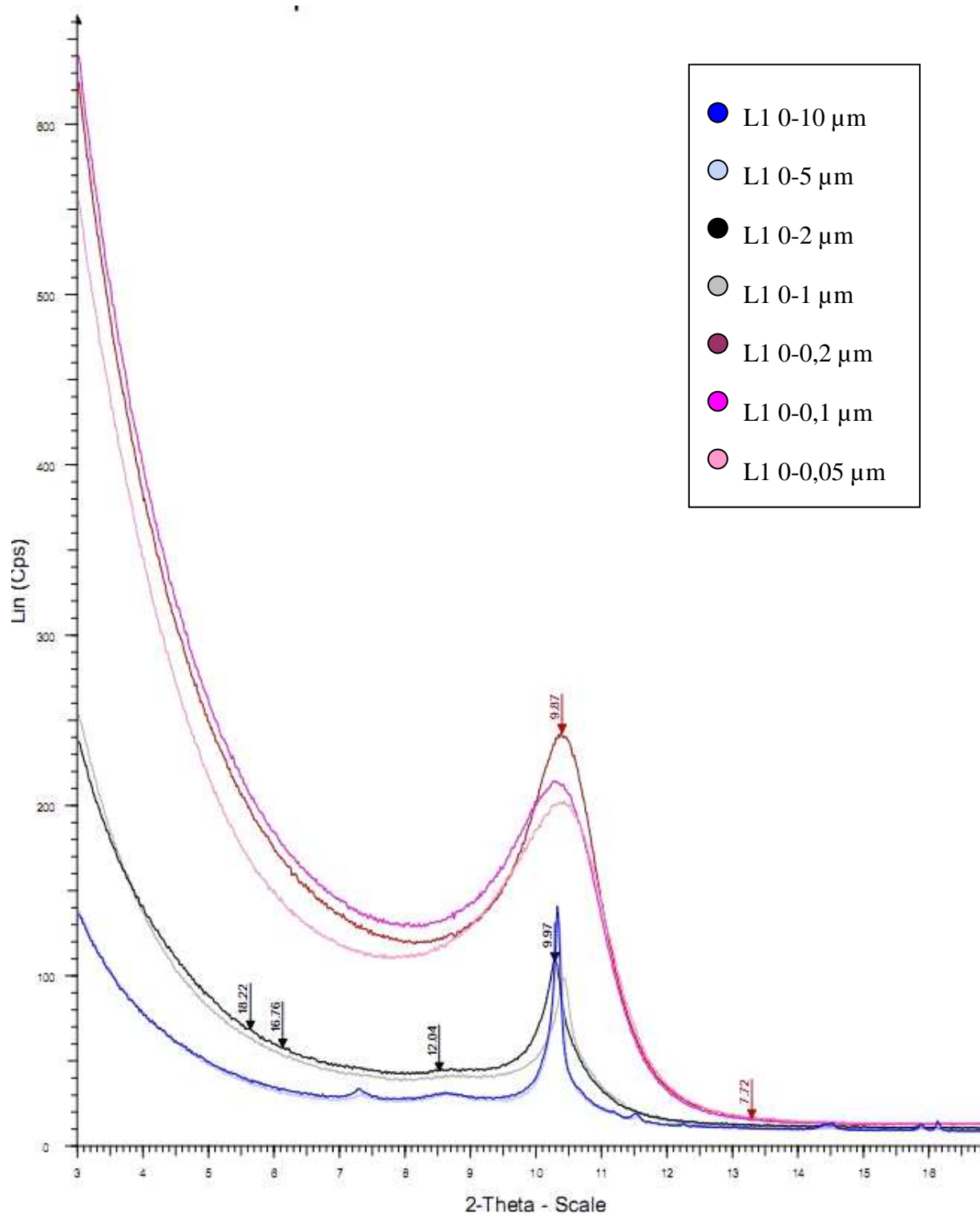


Figure 2.C : Diffractogrammes des lames chauffées de l'échantillon L1

ANNEXE 3

Analyses (pH, granulométrie, chimie totale, CEC et cations échangeables) du L2 total et de sa fraction 0-2 μm

Tableau 3.A : Analyses (pH, granulométrie, chimie totale, CEC et cations échangeables) du L2 total et de sa fraction 0-2 µm

	L2 total	L2 0-2 µm
pH du sol	7,03	X
CEC (cmol+/kg)	7,3	37,5
Granulométrie		
Argile (< 2 µm)	15,6 %	X
Limons fins (2-20 µm)	31,9 %	
Limons grossiers (20-50 µm)	38 %	
Sables fins (50-200 µm)	10,9 %	
Sables grossiers (200-2000 µm)	3,6 %	
Chimie totale		
Al (g/100g)	3,42	12
Ca (g/100g)	0,187	0,0646
Fe (g/100g)	1,84	7,08
K (g/100g)	1,29	2,42
Mg (g/100g)	0,209	0,927
Mn (mg/kg)	464	702
Na (g/100g)	0,476	1,18
Si (g/100g)	40,6	22,6
Carbone (C) organique et azote (N) total		
Carbone (C) organique (g/kg)	2,81	9,99
Azote (N) total (g/kg)	0,364	1,59
C/N	7,74	6,29
Matière organique (g/kg)	4,87	17,3
Cations échangeables		
Ca (cmol+/kg)	5,5	X
Mg (cmol+/kg)	0,4	X
Na (cmol+/kg)	0	X
K (cmol+/kg)	0,2	X

