HAL
open science

Analyse d'un processus pédogénétique par une approche expérimentale : le lessivage des argiles dans le sol

Laurence Quénard

To cite this version:

Laurence Quénard. Analyse d'un processus pédogénétique par une approche expérimentale : le lessivage des argiles dans le sol. Sciences agricoles. Université d'Orléans, 2011. Français. NNT : 2011ORLE2056 . tel-00703478

HAL Id: tel-00703478

https://theses.hal.science/tel-00703478

Submitted on 2 Jun 2012

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.

UNIVERSITÉ D'ORLÉANS

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Institut National de la Recherche Agronomique
Unité de Recherche de Science du Sol, centre d'Orléans

THÈSE

présentée par :

Laurence QUÉNARD

Soutenue le : **20 décembre 2011**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'Université d'Orléans**

Discipline : Science du sol

Analyse d'un processus pédogénétique par une approche expérimentale : le lessivage des argiles dans le sol

THÈSE dirigée par :

Sophie CORNU	Directrice de Recherche, INRA, Aix-en Provence
Isabelle COUSIN	Chargée de Recherche, INRA, Orléans

RAPPORTEURS :

Anne-Véronique AUZET	Professeur, Université de Strasbourg
Yves LUCAS	Professeur, Université du Sud Toulon-Var

JURY :

Rafaël ANGULO-JARAMILLO	Chargé de Recherche, ENTPE, Vaulx-en-Velin	Examinateur
Anne-Véronique AUZET	Professeur, Université de Strasbourg	Rapporteur
Ary BRUAND	Professeur, Université d'Orléans	Président
Laurent CANER	Maître de conférences, Université de Poitiers	Examinateur
Sophie CORNU	Directrice de Recherche, INRA, Aix-en Provence	Directrice
Isabelle COUSIN	Chargée de Recherche, INRA, Orléans	Co-directrice
Yves LUCAS	Professeur, Université du Sud Toulon-Var	Rapporteur
Anatja SAMOUËLIAN	Chargée de Recherche, INRA, Montpellier	Co-encadrante

Remerciements

Quand on en arrive à écrire ces pages, c'est plutôt bon signe et pourtant elles sont, pour moi, toutes aussi stressantes à écrire que les autres. Effectivement, toute la suite de ce manuscrit dépend de l'aide d'un grand nombre de personnes sans qui rien n'aurait été possible, il ne faut donc oublier personne. Je vais essayer ici de remercier tous ces gens, mais sachez que ces quelques lignes de suffiront jamais à vous exprimer toute ma reconnaissance pour ces trois années passées au près de vous… Le mot « merci » risque de revenir un certain nombre de fois dans ces pages mais c'est le seul mot qui me vient pour exprimer toute ma gratitude…

Je tiens tous d'abord à remercier la région Centre ainsi que l'INRA pour avoir financé ce projet. Celui-ci n'aurait pas pu voir le jour sans leur aide financière. Ensuite je remercie Guy Richard directeur de l'Unité Science du Sol de l'INRA d'Orléans au début de ma thèse. Merci de m'avoir soutenu dans ce projet et d'avoir continué à avoir un regard dessus malgré votre nomination à un autre poste. Le relais de directeur a ensuite été pris par Frédéric Darboux et Catherine Hénault, qui m'ont aidé à poursuivre ce projet dans les meilleures conditions possibles.

Je tiens ensuite à remercier les gens qui m'ont permis d'écrire ces quelques lignes de remerciements en m'autorisant tout d'abord à soutenir et ensuite en me délivrant mon diplôme. Merci à Anne Véronique Auzet et Yves Lucas pour avoir accepté de rapporter cette thèse et à Rafaël Angulo-Jaramillo, Laurent Caner et Ary Bruand pour leur participation au jury.

Viennent maintenant les remerciements aux personnes qui m'ont encadrée pendant un peu plus de trois ans, un trio de « drôle de dames » : Sophie Cornu, ma directrice, Isabelle Cousin, ma co-directrice et Anatja Samouëlian ma co-encadrante. Merci pour votre encadrement sans faille malgré les congés maternité et les mutations professionnelles (heureusement pour moi celles-ci ont eu lieu au soleil dans le sud de la France et non dans le nord…). Malgré cela vous avez toujours été présentes à mes côtés pour me conseiller, m'aiguiller mais aussi me soutenir dans les moments plus difficiles… Sans votre présence indéfectible je n'aurai jamais pu mener ce projet à bien. Même si parfois j'ai pesté d'avoir trois encadrantes surtout quand vous n'aviez pas toujours les mêmes idées (cylindre pour l'une colonne pour l'autre…), j'ai beaucoup appris auprès de vous aussi bien au niveau scientifique qu'au niveau humain. Merci Merci et encore Merci…

De grandes discussions scientifiques et constructives ont également eu lieu grâce aux membres de mon comité de pilotage à qui je voudrais exprimer toute ma gratitude. Vous m'avez été d'une grande aide pour réaliser mes choix scientifiques, et vous avez toujours partagé vos connaissances avec moi avec beaucoup d'enthousiasme et de gentillesse. Merci donc à Pierre Faivre, Bruno Lanson et Eric Michel.

Merci également à Marcel Jamagne pour les discussions précieuses que nous avons pu avoir ensemble lors de ses venues à l'INRA. Merci d'avoir partagé avec moi tes connaissances inépuisables en science du sol.

Passons maintenant « aux gros des troupes », à tous ces gens de l'ombre qui m'ont apporté la lumière pendant ces trois ans et sans qui rien n'aurait été possible.

La mise en place des expérimentations et le suivi de celles-ci pendant deux ans n'aurait pu avoir lieu sans Pierre Courtemanche (Géotrouvetout) qui a passé beaucoup de temps à réaliser des croquis des colonnes puis à bricoler tout cela. Merci également à David

Colosse qui, à peine recruté à l'INRA, m'a aidé à fabriquer des colonnes de sols et cela dans la bonne humeur malgré les difficultés et qui a continué à m'aider tout au long de ces trois ans. Le suivi a également était possible grâce à Guillaume Giot toujours présent lors de difficultés sur les expérimentations. Merci également pour les discussions que l'on a pu avoir tous les deux et pour m'avoir remonté le moral dans les moments difficiles (vive la Sologne…!!!). Pour toute la partie chimie, je tiens à remercier chaleureusement Adeline Besnault toujours présente pour faire les mesures nécessaires (Désolée de ne pas avoir répondu correctement lors de la soutenance sur la chimie, je m'en veux encore…).

Je tenais également à remercier les personnes de passage à l'INRA (CDD) qui m'ont aidée dans les expérimentations. Tout d'abord Gabriel Coelho qui après avoir fait un stage chez nous m'a apporté sont soutien pendant 2 mois puis Alexandre Roy qui pendant plus d'un an a pris en charge les expérimentations me permettant de rédiger ma thèse beaucoup plus sereinement. Merci car sans toi je ne sais pas si je m'en serais sortie. Merci également à François Estrade pour avoir, avec patience, percé des centaines de trou dans des plaques PVC.

Merci également aux responsables du simulateur de pluie Bernard Renaux puis Lionel Cottenot d'avoir répondu présent lorsque j'avais besoin de leur aide (pièce cassée, débordement de la cuve, changement de réglage…)

Une fois les pluies réalisées beaucoup d'autres personnes sont rentrées en jeu pour analyser les échantillons. Pour la minéralogie, je tiens donc à remercier Olivier Josière pour toutes les réalisations de lames et Michel Hardy pour m'avoir enseigné les bases de la minéralogie, domaine complètement inconnu pour moi au début de la thèse. Merci également à Christian Lelay pour les lames minces puis pour l'observation en microscopie, Hervé Gaillard pour les mesures de propriétés de rétention, et enfin Hocine Bourennane pour les traitements statistiques dont pour certains je ne suis pas encore sûre d'avoir tout bien compris. Merci à vous tous pour votre patience et votre gentillesse lors des moments que nous avons passés ensemble.

Je ne vais pas citer tous les gens qui sont venus avec moi sur le terrain car ils se reconnaîtront, mais je tenais à vous remercier pour les très bons moments qu'on a pu passer ensemble, mon meilleur souvenir allant à Hervé, David et une poule, mais aussi pour les moments plus difficiles et là c'est à Christian que je pense et aux parcelles inondées après une tempête surprise qui nous attendaient après plus de 2heures de route en 4x4 à traîner une mini pelle… Malgré tout, cela a toujours était fait dans la bonne humeur, ce qui m'a permis de relativiser lors de moments difficiles donc merci à vous. Merci également à Catherine Pasquier et Bertrand Ortolland pour leur aide précieuse lors de l'utilisation du GPS indispensable dans les différentes campagnes de terrain.

En plus d'avoir fait travailler tout ce monde sur Orléans, d'autres personnes beaucoup plus éloignées géographiquement m'ont apporté leur aide pour analyser les échantillons. Je tenais donc à remercier Monique Mayor de l'INRA d'Aix-en-Provence (GSE) pour avoir passé mes échantillons à l'Infra Rouge ainsi que Nathalie Dupuy, pour l'Infra Rouge et la chimiométrie, et Sandrine Amat, pour l'Infra Rouge, du laboratoire de Systèmes Chimique et Complexes de l'Université d'Aix-Marseille. Merci à vous pour votre aide.

Par la même occasion je tenais à remercier toute l'équipe de l'unité GSE d'Aix-en-Provence pour m'avoir accueillie avec beaucoup de gentillesse lors de mes différents séjours parmi vous et également la famille de Sophie, Manu, Julien et Alice de m'avoir hébergé chez eux lors de mes différentes venues.