ANNEXE 4

Diffractogrammes de toutes les
fractions granulométriques de
l'échantillon L2

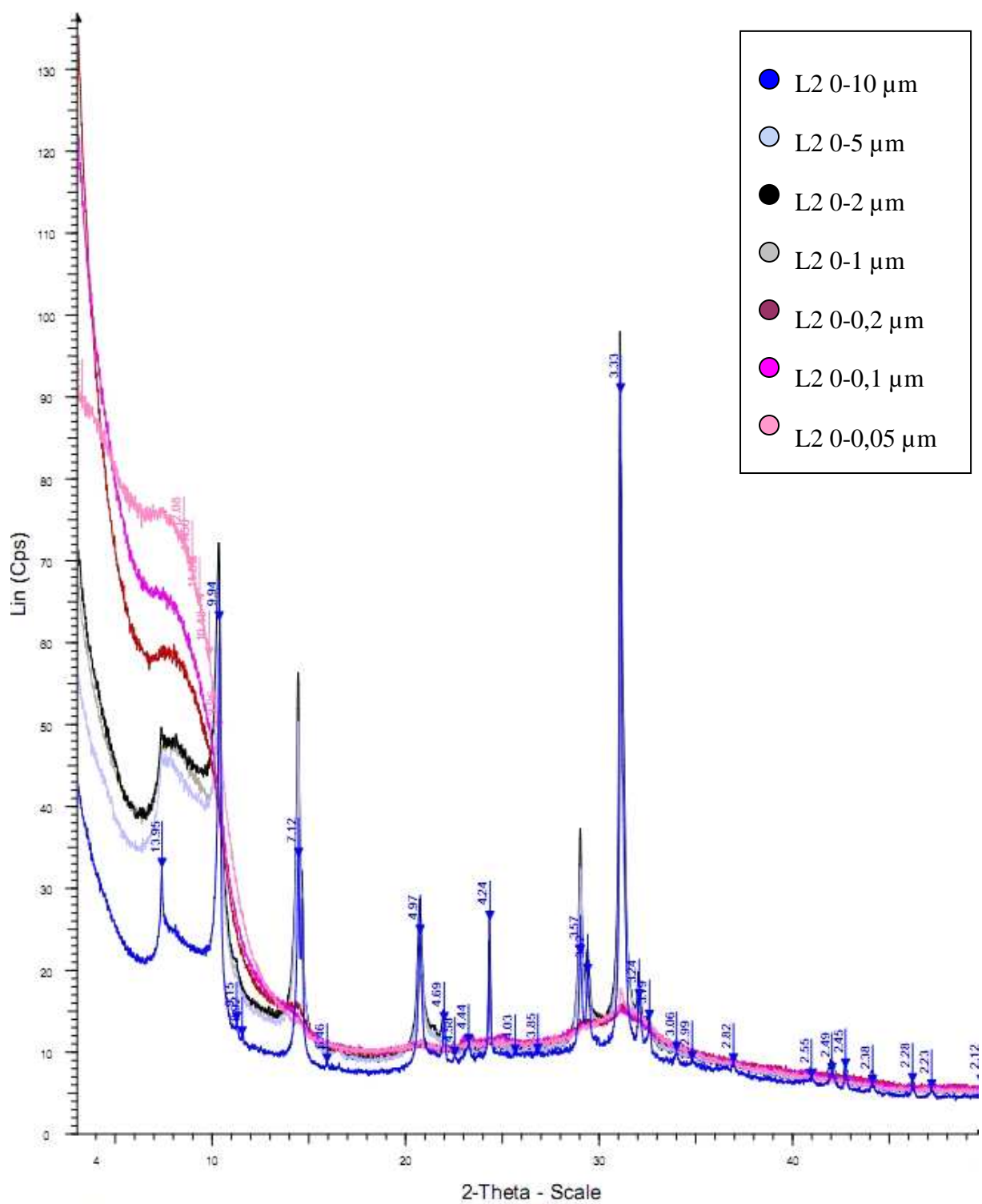


Figure 4.A : Diffractogrammes des lames normales de l'échantillon L2

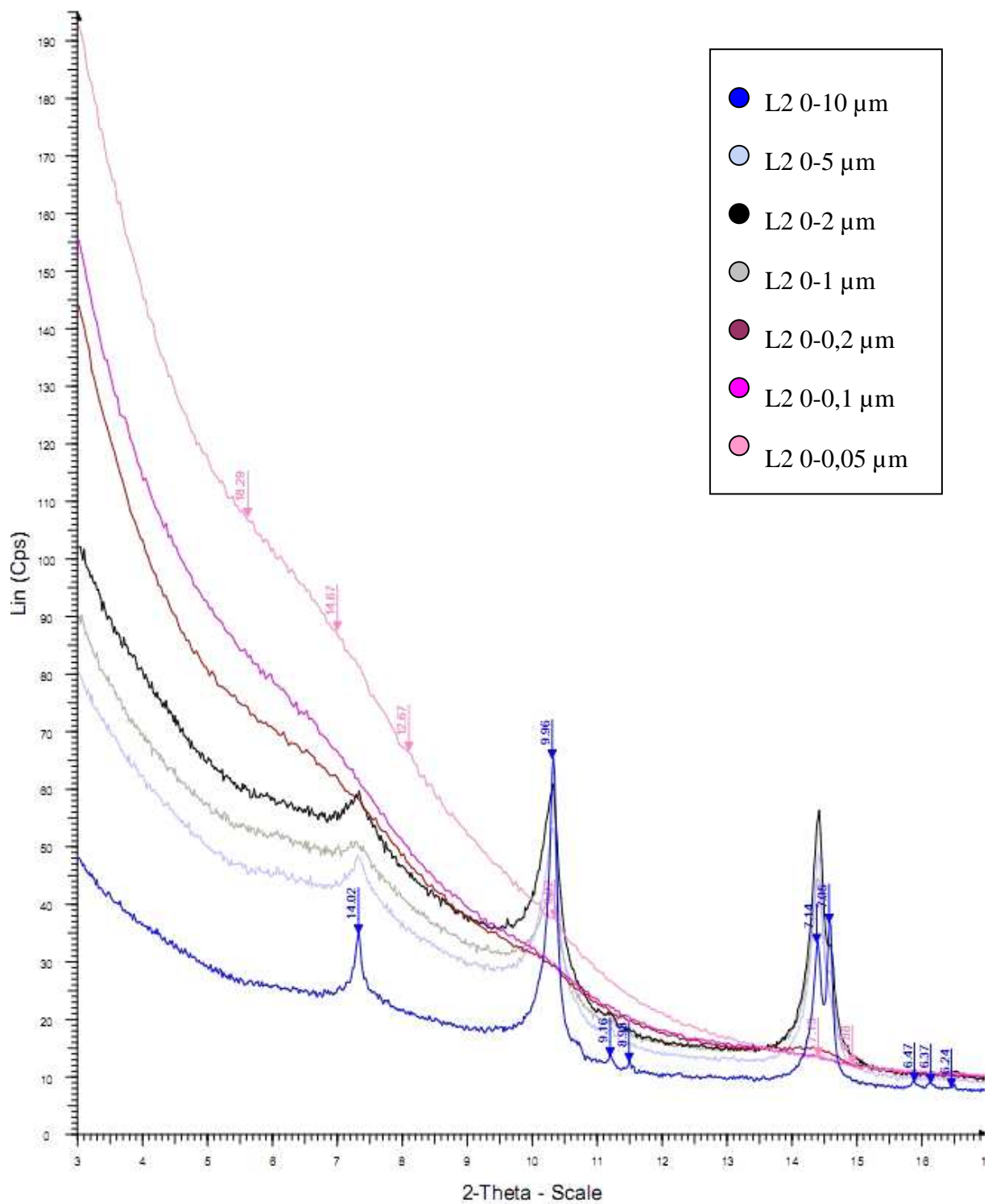


Figure 4.B : Diffractogrammes des lames glycolées de l'échantillon L2

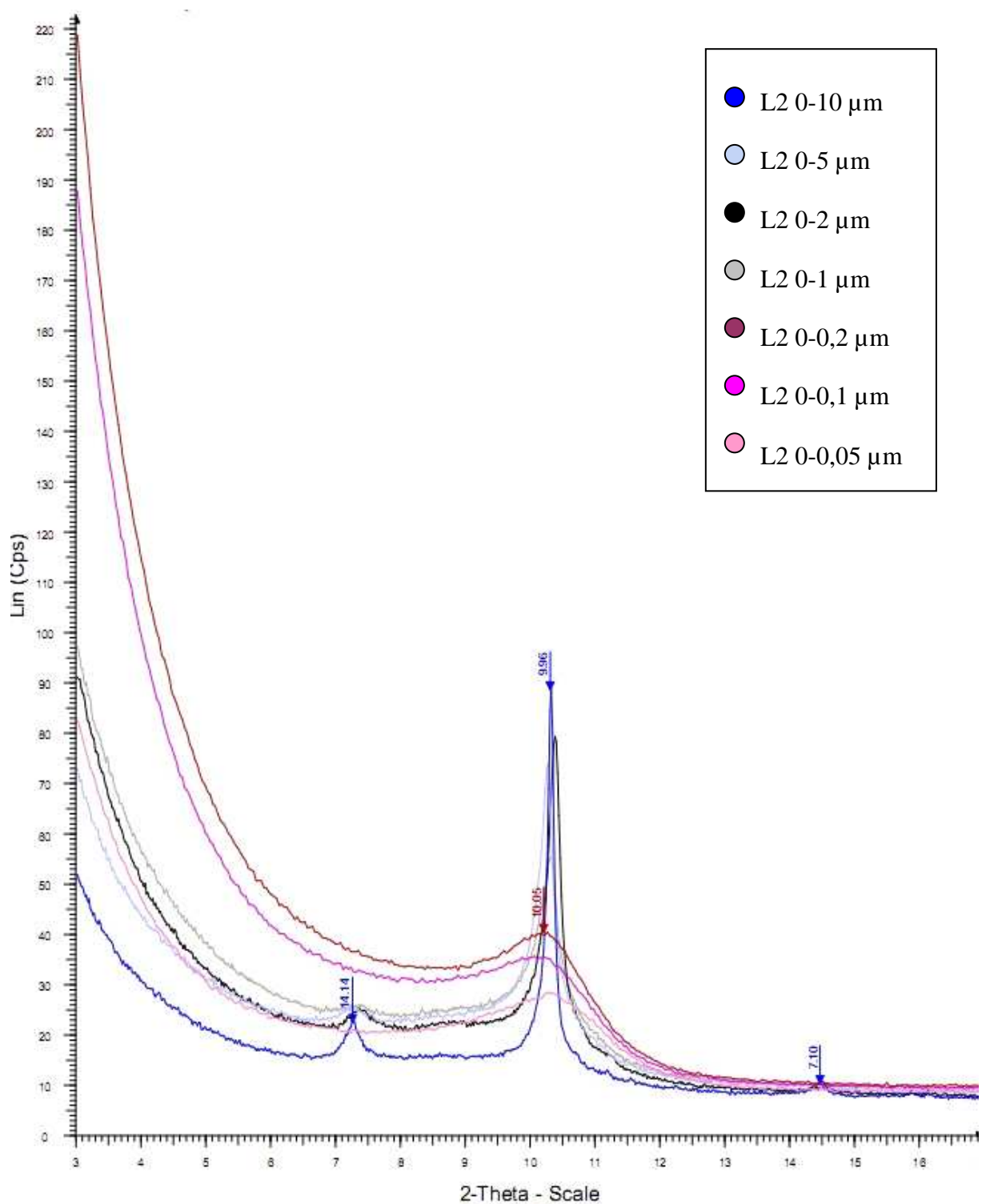


Figure 4.C : Diffractogrammes des lames chauffées de l'échantillon L2

ANNEXE 5

Diffractogrammes de tous les mélanges
« L1+L2 »