Pour l'écriture de mon article, je tenais à remercier Dominique Arrouays, directeur de l'unité Infosol, de m'avoir permis d'accéder aux bases de données sur les sols. Un grand merci à Bertrand Laroche et José Doux de m'avoir aidée à comprendre et à traiter ces milliers de données. Sans vous je ne m'en serais jamais sortie. Bertrand merci pour ta patience et ta réactivité dès que je venais te voir. Merci également à Emmanuel Le Guirriec pour avoir réalisé des programmes de traitements de données durant des soirées entières.

Pour toute la partie recherche bibliographique, je voulais remercier Franck Rougeon et Karine Robineaud pour leur aide précieuse.

Dans une thèse il n'y pas que du scientifique d'autres personnes sont également importantes comme pour les démarches administratives où je l'avoue, je suis parfois un peu perdu. Donc merci à Magalie Marolleau, Marie-Pierre Poussineau, Monique Soler et la nouvelle recrue de cette équipe de choc, Sylvaine Parrot.

Un grand merci également aux informaticiens sans qui parfois je me serais arrachée les cheveux. Merci à Alain Couturier, Bernard Renaux, Eric Velluet, Gérald Yart et Birama Sall. Enfin merci à Sacha pour son aide dans toute la partie infographie.

Merci également à tous mes autres collègues de la carto (Science du Sol et Infosol) avec qui je n'ai pas forcément travaillé mais avec qui j'ai passé de très bons moments. Je ne vais pas tous vous citer de peur d'en oublier mais le cœur y est. Vous permettez à ce laboratoire d'être très agréable et donc de travailler dans des conditions idéales. Merci à vous tous et bonne continuation pour la suite. Pour moi, avec ces mots, une grande page se tourne puisque je suis venue pour la première fois parmi vous en 2006. Merci donc à toi Claudy Jolivet de m'avoir accepté en stage de licence et de m'avoir donné goût à la recherche, sans ce stage je n'en serais certainement pas là aujourd'hui (et ce aussi bien professionnellement que personnellement, merci).

Je tenais à remercier tous mes amis de l'INRA ou d'ailleurs qui m'ont soutenu tout au long de ces trois ans et qui doivent être contents de ne plus entendre parler de cette thèse. Tout d'abord merci à Maud et Julien pour tous les bons moments passés ensemble. Je n'oublierai jamais ce mois passé en Australie en votre compagnie. Je n'en ai que des bons souvenirs (vive Jeannie Longo !!!). J'en profite également pour faire une dédicace à votre petite Suzie, bienvenue à toi. Merci également à Larissa et Nicolas (et ouais mec… !!), Gladys, Alexis et Juliette, Marion, Baptiste, Maxime, Nelly, MP3, Arlène, Anne-Sophie, Eva, Antoine, Hao, Sung Woon… et j'en oubli certainement et enfin à tous mes amis de Romorantin pas assez souvent vus durant cette période.

Un grand merci également à ma famille qui m'a soutenue durant ces 8 longues années d'études. Promis c'est fini. Merci à mes parents qui m'ont déménagée aux 4 coins de la France et qui je crois sont contents que cela se termine. Je tenais par la même occasion à féliciter mon père qui a lu cette thèse de A à Z, bravo à toi. Merci à mes sœurs Solenne et Amélie, mes beaux frères Damien et Hubert et mes neveux Nolhann, Ewenn et Emile pour m'avoir changé les idées quand j'en avais besoin. Merci à Marie-France et Jean-Claude pour leur présence et leur soutien indéfectible depuis que je suis toute petite. Merci également à ma belle famille, même si on s'est vu moins souvent sur la fin, vous m'avez également été d'une grande aide jusqu'au bout merci donc à Denise, Christian, Laëtitia, Vincent, Elisa et Hugo. Promis cette année je pars en vacances avec vous.

Enfin merci à Julien d'avoir toujours été présent pour me soutenir tout au long de cette dure épreuve. Merci de n'avoir jamais baissé les bras et d'avoir toujours cru en moi. Sans toi je ne m'en serais jamais sortie. Merci de m'avoir aidé à prendre confiance en moi et d'être aussi fière de moi. MERCI.

Sommaire

Introduction générale 3

Chapitre 1. Le lessivage dans les Luvisols 9

Chapitre 2. Matériels, méthodes et développements méthodologiques 39

Chapitre 3. Quelles particules migrent dans les sols ? 115

Chapitre 4. Eluviation expérimentale 147

Chapitre 5. Illuviation experimentale 187

Conclusions et perspectives 223

Bibliographie 231

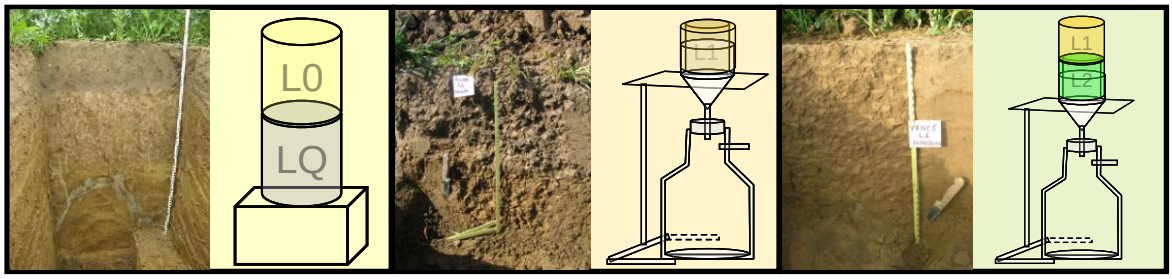
Annexe 245

Table des matières 253

Liste des figures 263

Liste des tableaux 277

Introduction générale



Les sols représentent une ressource non-renouvelable à l'échelle humaine elle est pourtant menacée par les activités anthropiques qui induisent notamment l'imperméabilisation, l'érosion, la salinisation, l'acidification, la pollution des sols, etc. Ceci a récemment été reconnu par la Commission européenne dans une communication sur la protection des sols (European Community Commission, 2002). Ainsi les sols doivent être protégés si nous voulons qu'ils continuent à accomplir leurs fonctions (croissance des plantes, approvisionnement en eau …).

Or les sols évoluent en permanence sous l'action des flux d'énergie et de matière (Chadwick et Chorover, 2001) et de variables de forçage dont les plus importantes sont les changements climatiques (Sombroek, 1990; Brinkman, 1990; Rounsevell et al., 1999) et l'action de l'homme (Bidwell et Hole, 1965 ; Yaalon et Yaron, 1966 ; Richter Jr., 2007). Ces variables de forçage agissent sur l'évolution des sols à des échelles de temps allant de 10 à 100 ans (Sombroek, 1990; Rounsevell et al., 1999; Montagne et al., 2009). Cependant, l'impact de ces variables de forçages sur l'évolution des sols à cette échelle de temps a rarement été étudié et est donc mal connu (Tugel et al., 2005; Richter, 2006).

Si nous voulons être en mesure de prévoir ces évolutions et leurs conséquences sur les fonctions des sols, nous devons donc être capables de caractériser, quantifier et modéliser les processus majeurs à l'origine de ces évolutions. Parmi ceux-ci le lessivage est un processus majeur : il s'agit de la translocation de particules fines dans les sols à partir d'un horizon dit éluvié vers un horizon d'accumulation dit illuvié. Il a été décrit dans de nombreux types de sols et dans des régions de nos jours climatiquement très contrastées. En outre, ce processus est le processus dominant à l'origine de la différenciation de la séquence des sols lessivés décrite initialement par Jamagne (1978) et Jamagne et Pédro (1981). Ces sols, développés dans des matériaux limoneux, représentent 20 % de la surface des sols d'Europe (Soil Atlas of Europe, 2005). Mondialement ils sont aussi abondamment représentés sur tous les grands dépôts de Loess, notamment en Chine et aux Etats-Unis. Ils ont généralement été décrits comme résultant de processus anciens ayant eu lieu sous des climats plus chauds et humides (Jamagne, 1978 ; Jamagne et Pédro, 1981 ; Zykina 2003).

Ce processus est généralement caractérisé :

1. par l'évolution de la granulométrie du sol avec la profondeur ;
2. par l'observation de revêtements et de cutanes à l'échelle macroscopique ou microscopique (Jamagne, 1973) ;

3. l'une ou l'autre de ces observations étant complétées éventuellement par des analyses de l'évolution de la chimie des argiles avec la profondeur (Jamagne, 1973 ; Dultz, 2000) ou des concentrations en éléments majeurs et/ou traces (Gradusov et al., 2002).

Néanmoins ce processus n'a jamais été mesuré à notre connaissance du fait de difficultés techniques évidentes et reste de ce fait assez peu connu et mal caractérisé malgré une mise en évidence assez ancienne. En effet, il est possible d'observer les traits diagnostiques décrits plus hauts et de faire des hypothèses sur le processus qui y a conduit, en l'occurrence le lessivage ; en revanche, le processus lui-même, c'est-à-dire le transfert de particules fines d'un horizon vers un autre, n'est pas accessible directement à l'observation du fait de sa dynamique très lente, de l'ordre probablement de plusieurs décennies voire plusieurs siècles. De ce fait, l'existence même du lessivage est encore sujette à débat dans la communauté scientifique. Pour Legros (2007) et Presley et al. (2004), l'accumulation de particules fines dans l'horizon sous-jacent résulterait de l'altération in situ de minéraux altérables de la roche mère. Pour Phillips (2007), la bioturbation jouerait également un rôle dans la création de profils à textures contrastées bien que, sous l'action de la macrofaune, des effets d'homogénéisation des profils ont également pu être observés par Faivre et Chamarro (1995) et Elzein et Balesdent (1995).

Ainsi, des résultats exposés précédemment dérivent les questions suivantes :

- si le transfert vertical des particules fines est un processus environnemental important, pour ce qui est des transferts de polluants vers les nappes (McCarty et Zachara, 1989 ; Rousseau, 2003), ce transfert est il pour autant responsable de la différenciation texturale des profils de sols qu'on lui attribue ?
- Si oui, ce processus est-il toujours actif sous nos climats, comme le suggèrent les travaux de Fedoroff (1997) et quel est l'impact des événements extrêmes sur ce processus ? En effet, Boulaine (1978) et Faivre et Chamarro (1995) ont démontré que des événements extrêmes, comme des orages, ont une importance majeure sur l'évolution des sols.
- Quelle est la cinétique de ce processus ? Des échelles de temps allant de la dizaine (ou la centaine) d'années à plusieurs milliers à dizaines milliers d'années se côtoient dans la littérature.

Pour répondre à ces questions, nous avons donc mis en place des expérimentations en conditions contrôlées au laboratoire pour permettre une quantification et une approche cinétique du lessivage dans les Luvisols (éluviation + illuviation, tableau 1).

Tableau 1 : Objectif des deux approches développées dans ce travail

Démarches / Objectifs	Analyses des données existantes	Expérimentation
Quantification	Le lessivage est il un processus majeur de la formation des Luvisols en France ? (1000 à 10000 ans, pédon)	Quelles sont les quantités de particules éluviées et illuviées à l'échelle d'une pluie ou de séries de pluies (quelques années, horizon)
Cinétique	Quels temps pour former un profil lessivé?	Cinétique de l'éluviation / illuviation par rapport à une série de pluies
Impact du climat	Quel impact du type de climat sur le développement des Luvisols?	Quel impact de l'intensité d'évenements extrêmes de pluie sur l'éluviation et l'illuviation?
Intéraction lessivage / structure du sol		Quel impact de l'éluviation / illuviation sur l'évolution de la structure de l'horizon?
Intéraction lessivage / fonctionnement		Quel impact du drainage sur le départ de particule? Existe-t-il des rétroactions visibles à l'échelle de la série de pluies?

Dans un premier chapitre, nous avons (1) rappelé les conditions favorables au processus de lessivage et (2) synthétisé les expérimentations de transfert de particules en laboratoire (représentant uniquement le processus d'éluviation) existant dans la littérature afin de déterminer les quantités de particules qui migrent dans les sols. Ce chapitre a en outre pour objectif d'estimer (1) l'occurrence du processus de lessivage comme processus de formation des sols, et (2) la durée du lessivage dans les sols au cours des temps pédologiques sur la base de l'analyse des profils de sols décrits dans la base de donnée des sols de France, Donesol (tableau 1). Cette analyse servira ensuite de base pour l'extrapolation des données expérimentales, acquises dans ce travail, sur des temps pédologiques.

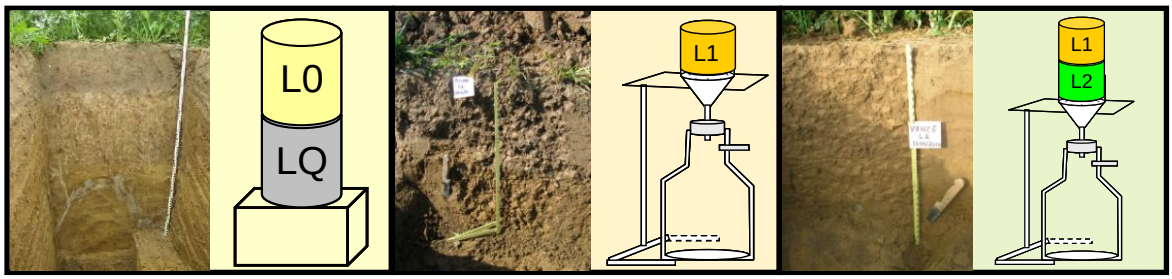
Cet état de l'art nous a également permis de penser au mieux nos différentes expérimentations et de choisir des sols avec les propriétés physico-chimiques les plus favorables au processus de lessivage. Les designs de ces expérimentations, présentés dans le chapitre 2, ont été réfléchis afin de recréer le processus d'éluviation et d'illuviation au laboratoire. En plus de cette mise au point expérimentale, il a fallu choisir et mettre au point un certain nombre de méthodes de traçage du lessivage assez sensibles pour pouvoir détecter le transfert de faibles quantités de particules. Ces choix et mises aux points sont également présentés dans le chapitre 2.

Dans le chapitre 3, nous avons déterminé la taille et la nature des particules qui migrent dans les sols sur la base notamment de tests de stabilité structurale réalisés sur des échantillons de sols secs ou humides.

Enfin, les chapitres 4 et 5 sont consacrés aux apports des expérimentations menées au laboratoire, à la connaissance des processus d'éluviation et d'illuviation respectivement.

Chapitre 1

Le lessivage dans les Luvisols



Ce chapitre fait l'objet d'un article publié dans Geoderma. Il a été remis en forme dans la thèse pour être homogène avec les autres chapitres.

Quénard, L., Samouëlian, A., Laroche, B. and Cornu, S., 2011. Lessivage as a major process of soil formation: a revisitation of existing data. Geoderma, 167-168: 135-147. doi: 10.1016/j.geoderma.2011.07.031

I. Introduction

Lessivage, also called argilluviation, consists of a substantial vertical transfer of fine particles ranging in size from less than 2 µm to 10 µm (Mercier et al., 2000, De Jonge et al., 2004) from a superficial horizon, called the eluviated horizon or E-horizon (WRB, 2006), to another horizon, called the illuviated or B-horizon (WRB, 2006). Lessivage has been described as a major or secondary pedogenetic process (Jamagne 1978; Jamagne and Pédro, 1981) for many soil types and under many climate types (table 1.1).

Lessivage is generally identified in soils by the presence of clay coatings and fillings at the macroscopic or microscopic scales (Jamagne, 1973). Nevertheless, Gunal and Ransom (2006) suggested that "clay can be oriented by two processes: illuviation and stress. (…) micromorphological interpretations are highly subjective, and researchers can estimate different amounts of illuvial clay when analysing the same thin section". The evolution of the depth distribution of different particle sizes, of the clay mineralogy (Jamagne, 1973; Dultz, 2000) or of major or trace elements (Gradusov et al., 2002) is also used to characterise lessivage.

Because of obvious technical difficulties, lessivage fluxes have never been measured. Lessivage was poorly quantified, if at all, and has rarely been modelled (Gaudet and Szenknect, 2006; Finke and Hutson, 2008).

The existence of lessivage is somewhat controversial, despite descriptions of its presence in many soil types (table 1.1). Legros (2007) argued from a theoretical point of view that lessivage does not exist, claiming that a higher content of particles less than 2 µm in the illuviated horizon results from in-situ weathering. Some fieldwork showed that other processes may be responsible for the observed textural contrast. Krull et al. (2006) dated quartz grains using luminescence and attributed different ages to the E- and B-horizons. They concluded that the observed textural contrast in Luvic Calcic Kastanozems (WRB, 2006; red-brown earth) of South Australia was due to a historical sequence of wind deposits rather than lessivage. The following processes may also contribute to the formation of a textural contrast in soils: (1) the formation of clay minerals due to the weathering of primary minerals (Presley et al., 2004); (2) biological processes such as bioturbation or plant recycling (Phillips, 2007); (3) physical processes as microdivision, elutriation/clay erosion, or sorting by freeze/thaw (Van Breemen and Buurman, 2002). However, bioturbation may also contribute to the

homogenisation of the upper horizons (Faivre and Chamarro 1995; Elzein and Balesdent, 1995).

These results show that some scientific questions about lessivage remain partly unanswered. Even though vertical particle transfer is unquestionable and has been recognised since the end of the eighties as an important environmental process for the transfer of pollutants through the vadose zone toward the groundwater table (McCarthy and Zachara, 1989), this transfer's contribution to the formation of textural differentiations in soils is unclear. Lessivage has been described as acting on a time scale ranging from tens to thousands of years (Jamagne, 1973; Finke and Hutson, 2008), which suggests that the kinetics of this process are largely unknown. While Jamagne (1973) suggested that lessivage occurs in warmer and more humid climates, Fedoroff (1997) proposed that lessivage currently occurs in temperate climates.

In this paper, we synthesised existing knowledge about lessivage and particle transfer, and we reanalysed data existing in the literature about particle transfer in soils using laboratory experiments and data from the French soil database, DoneSol (www.gissol.fr). This analysis was performed to make the following estimates: (i) the occurrence of lessivage as a major soil forming process; (ii) the quantity of particles that migrate through soils; and (iii) the duration of lessivage in soil, which must be consistent with the mass of particles accumulated in the B-horizon.