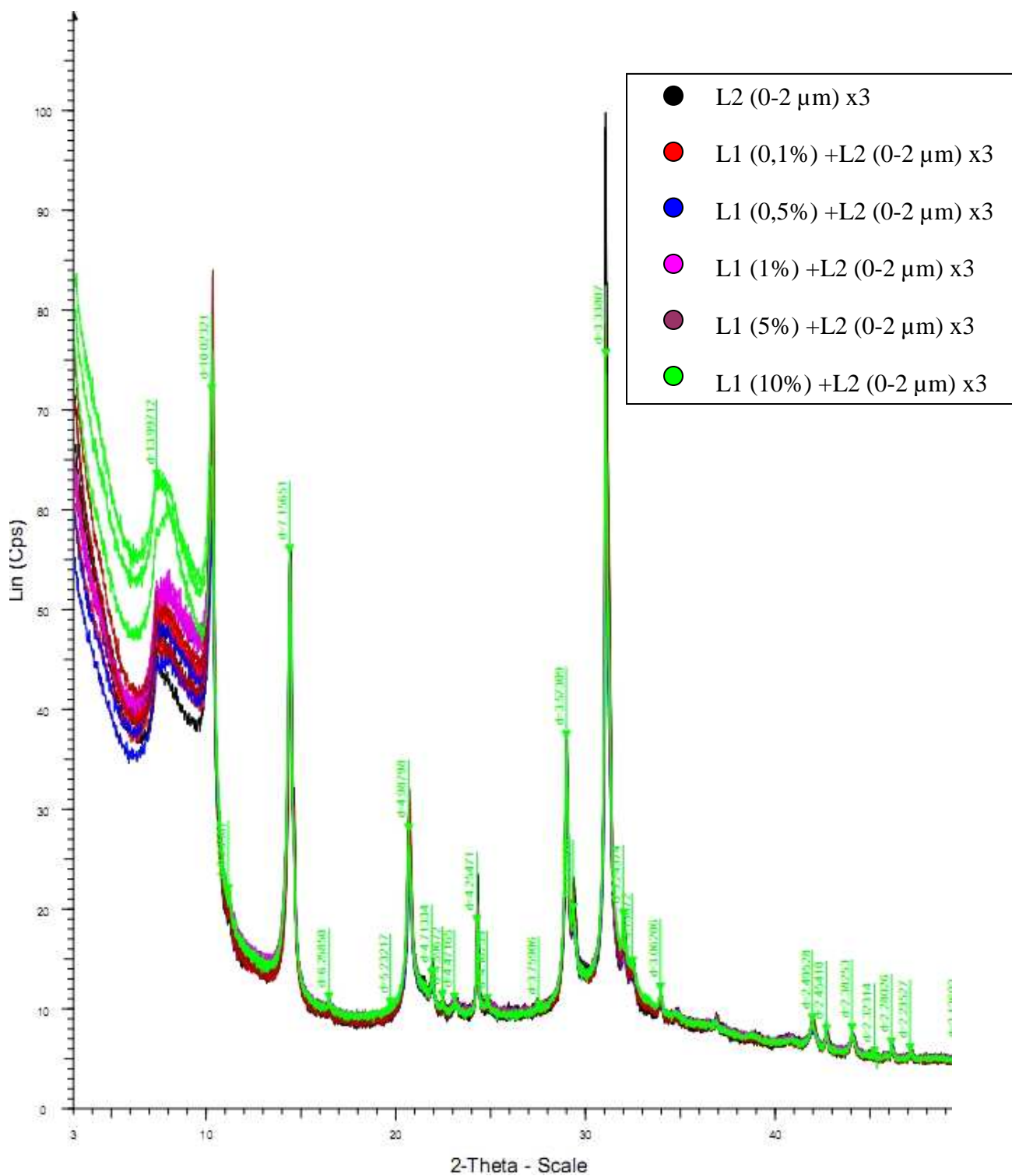


Figure 5.A : Diffractogrammes des lames normales des échantillons « L1+L2 »