Table 1.1: WRB soil types in which lessivage occurs according to Bockheim and Gennadiyev (2000), including the importance of lessivage in these soil types, the surfaces covered and the locations of these soils along with the climates they now experience

Soil Type WRB (2006)	Importance of lessivage as a soil forming process (after Bockheim and Gennadiyev, 2000)	Surface covered in the world (WRB, 2006) and in the Europe (Soil Atlas of Europe, 2005)	Location of these soils (WRB, 2006)	Present climate (WRB, 2006)
Acrisols	Major Process	10 million km² (≈6,7%), <1% UE	Southeast Asia, Amazon basin and USA, East and West Africa	Tropical, subtropical or warm temperate
Alisols		1 million km² (<1%)	Latin America, west Indies and Africa, southeast Asia and northern Australia, Europe	Tropical, subtropical or warm temperate
Albeluvisols		3,2 million km² (≈2%), 15% UE	Europe, North and Central Asia, North America	Temperate
Luvisols		5-6 million km² (≈3,3-4%), 6% UE	Central Europe, central and west Russian Federation, east Chinese, North America, Mediterranean region, Australia, South Africa	Temperate
Lixisols		4,35 million km² (≈3%), 0%UE	Sub-Sahelian, East Africa, South and Central America, Indian Subcontinent, Southeast Asia and Australia	Tropical, subtropical or warm temperate
Solonetz		1,35 million km² (<1%), 0,5% UE	East Europe China, USA, Canada, South Africa, Argentina and Australia	Arid, semi-arid or temperate
Cryosols	May occur	18 million km² (≈12%), 2% UE	Russian Federation, Canada, China, Alaska, parts of Mongolia	Antartic, Arctic, subarctic or boreal
Cambisols		15 million km² (≈10%), 12% UE	Temperate and Boreal regions, mountain regions	Temperate, Atlantic or semi-continental

II. Conditions for lessivage: soil and climate characteristics

Lessivage is a complex process that can be broken down into the following three elementary processes: particle mobilisation, particle transport and particle deposition (i.e., flocculation and filtration). Both mobilisation and deposition are due to a complex combination of chemical and physico-chemical mechanisms, on the one hand, and to physical and mechanical mechanisms, on the other. At least some pedo-climatic conditions tend to favour lessivage. These different aspects are described below.

2.1- Impact of chemical and physico-chemical mechanisms on particle mobilisation and deposition

The mobilisation and flocculation of particles in soil are functions of the nature of the particles and of the interactions among them, which depend on both the nature of the exchangeable cations on their surfaces and the presence of cements such as organic matter.
Seta and Karathanasis (1996 and 1997) demonstrated the effect of mineralogical composition on colloid transport. Mobilisation is facilitated when the surface charge of the colloids is high (Goldbergs et al., 1990). Soils that are rich in smectite (clay 2:1) disperse better than those that are rich in interstratified clay minerals, which in turn disperse better than those rich in kaolinite (clay 1:1), illite or quartz (Jamagne, 1978; Jamagne and Pedro, 1981; Duchaufour, 1983; Seta and Karathanasis, 1996 and 1997; Mercier et al., 2000; Rousseau et al., 2004). Polyvalent cations cause flocculation, and monovalent cations cause dispersion (Gal et al., 1984; Le Bissonnais, 1996). The nature of the exchangeable cations and, subsequently, particle mobilisation vary according to soil pH. Clay flocculates at pH values below 5 because of a high aluminium (Al^{3+}) concentration in the soil solution (WRB, 2006). Clay flocculates at pH values higher than 6.5 because of a high concentration of calcium (Ca^{2+}) or other divalent cations in the solution. When there is a strong dominance of Na^{+} ions on the exchange surface, colloids tend to disperse (Robert and Tessier, 1974; Duchaufour, 1983; Gal et al., 1984; Soil Survey Staff, 1999; WRB, 2006), and lessivage occurs despite a high pH. Consequently, eluviation occurs mainly when pH values range between 4.5 (Soil Survey Staff, 1999) or 5 (Duchaufour, 1956) and 6.5, except in saline soils. In saline soils, particle mobilisation may be reduced by a high ionic strength, which tends to flocculate particles (Gal

et al., 1984; Miller et al., 1990; Levy et al., 1993; Kaplan et al., 1997). Eluviation occurs when the pH ranges from 4 or 5 to 6.5. Conversely, illuviation occurs when the pH is higher than 6.5.

Organic matter and other soil cements such as iron, manganese, silicon and aluminium oxides reduce soil dispersibility by binding soil particles (Duchaufour, 1983; Le Bissonnais and Arrouays, 1997). Interactions between clay minerals and organic matter are known to play a key role in flocculation (Le Bissonnais and Arrouays, 1997; Chenu et al., 2000). These interactions increase aggregates' cohesion and hydrophobicity (Chenu et al., 2000) and therefore increase soil stability while decreasing mobilisation.

2.2- Impact of physical and mechanical mechanisms on particle mobilisation and deposition

Mechanical stresses such as wetting/drying cycles (Kaplan et al., 1993), freezing/thawing cycles (Worrall et al., 1999) and moving water impose shear stress; all these processes act on soil particle mobilisation (Ryan et al., 1998; Shang et al., 2008). Experiments conducted by Kjaergaard et al. (2004b) and Majdalani et al. (2008) showed that the rate of mobilisation is related to the drying intensity i.e. the initial water content. Majdalani et al. (2008) measured particle mobilisation. This mobilisation increases and reaches a maximum with a drying pause that lasts up to 150-200 h, before decreasing for a longer pause (up to 70 days). No measurement of matric potential is related to these measurements, but this dynamic is in agreement with the experiment conducted by Kjaergaard et al. (2004b) that shows a higher particle mobilisation for an initial matric potential near field capacity (-100 hPa) than for an initial condition near the crop welting point (-15500 hPa). These results support the hypothesis that particle mobilisation is related to capillary stresses. In the driest conditions, the particles are strongly associated with enabling the development of Van der Waals forces (Sirivithayapakorn and Keller, 2003). At the soil surface, the mechanical action of raindrops causes the mobilisation of particles (Le Bissonnais, 1988). Faivre (1988) showed that violent rainstorms govern lessivage in soils because heavy rain destroys the aggregates at the soil surface, mobilising particles that are then transported by percolating water.

The filtration process is described as occurring when particles are small enough to enter porous media and are transported and deposited within it (Mc Gechan and Lewis, 2002). Two processes can occur: i) the mechanical filtration of large particles in the matrix, which certain

authors classify as straining (Wan and Tokunaga, 1997), or ii) the physicochemical filtration of small particles through molecular forces. Mechanical filtration, or capture by straining, occurs when a particle is physically larger than a pore or a pore restriction (McGechan, 2002). Physicochemical filtration depends on the chemical and physical characteristics of the particles and the solid interface as well as on the chemical soil solution (Vinten and Nye 1985; Kretzschmar et al., 1997; DeNovio et al., 2004). Moreover, in the vadose zone, the air-water interface can retain the particle by either capillary or electrostatic forces (DeNovio et al., 2004).

2.3- Pedo-climatic conditions that favour lessivage

Field studies have shown that greater particle transport coincides with increasing water flux (Ryan et al., 1998; El-Farhan et al., 2000; Petersen et al., 2003). Humid weather and mild temperatures also favour the downward transport of particles (Le Bissonnais et al., 1989; Legros, 2007; Mathieu, 2009). Lessivage occurs for annual effective rainfall (precipitation minus evapotranspiration) higher than 150 mm to 200 mm and increases significantly for annual effective rainfall higher than 400 mm (Arkley, 1967). In Europe, this results in an increase in lessivage intensity from the eastern continental regions to the western regions, which experience an Atlantic climate (Duchaufour, 1983; Soil Atlas of Europe, 2005).

Because lessivage is governed by the vertical flux of water (Jamagne et Pedro, 1981; WRB, 2006), soil conditions that favour vertical fluxes will favour lessivage. Therefore, lessivage occurs mainly along planar or sub-planar surfaces (plateaus or terraces) (WRB, 2006), filtering unconsolidated material that is generally of loamy or sandy loamy texture and contains fractions of particles smaller than 2 µm (called hereafter lutum, Stichting voor Bodemkartering, 1965) that range from 7.5 % to 30 % (Duchaufour, 1983). Aeolian, alluvial and colluvial deposits and glacial till fulfil these conditions (WRB, 2006).

III. Occurrence of lessivage in France based on the analysis of soil profiles from the French soil database, DoneSol.

3.1- Characteristics of soils developed by lessivage (DoneSol)

Lessivage is the main pedogenetic process of four different soil types, namely Acrisols, Alisols, Luvisols, Solonetz and Lixisols (table 1.1). Only Luviols and Albeluvisols (a subsequent developmental stage of the evolution of Luvisols (Jamagne, 1978)) are present in Europe. They represent 6 % and 15 %, respectively, of European soils (Soil Atlas of Europe, 2005). We restricted our study to these types of soils. Luvisols and Albeluvisols are characterised by the presence of an argic horizon, a base saturation higher than 50 % and a CEC higher than 24 $cmol^{+}$ kg^{-1} in the lutum fraction (WRB, 2006). Albeluvisols differ from Luvisols in the presence of 'albeluvic tonguing' (WRB, 2006).

The argic B-horizon is defined by the index of textural differentiation (ITD), or the difference in lutum content between the eluvial E-horizon and the illuvial B-horizon. If the lutum content in the E-horizon is lower than 15 %, this contrast must be greater than 3 % (lutum in B > lutum in E + 3 %). The ratio of lutum content in the two horizons (B/E) must be larger than 1.2 if the lutum content in the E-horizon is between 15 % and 40 %. The ITD must be larger than 8 % if the lutum content in the E-horizon is greater than 40 % (WRB, 2006).

3.1.1 Luvisols and Albeluvisols in France: the French soil database, DoneSol

DoneSol contains the entirety of the pedological profiles studied in France (www.gissol.fr). It includes the location of each described soil profile, its pedological description and classical pedological analyses such as pH, particle size distribution, CEC and exchangeable cations.

Although this database comprises 31,888 profiles from all over France, it contains no profiles from some areas (figure 1.1A) due to a lack of pedological studies and/or a delay in including existing data.

Among the 31,888 soil profiles in DoneSol, 2034 (6.4 %) consist of Luvisols and Albeluvisols (figure 1.1B). According to the French soil map (INRA, 1998), Luvisols and Albeluvisols are spread over three main domains and represent more than 60 % of SMU (Soil Mapping Units, INRA, 1998). The largest domain spreads from the Paris Basin to the North of France and is part of the Northern Europe domain of Luvisols (Atlas of Europe, 2005).

The two smaller domains are found in Aquitaine and in the Rhone Valley (figure 1.1B). These large domains also include places in which Luvisols and Albeluvisols represent only 20 % to 60 % of the encountered SMUs (figure 1.1B). Among the 2034 soil profiles identified as Luvisols and Albeluvisols in the DoneSol database, 1021 are located in these domains, and 587 profiles are located in zones where Luvisols and Albeluvisols represent less than 3 % of SMUs. This number (587) is relatively high compared to the total number of Luvisol and Albeluvisol profiles recorded in DoneSol. This discrepancy is due to the small size of the map scale (1/1000000), which is not sufficiently precise for the database's detailed sampling. However, no complete soil map of France currently exists at a more appropriate scale, such as 1/250000. The 1/1000000 soil map was used here because it represents the main soil distribution pattern.

Profiles gathered in DoneSol under-represent Luvisols and Albeluvisols from the North of France because those data have not yet been included in the database (figure 1.1A).

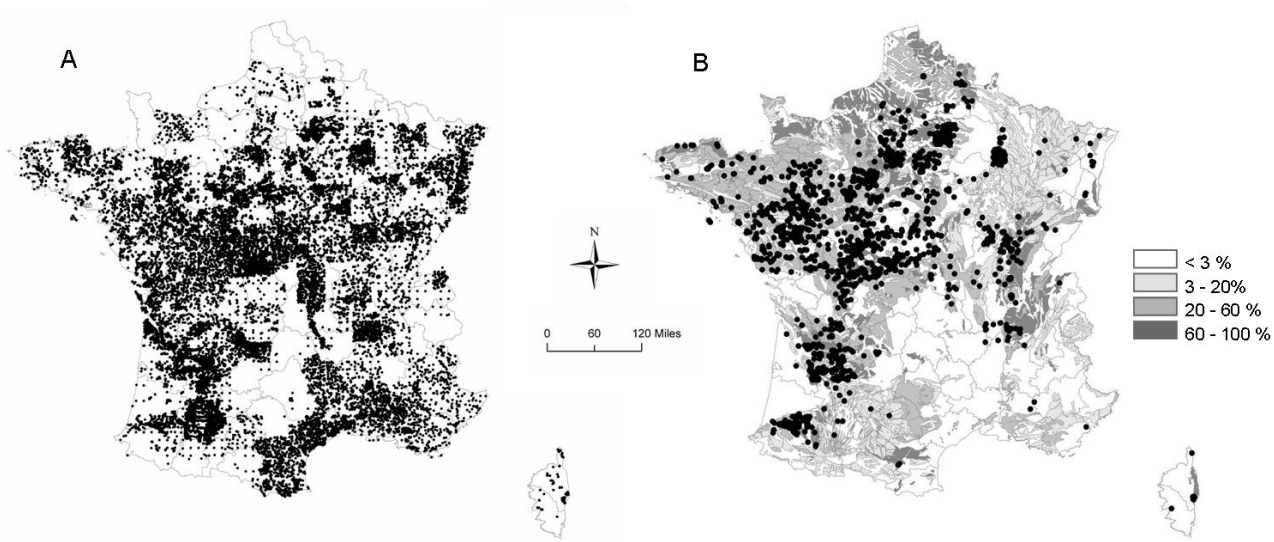


Figure 1.1: Sampling location of A) all of the soil profiles gathered in the DoneSol Database and B) all of the Luvisol and Albeluvisol profiles gathered in DoneSol. In the grey levels, the frequency of Luvisols and Albeluvisols in SMUs is derived from the French soil map (INRA, 1998)

3.1.2 Characteristics of Luvisols and Albeluvisols in France

The index of textural differentiation (ITD) that reflects the impact of past processes including lessivage on soil formation was derived from textural data available in DoneSol for Luvisol and Albeluvisol soil profiles. The ITD meets conditions characteristic of argic horizon

development in 96 % of cases (lutum E < 15 %: 98 %, 15 % < lutum E > 40 %: 92 % and lutum E > 40 %: 67 %) (figure 1.2); this represents 1946 of the 2034 available profiles.

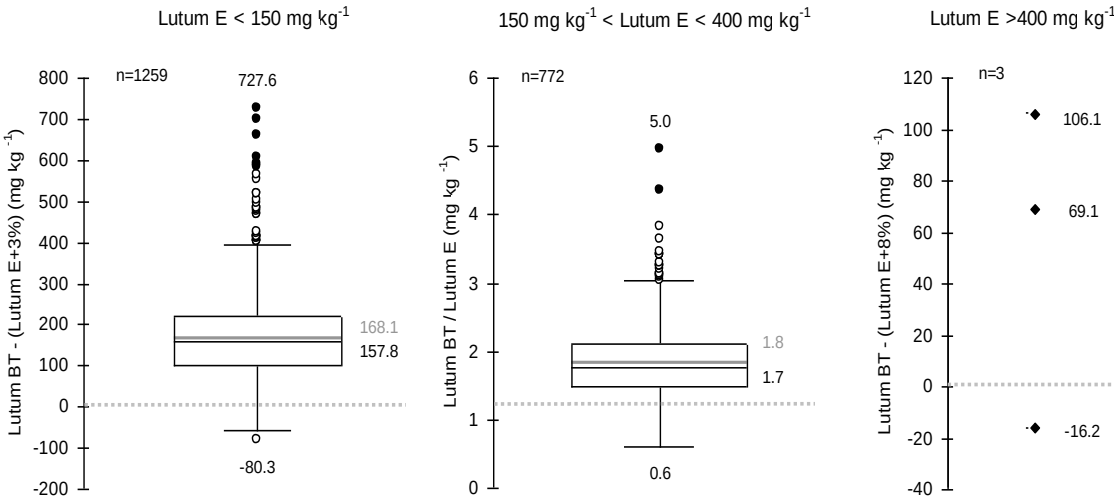


Figure 1.2: Box Plot of the index of textural differentiation of the Luvisol and Albeluvisol sola. The box represents the upper and lower quartiles, with the median (in black with the associated value), the average (in grey), the smallest and highest values (open circles) and outliers (closed circles)

To examine the likelihood that lessivage is currently occurring, we also considered pH. In about 40 % of cases (figure 1.3), the pH values of Luvisols and Albeluvisols with argic horizons are currently favourable for lessivage, i.e., the values range from 5 to 6.5 in the E-horizon and are higher than 6.5 in the B-horizon (as discussed in section 1.1).

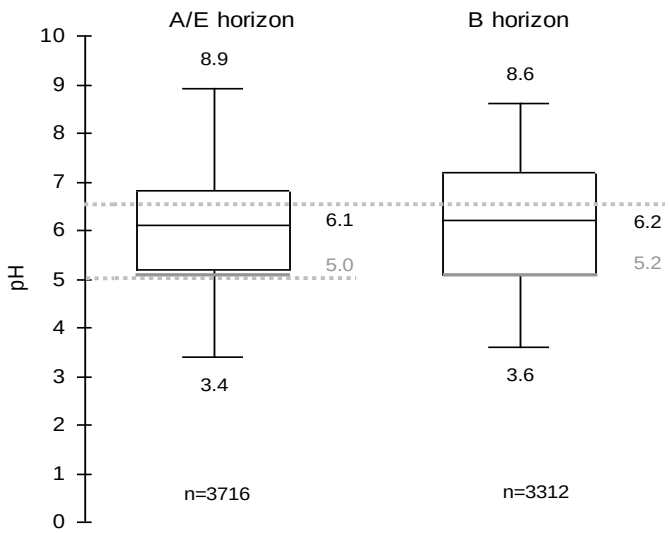


Figure 1.3: Box Plot of the pH of the A/E- and B-horizons for the Luvisol and Albeluvisol sola. The box represents the upper and lower quartiles with the median (in black with the associated value) and the average (in grey). The number of pH values is higher than the number of soil profiles, as several A/E- or/and B-horizons may be described in a single soil profile

In the remaining profiles, the pH of the E-horizon is higher than 6.5 in 35 % of cases and is lower than 5.5 in 20 % of cases. This can be explained by an evolution of pH over time due to either liming in cultivated soils or acidification by vegetation in forested and permanent grass cover areas, where soils are rarely limed (Temminghoff et al., 1998). Under these two sets of conditions, lessivage is probably no longer an active process. Lessivage may still be active for 40 % of Luvisols, as Fedoroff (1997) suggests in the case of red Mediterranean soils.

3.2- Mass balance approach

3.2.1 Principle

As discussed in the introduction, the following hypotheses may explain a textural contrast in soils: bioturbation, contrasted parent material, in situ weathering and lessivage. The contrasted parent material and lessivage hypotheses can be tested with calculations performed on soil texture profiles available from DoneSol.

The distribution of the coarse soil fractions, i.e., coarse silt (CSi), fine sand (FSa) and coarse sand (CSa), does not evolve through pedogenesis unless the fractions are comprised of highly weathered minerals such as carbonate or glaucony. Conversely, lutum and fine silt (FSi) distributions evolve due to lessivage. Based on this assumption, we calculated the following ratios: CSi/(CSi + FSa + CSa); FSa/(CSi + FSa + CSa); and CSa/(CSi + FSa + CSa). These ratios should not vary significantly along the A-, E- and B-horizons if these horizons develop from the same parent material and the considered soil profiles do not contain carbonates or other easily weathered minerals (figure 1.4). We considered three thresholds (± 20 %, 25 % and 30 %) to test the sensitivity of our calculations.