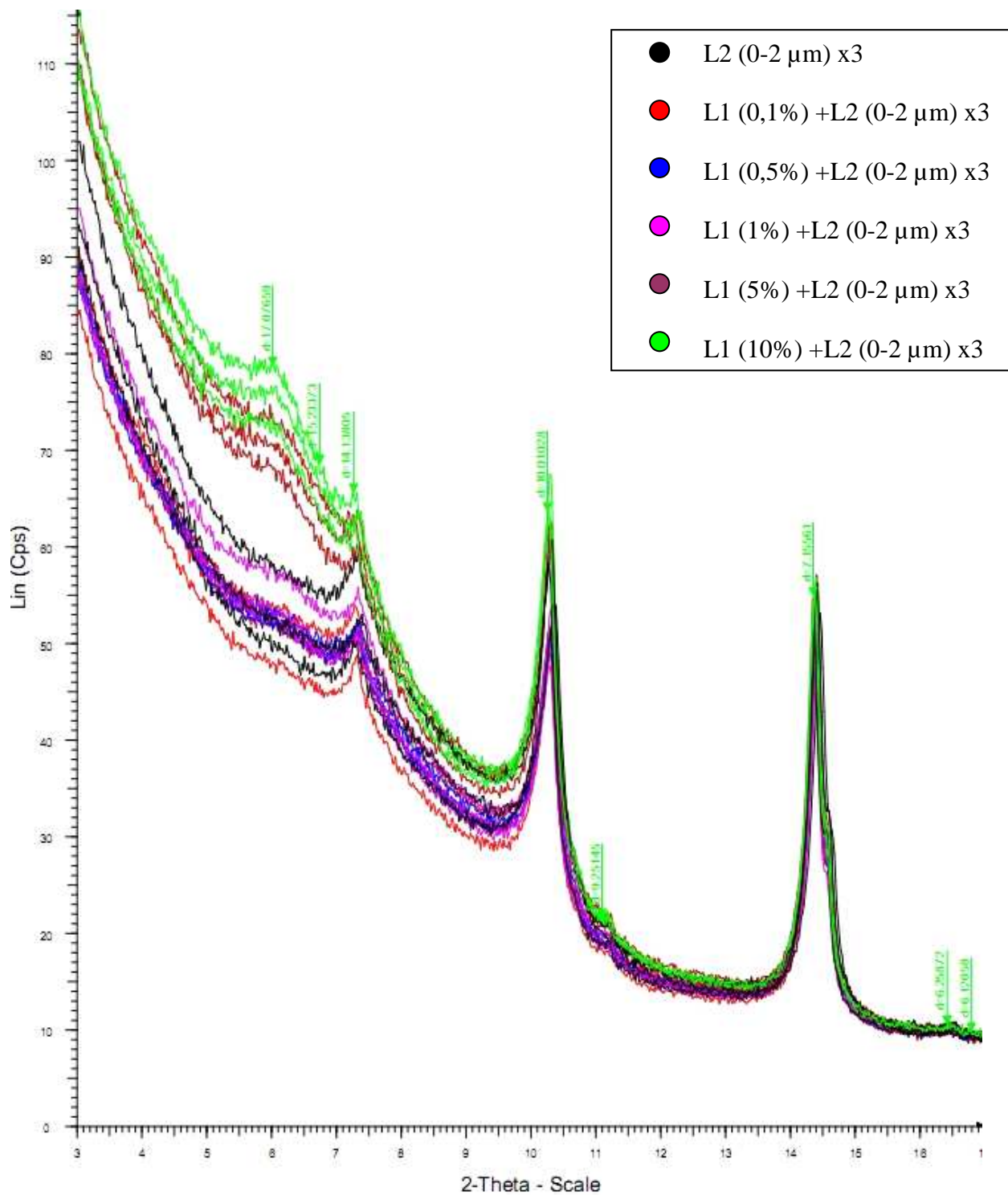


Figure 5.B : Diffractogrammes des lames glycolées des échantillons « L1+L2 »

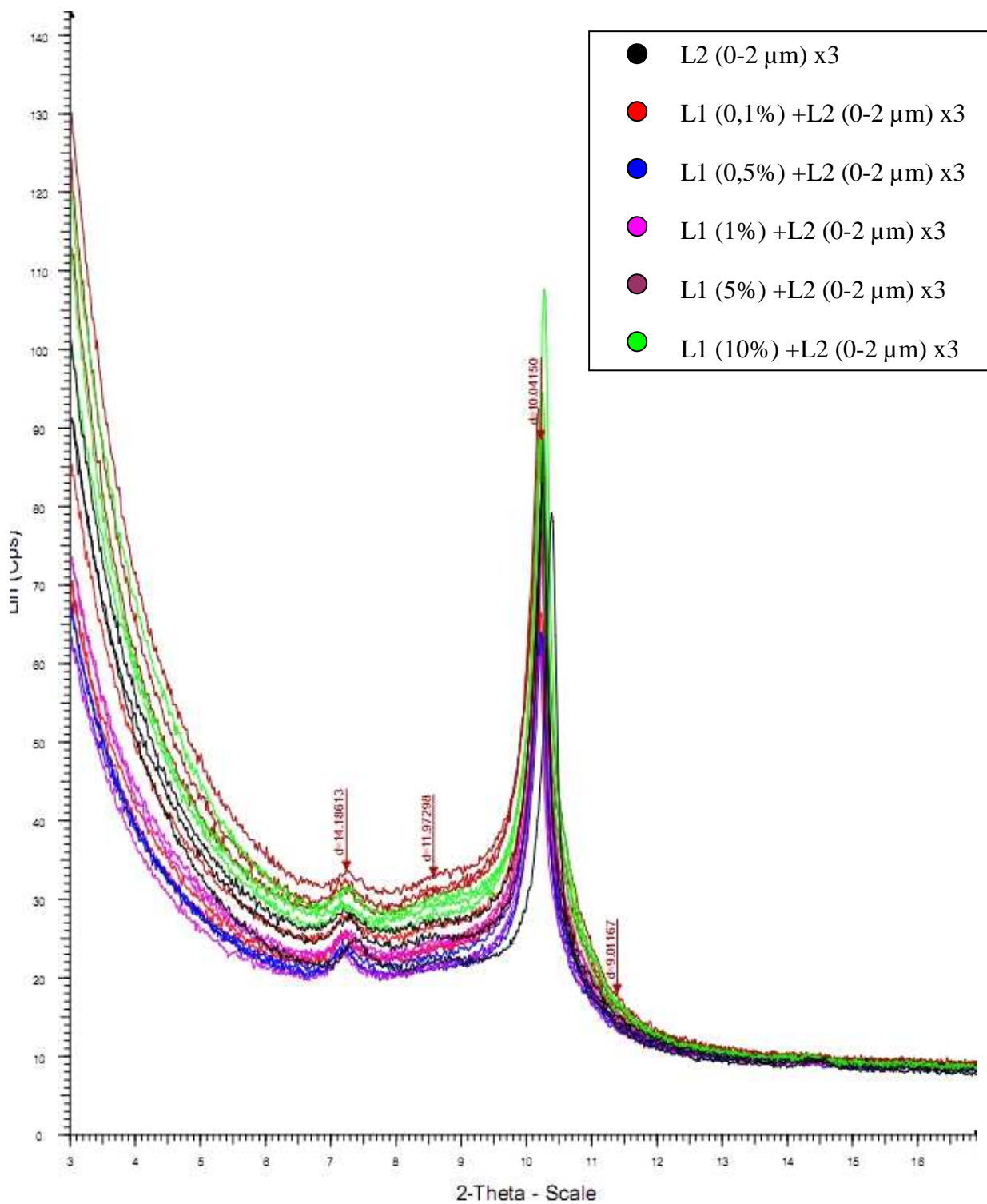


Figure 5.C : Diffractogrammes des lames chauffées des échantillons « L1+L2 »