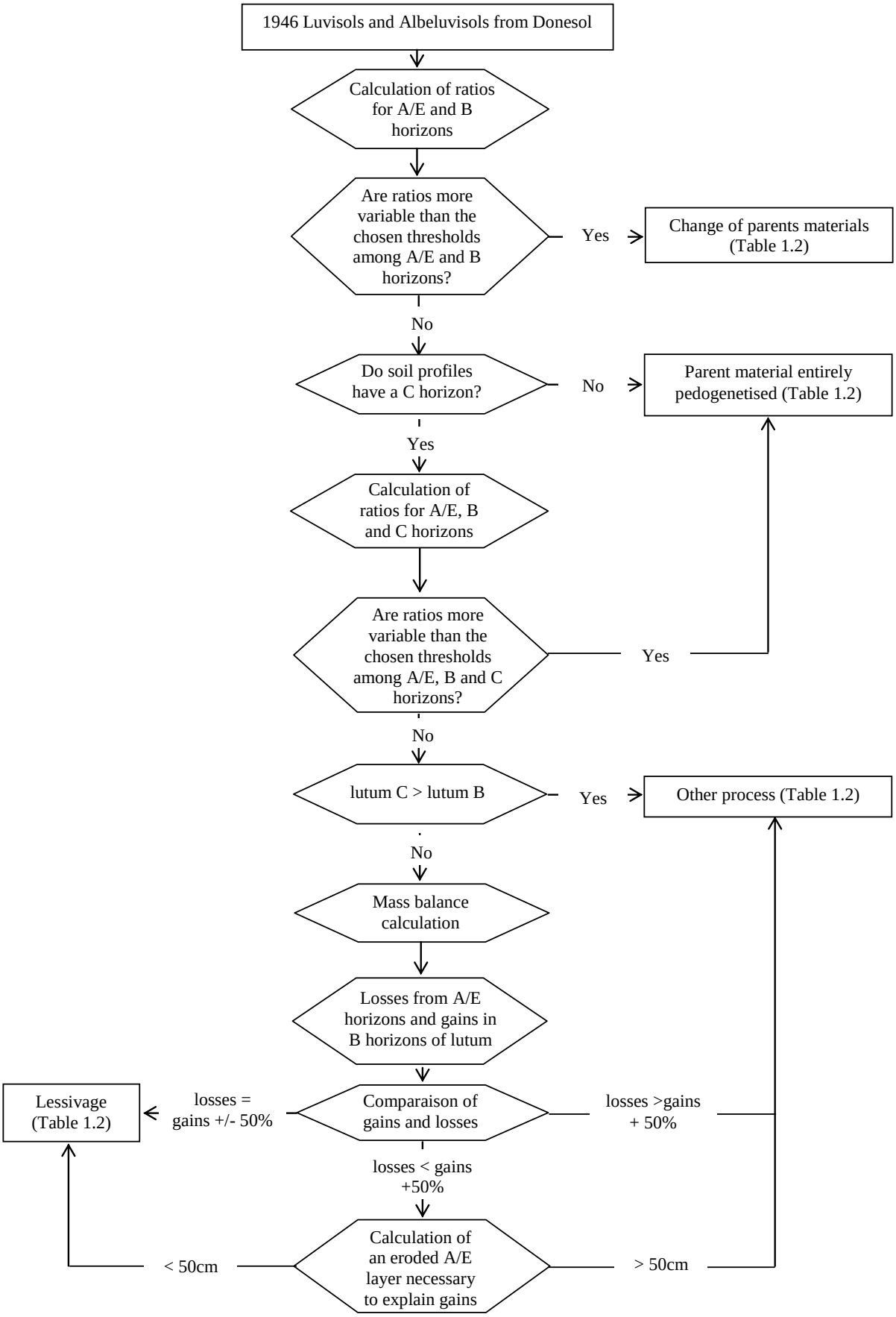


Figure 1.4: Flow sheet of the approach performed to determine whether lessivage was the dominant soil forming process for the 1946 Luvisol and Albeluvisol profiles selected from DoneSol

A mass balance calculation allows us to estimate the amount of lutum lost by the A/E-horizons and gained by the B-horizon when the soil profile develops from a single parent material. Through a comparison of gains and losses, we can consider the possibility of the soil profile being developed by lessivage. Losses from the A/E-horizons and gains in the B-horizon were calculated based on the Brimhall approach (Brimhall et al., 1991):

$$m_{j,flux}/V_p = (\varepsilon_{i,w}+1)\rho_w C_{j,w}/100 - \rho_{j,p}C_{j,p}/100$$

with $\varepsilon_{i,w} = (V_w - V_p)/V_p$

where ρ is the apparent bulk density in g cm^{-3}, V is the volume of material considered in cm^3, and C is the lutum concentration in mg g^{-1}. The subscripts i and j refer to an immobile and a mobile element, respectively. The subscripts p and w refer to the parent materials, which are the C-horizon and either the A/E- or B-horizons, respectively.

The volumetric strain, $\varepsilon_{i,w}$, represents volumetric changes that occur over time due to structure collapse or expansion (Brimhall et al., 1991). In the case of an invariant element, i, the losses or gains are null ($m_{i,flux}/V_p = 0$), and $\varepsilon_{i,w} = (V_w - V_p)/V_p = \rho_{i,p}C_{i,p}/\rho_{i,w}C_{i,w} - 1$ can be calculated. We considered quartz an invariant mineral, and its abundance was approximated using the sand content. This assumption is valid when the sand fractions consist mainly of quartz, which occurs mostly in non-calcareous sedimentary rocks. When this assumption could not be made, we assumed that $V_w = V_p$, and therefore $\varepsilon_{i,w} = 0$.

This calculation also requires the bulk density values of the different horizons. These data are rarely available in the DoneSol database. When unavailable, the bulk density was assumed to range from 1.3 to 1.45 for the A/E-horizons (I. Cousin, pers. comm.), from 1.48 to 1.61 with a median of 1.54 for the B-horizon, and from 1.53 to 1.65 with a median of 1.58 for the C-horizon (figure 1.4). Mass balance calculations were performed considering these variations in bulk density ranges, i.e., by calculating gains and losses not only for the median bulk density value but also for the maximum and the minimum values.

This approach was performed on the 1946 Luvisol and Albeluvisol profiles selected from DoneSol (figure 1.5).

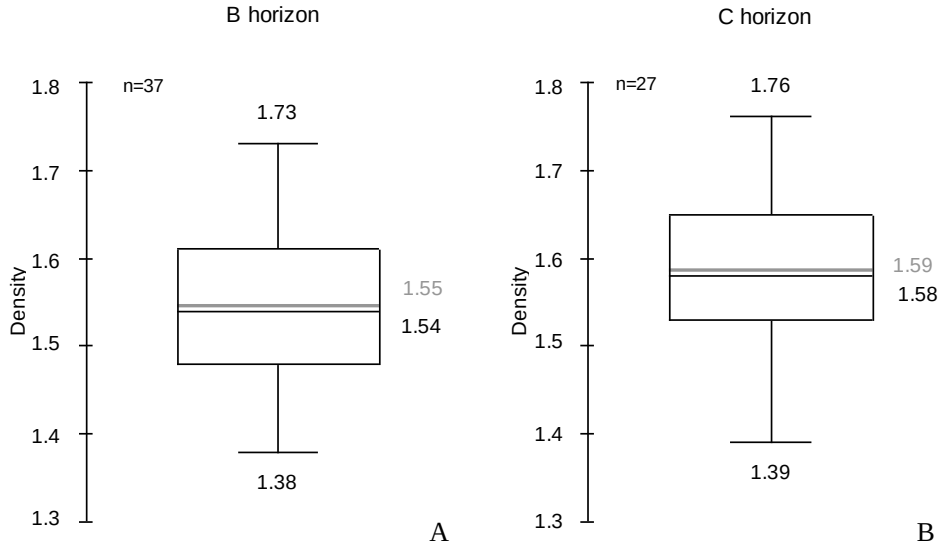


Figure 1.5: Box plot of the bulk densities of B-horizons (A) and C-horizons (B). The 1st and 3rd quartiles were considered as the minimum and maximum bulk densities, respectively. Data are from the Solhydro database that was compiled at the Unité de Science du Sol, INRA (France), and today, it includes about 700 measurements of the gravimetric water content of different types of soils. The box represents the upper and lower quartiles with the median (in black with the associated value) and the average (in grey)

3.2.2 Results

The results obtained are fairly similar regardless of the threshold level used to calculate the CSi, FSa and CSa ratios (20 %, 25 % or 30 %) and therefore demonstrate the strength of the approach. Among these 1946 soil profiles, in 40 % to 60 % of the cases, the CSi, FSa and CSa ratios vary more than the thresholds between the A/E- and B-horizons regardless of the chosen value; this provides evidence for a change in parent material across the profile. For these soil profiles, lessivage is probably not the cause of the textural contrast within the solum (table 1.2).

Mass balance calculations show that Luvisols and Albeluvisols have gains equal to losses (+/-50 %) in about 1 % of the profiles; thus, they were probably formed by lessivage. Additionally, in 0.1 % to 0.5 % of cases, gains were superior to the losses, with differences explained by partial erosion of less than 50 cm. Such an erosion height is compatible with the literature (Verheijen et al., 2009; Cerdan et al., 2010). We therefore considered lessivage responsible for the formation of 0.8 % to 1.6 % of the considered profiles (table 1.2). In 4.2 % to 7.5 % of cases, the contrast in texture between the A/E- and the B-horizons probably

resulted from processes other than lessivage. The following three cases are encountered (table 1.2): (1) the lutum concentration of the C-horizon is greater than the lutum concentration of the B-horizon; (2) the losses are superior to the gains, meaning that the soil profiles mainly experience eluviation; (3) the gains are superior to the losses, with an erosion height larger than 50 cm; or (4) the lutum concentration of the A/E-horizon is higher than that of the C-horizon. In this last case, the erosion of agricultural land could be responsible for the mixing of part of the B-horizon into the remaining A/E-horizon by ploughing and, subsequently, the latter horizon's higher lutum concentration. Therefore, in that case, lessivage cannot completely be ruled out. However, this represents less than 0.5 % of cases.

The parent material was entirely pedogenetised in 40 % to 50 % of the cases (table 1.2). No firm conclusion could be derived from these profiles. However, if we hypothesise that lessivage and other processes occur in these soils in the same proportion as in soils in which the parent material is still present, lessivage is the major soil forming process in 7 % to 12 % of cases.

In conclusion, 0.8 % to 1.6 % of the 1946 Luvisol and Albeluvisol profiles, respectively, were formed by lessivage. Accounting for the profiles in which the parent material is entirely pedogenetised, the percentage of profiles in which lessivage is a major process ranges from 7 % to 12 %. We can therefore conclude that the lessivage process is dominant in 1 % to 12 % of cases. Based on this analysis, we demonstrated that lessivage, which is usually considered a major soil forming process, is not as common as described in the literature.

Table 1.2: Dominant soil forming processes for the 1946 Luvisols and Albeluvisols selected from DoneSol, identified using the approach described in figure 5 (see above)

	Threshold level used for calculation of the ratios		
	20%	25%	30%
Change of parent material	1120	934	783
Profil number with parent material entirely pedogenetised	729	870	985
Other process [a]	81 (666)	118 (811)	147 (924)
- Lutum C ≥ lutum B [a]	59 (485)	86 (591)	105 (660)
- Eluviation (%) [a]	9 (74)	14 (96)	22 (138)
- Erosion > 50cm (%) [a]	8 (66)	11 (76)	12 (76)
- Lutum A/E > lutum C [a]	5 (41)	7 (48)	8 (50)
Possible lessivage [a]	16 (160)	24 (201)	31 (239)

[a] *Numbers under brackets are calculated considering that the profiles in which the parent material is entirely pedogenetised are affected by the different pedological processes in the same proportion as the soils in which the parent material is still present.*

IV. Is the amount of vertical transfer of particles in soils sufficient to explain soil formation over pedological time?

4.1- Determining the quantities of particles lost by soil during laboratory experiments described in the literature

Although we know of no experiments studying lessivage, scientists studying colloid transfer in soils performed column experiments that were indicative of the quantity and fluxes of particles that may migrate in soils. These experiments simulated eluviation. Only 7 of these studies, which summarise 119 different experiments, could be found in the literature (Jacobsen et al., 1997; Schelde et al., 2002; Kjaergaard et al., 2004 a and b; Laegdsmand et al., 2005; Zhuang et al., 2007; Shang et al., 2008 and Sharma et al., 2008). In these studies, average particle concentrations at the outlet of the soil column ranged from 0.3 mg L^{-1} to 263.2 mg L^{-1}, with peak concentrations ranging from 0.9 mg L^{-1} to 1200 mg L^{-1}. This wide range of variations was due to both the experimental settings (lower boundary condition, soil structure and column height) and to the natural conditions tested (pH, lutum concentration and rainfall intensity) in the experiments (table 1.3). Indeed, both the experimental settings and the natural conditions tested varied widely among studies, with column height ranging from 3 cm to 60 cm, rainfall intensity from 1 mm h^{-1} to 172.8 mm h^{-1}, soil pH from 5.89 to 8.9 and lutum concentrations from 2 % to 42.8 % (table 1.3).

To determine the impact of the experimental settings on the quantity of particle transfer recorded in the column experiments, the experiments were grouped into homogeneous classes consisting of each type of experimental setting and natural condition (table 1.3). Most of the experiments were performed on soil with pH values higher than 6.5 and lutum contents lower than 7.5 % (table 1.3). Despite the unfavourable conditions for lessivage (table 1.3), we used these experiments to discuss the impact of experimental settings on the quantities of particles lost from the column and thus to draw conclusions about these quantities in natural soils. The impact of natural conditions is also discussed using these results.

Table 1.3: Distribution of the 119 column experiments according to the different experimental settings and natural conditions used. A) Column height varied from 3 cm to 60 cm and was grouped into the following 3 classes of heights: (1) small, which includes columns less than 10 cm height, (2) medium, which includes columns ranging from 20 cm to 30 cm and, (3) large, which includes columns taller than 50 cm. B) Classes of pH were defined according to the method described in the first part of this paper. C) Classes of lutum were based on texture classes (%) (Jamagne, 1967). D) Seven rainfall classes were based on a typology of rain events. Condition settings, for which experiments were performed in the literature, were greyed. Crosses represent the conditions favourable to lessivage (no experiment). Numbers represent the number of experiments performed under each set of conditions

		lower boudary structure	Suction						Free drainage						
			Distrubed			Undisturbed			Disturbed			Undisurbed			
		height of column	small	medium	large	small	medium	large	small	medium	large	small	medium	large	
pH	Lutum (%)	intensity (mm h^{-1})		(a)											
5. 5<pH< 6.5 (b)	30 - 45 (c)	1													
		4-6													
		10-12													
		21-30													
		42-44													
		85-94													
		170-173													
	17.5 - 30	1													n= 7
		4-6													
		10-12	5									1			
		21-30										1			
		42-44													
		85-94													
		170-173													
	7.5 - 17.5	1													n= 20
		4-6													
		10-12	5									14			
		21-30										1			
		42-44													
		85-94													
		170-173													
	<7.5	1													
		4-6													
		10-12													
		21-30													
		42-44													
		85-94													
		170-173 (d)													
pH> 6.5 (b)	30 - 45 (c)	1				6									n= 6
		4-6													
		10-12													
		21-30													
		42-44													
		85-94													
		170-173													
	17.5 - 30	1				9									n= 9
		4-6													
		10-12													
		21-30													
		42-44													
		85-94													
		170-173													
	7.5 - 17.5	1				3									n= 3
		4-6													
		10-12													
		21-30													
		42-44													
		85-94													
		170-173													
	<7.5	1													n= 74
		4-6			9										
		10-12	1	3		1			1			1			
		21-30	1	4					1						
		42-44	7	5					7						
		85-94	1	6	14				1						
		170-173 (d)	1	7		1			1			1			

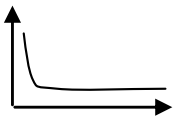
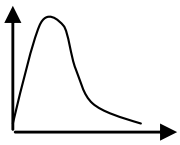
4.1.1 Impact of the experimental setting on the transferred particles

The following three main experimental characteristics were considered: the lower boundary condition, the structure of the soil and the height of the column.

It is not possible to draw a conclusion about the impact of soil structure (disturbed versus undisturbed) on the quantity of particles that migrate through the soil because not enough experiments that differ only by soil structure type have been conducted.

Concerning the lower boundary condition, Sharma et al. (2008) showed that columns with free drainage release more particles than columns with suction applied at the base. They also showed that the lower boundary condition influences the shape of the particle breakthrough curve at the outlet of the column. The main difference is recorded at the beginning of the experiment, when the concentration of particles is the highest. We could not use other experiments to confirm Sharma's findings about the lower boundary condition's effect on the quantity of particles exported from the column because too many parameters varied among the studies. Nevertheless, other studies confirmed that regardless of other experimental conditions, the difference in the shape of the particle breakthrough curves was a function of the lower boundary condition (table 1.4).

Table 1.4: Shape of the particle breakthrough curves as a function of the lower boundary condition

Boundary condition	Particule breakthrough curves	Authors
Free drainage		Zhuang et al (2007) Jacobsen et al (1997) Schelde et al (2002) Sharma et al (2008)
Suction		Kjaergaard et al (2004a) Laegdsmand et al (2005) Shang et al (2008) Sharma et al (2008)

The height of the column impacts the particle concentration such that the smaller the column, the higher the concentration of particles at the column outlet (figure 1.6). The results of studies that used very small columns should not be considered because they overestimate the quantity of particles that migrate in soils.

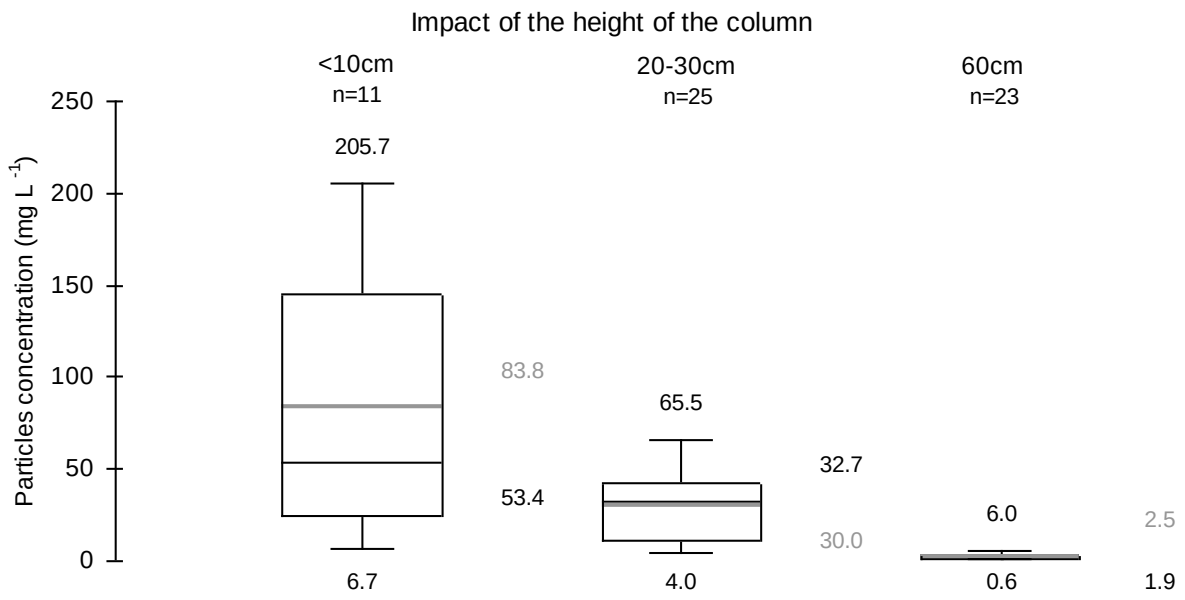


Figure 1.6: Particle concentration in drainage water as a function of column height, all other experimental conditions being kept constant. The analysed results are from studies by Zhuang et al. (2007), Shang et al. (2008) and Sharma et al. (2008). The box represents the upper and lower quartiles with the median (in black with the associated value) and the average (in grey)

4.1.2 Impact of environmental conditions on the particles transferred

Only the impact of the lutum content and rainfall intensity could be considered. Although pH is an important variable in the study of lessivage, most experiments were performed at the same pH class (>6.5).