ANNEXE 6

Droites de mélanges des principaux minéraux

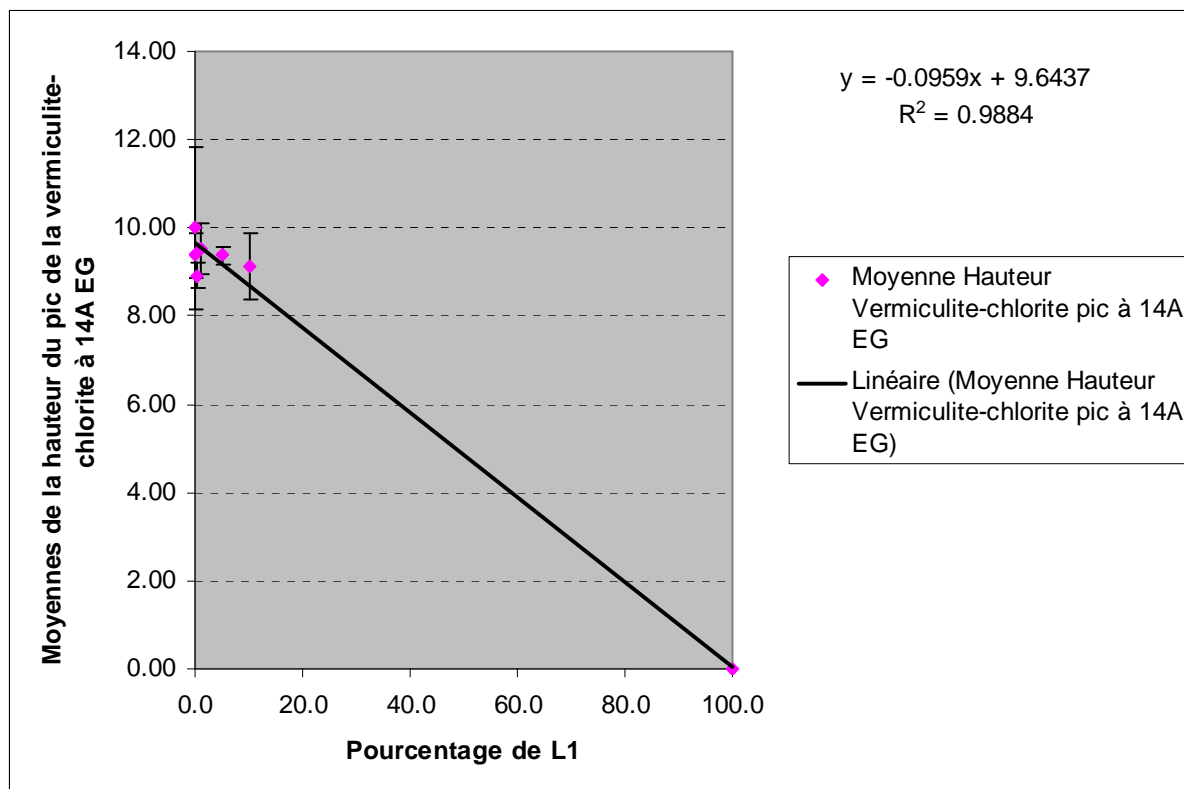


Figure 6.A : Droite de mélange de la vermiculite (+chlorite)

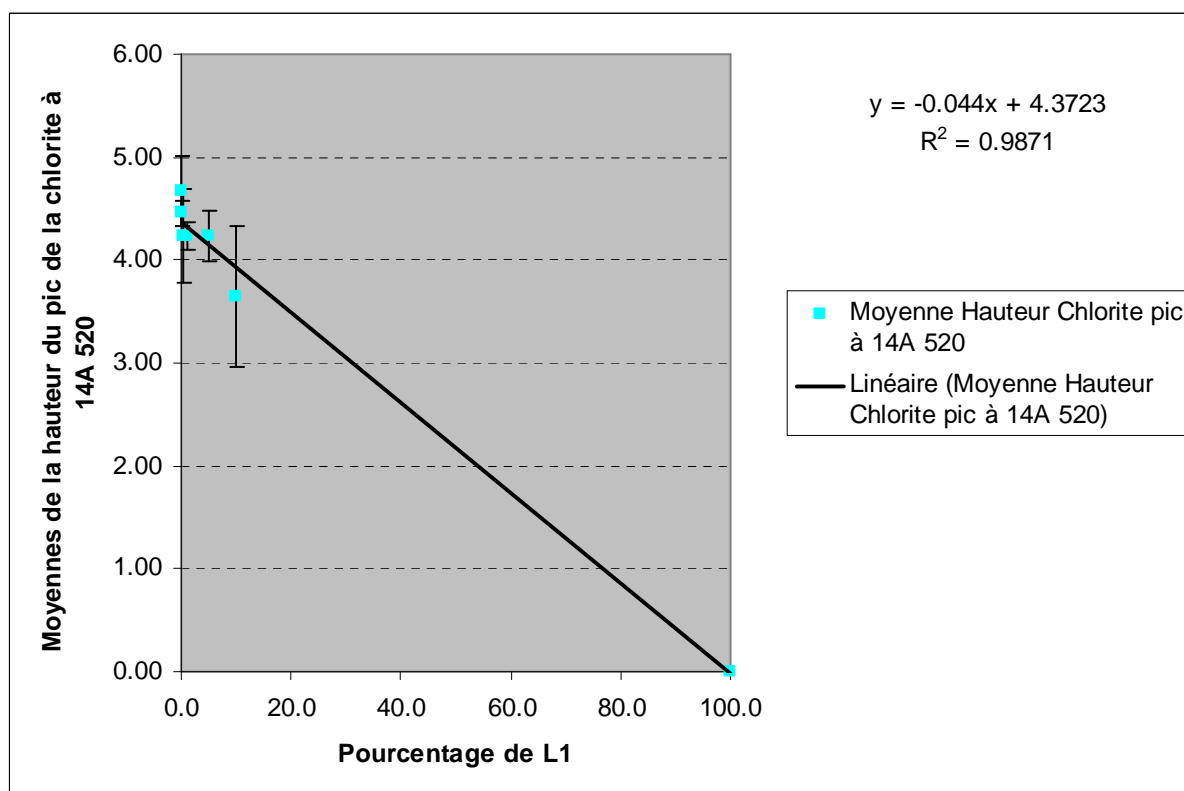


Figure 6.B : Droite de mélanges de la chlorite

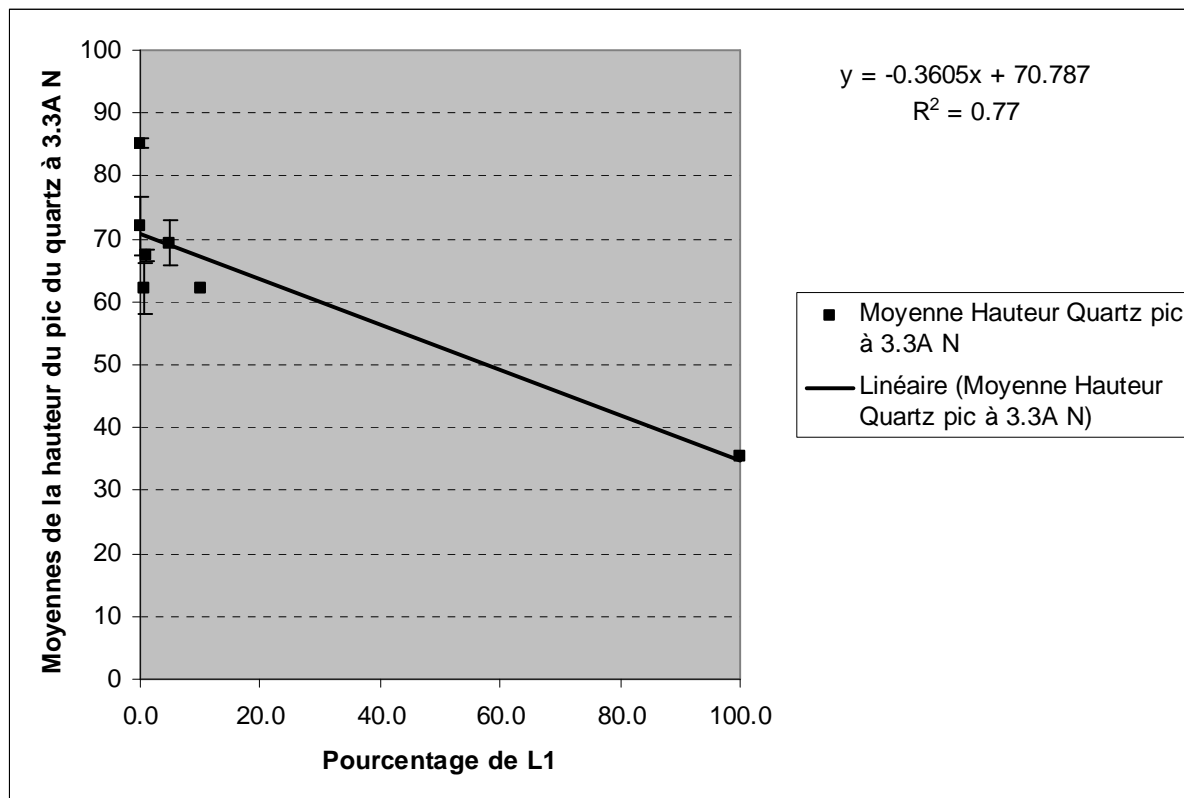


Figure 6.C : Droite de mélanges du quartz

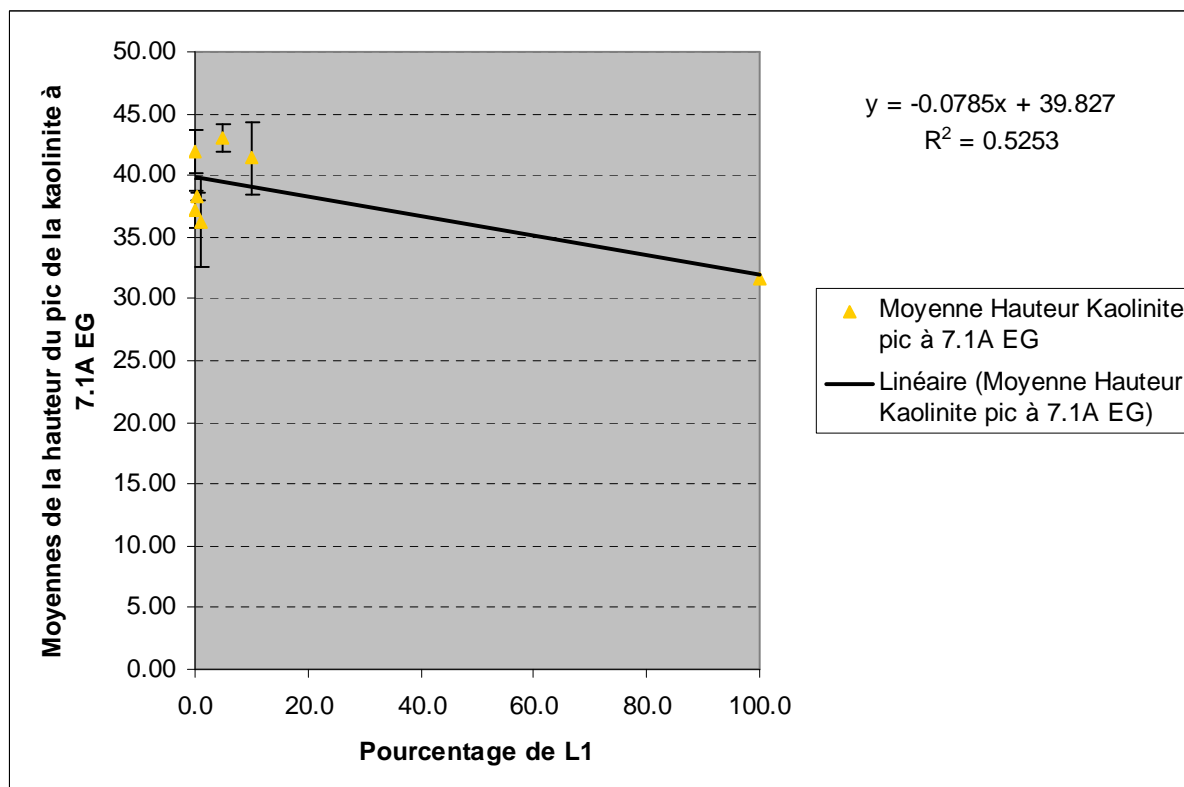


Figure 6.D : Droite de mélanges de la kaolinite

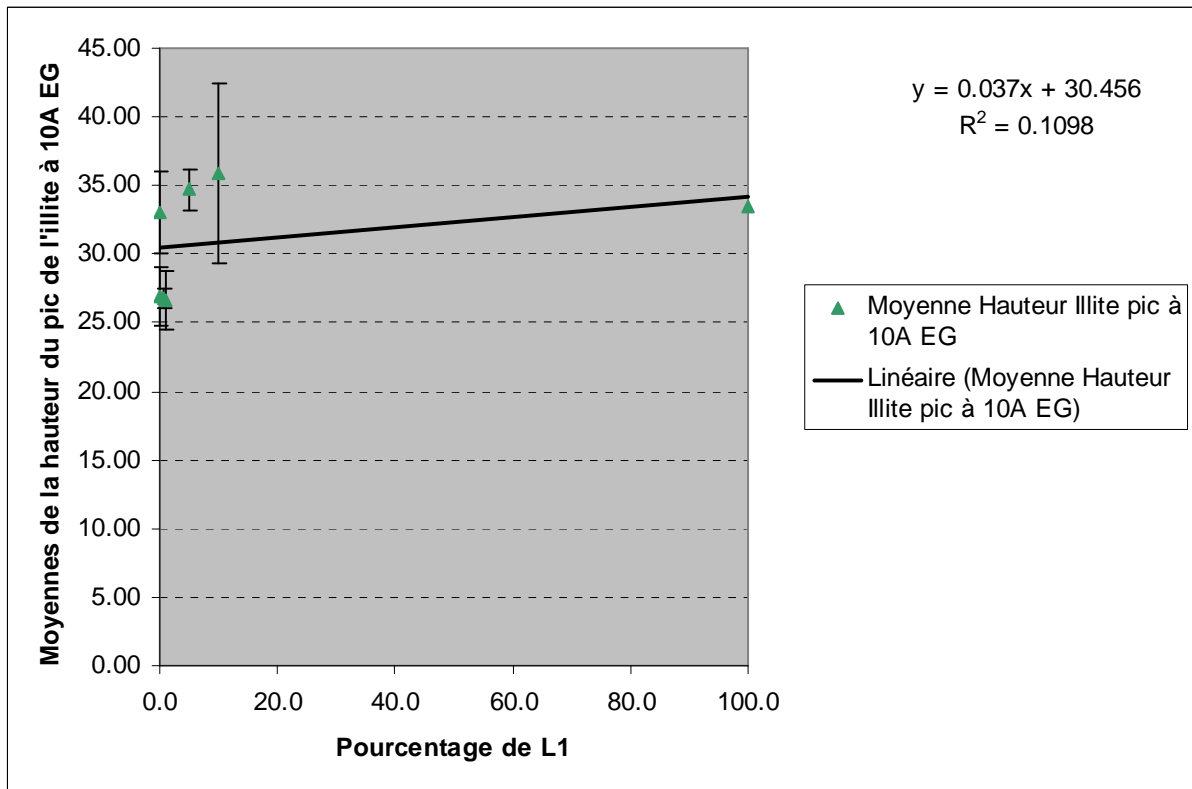


Figure 6.E : Droite de mélanges de l'illite

DETERMINATION DES PARTICULES SUSCEPTIBLES D'ETRE MOBILISEES PAR LE LESSIVAGE DES SOLS

RESUME

Le lessivage est un processus de formation des sols très répandu mais mal caractérisé et quantifié. Dans cette étude, nous avons caractérisé et quantifié la fraction mobilisable dans les sols par le lessivage à l'aide de tests de dispersion. Une caractérisation fine de la minéralogie, et de la CEC en fonction de différentes fractions granulométriques a aussi été réalisée afin de déterminer quelle fraction granulométrique était la plus mobilisable. La comparaison du test de dispersion de particules et des fractionnements granulométriques a conduit à déterminer que la fraction la plus mobilisable du sol étudié correspond à la fraction inférieure à 2 μ m.

Par la suite, des traceurs minéralogiques de l'incorporation de cette fraction dans un autre matériau lors d'une simulation expérimentale de migration de particules ont été étudiés par des tests de dopage (mélange des deux échantillons possédant une minéralogie contrastée) afin de déterminer la sensibilité de ces traceurs. Parmi les différents traceurs testés, la minéralogie par DRX (variation des apports de smectites) et la distribution granulométrique (variation des modes vers 0.4 et 1.3 μ m) sont les traceurs les plus sensibles à partir de 5% de particules illuviées. L'élaboration d'autres traceurs est nécessaire pour détecter un dépôt de particules inférieures à 5%.

Mots-clés : Lessivage, minéralogie contrastée, fraction mobilisable, test de dispersion, traceurs du lessivage, smectite, distribution granulométrique

DETERMINATION OF PARTICLES WHICH COULD BE MOBILIZED BY SOIL LESSIVAGE

ABSTRACT

Argiluviation is a common soil forming process. However, this process remains badly characterised. In this study, we characterised the soil fraction that can be mobilised by argiluviation using low energy water dispersion test on colloids (LEWDC). The different particle size fractions were also characterised in order to determine which fraction was the most mobile in soils by comparison with the LE-WDC test. We concluded that the 0-2 μ m fraction was the most mobile fraction in the studied soil.

In a second part of this work, we tested the sensibility of mineralogical tracers to detect small quantities of the 0-2 μ m fraction to be detected while it was incorporated in a material having a contrasted composition in terms of clay mineralogy. The objective was to identify tracers for argiluviation experiment conducted in labs. Thus, we mixed different quantities of the 0-2 μ m fraction of a loamy material in another loamy material and analysed the characteristics of the resulting 0-2 μ m fraction after extraction according to the Stokes law. It appeared that smectite is detectable from 5% of 0-2 μ m fraction incorporated. The particle-size distribution could be another tracer with variations also detectable from 5% of 0-2 μ m fraction incorporated. Others tracers have to be found in order to detect a supply of particles lower than 5%.

Key-words: Argiluviation, contrasted mineralogy, mobile fraction, low energy water dispersion test, tracers of argiluviation, smectite, particle-size distribution