A higher concentration of particles is found at the outlet of the column when the percentage of lutum is smaller (figure 1.7). Because soil textures that are favourable to lessivage are loamy to sandy loamy, soils with a lutum content lower than 7.5 % are unfavourable to lessivage. Therefore, results obtained for soils having less than 7.5 % lutum should not be further considered so as not to overestimate the quantity of particles transferred. Conversely, lessivage occurs mainly for soils that are less than 30 % lutum. Results obtained from experiments with more than 30 % lutum should also not be considered so that the quantity of transferred particles is not underestimated.

Shang et al. (2008) showed that the higher the rainfall intensity, the larger the concentration of particles at the outlet of the column. This result confirms the hypothesis of Faivre and Chamarro (1995) regarding the importance of extreme rainfall events on lessivage.

Luvisols are largely located in regions now experiencing a temperate climate. However,

Jamagne (1973) suggested that lessivage once occurred under more humid climate conditions but no longer occurs. Conversely, Federoff (1997) described lessivage as still active in red Mediterranean soils. Depending on the climate, the quantity of particles that is transferred will differ in soils as a function of rainfall intensity.

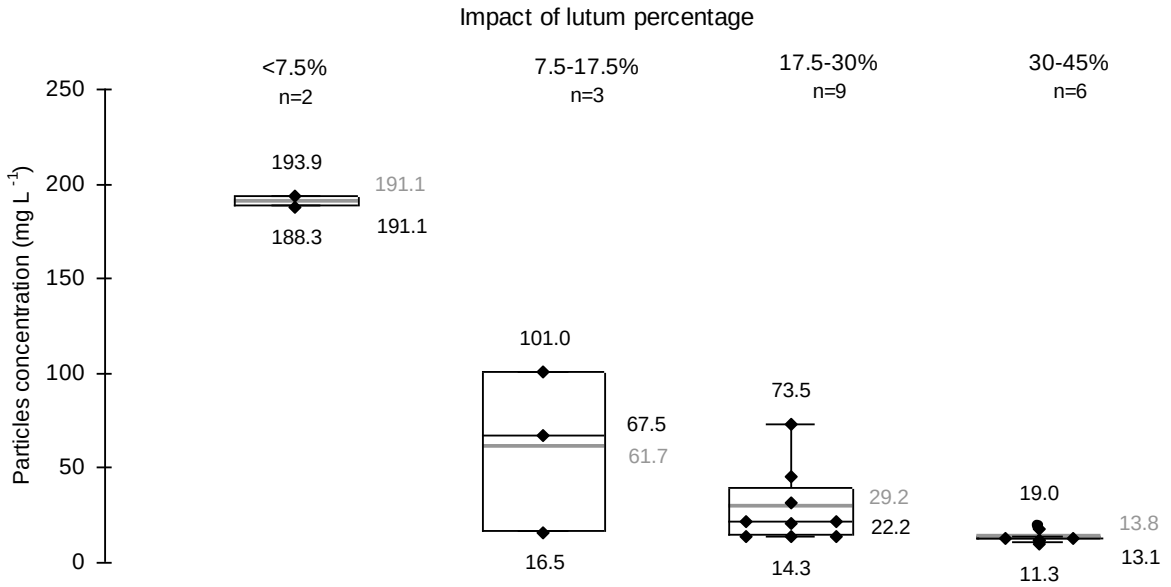


Figure 1.7: Box plot of particle concentration as a function of soil lutum content. The analysed results are from studies by Sharma et al. (2008) and Kjaergaard et al. (2004b). The box represents the upper and lower quartiles with the median (in black with the associated value) and the average (in grey)

Particle concentrations obtained from all the column experiments existing in the literature ranged from 0.3 mg L^{-1} to 263.2 mg L^{-1}. However, we concluded that both the free drainage and the very small column used in the experiments induced artefacts by increasing particle concentrations in the water exiting the soil columns. When we excluded the experiments with free drainage, the particle concentration range fell from 0.3 mg L^{-1} to 203.2 mg L^{-1}. Excluding very small columns further reduced this range to 0.3 mg L^{-1} to 65.5 mg L^{-1} (figure 1.8).

Although the experiment was performed with soil conditions unfavourable to lessivage, in the rest of the paper, we considered a particle concentration in soil water ranging from 0.3 mg L^{-1} to 65.5 mg L^{-1} is similar to the particle concentration range occurring in nature (figure 1.8).

Climatic records for Belgium over the last 15000 years are provided by Finke and Hutson (2008). Based on these records, we considered the quantity of particles transferred in experiments with rainfall intensities ranging from 1 mm h^{-1} to 44 mm h^{-1} representative of transfers that occurred in the past (i.e., 1.2 to 44 mg L^{-1}).

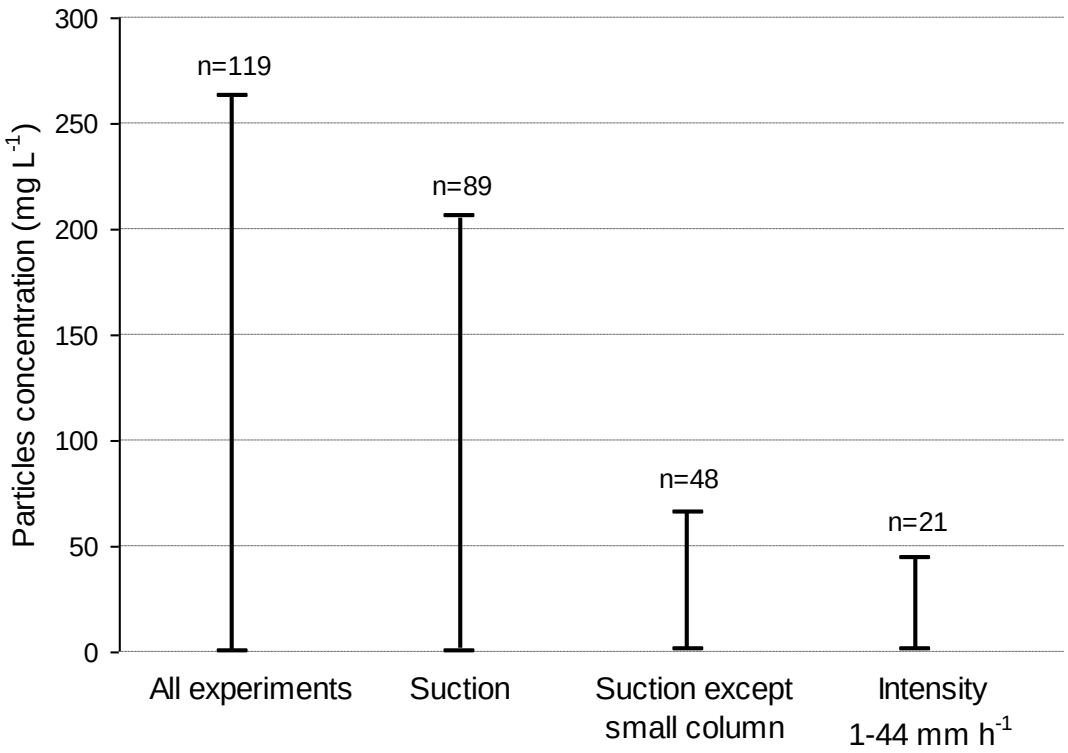


Figure 1.8: Range of particle concentrations at the outlet of the columns depending on different experimental conditions

4.2- Are the quantities of particles migrating through the soil sufficient for the observed B-horizon to develop over pedological time?

Using the column experiments reported in the literature, we determined the concentrations of particles transferred into the soils. We now determine whether these quantities can explain the masses of lutum accumulated in the B-horizons of DoneSol profiles during the time periods during which these horizons formed. To do this, we estimated the durations of the periods during which lessivage occurred in the different profiles.

4.2.1 Duration of the formation of B-horizons

To calculate the duration of the formation of the B-horizons, we used soil profiles from the DoneSol database that developed mainly through lessivage and whose parent material was loess. The age of the loess could be easily estimated from the literature (table 1.5). Eleven profiles met these criteria (figure 1.9).

Table 1.5: Characteristics of the loess compiled from the literature

Parameters	Values	Authors
Content in $CaCO_3$ (%)	14	Jamagne (1973)
	20-25	Dewolf and Bourrié (2008)
	12	Finke and Hutson (2008)
	9.9-16.4	Joret and Malterre (1947)
	0-30	Cordier (1999)
Age of Loess (years)	20,000	Egli and Fitze (2001)
	16,000-20,000	Dewolf and Bourrié (2008)
	18,000-20,000	Campy and Macaire (2003)
	15,000	Finke and Hutson (2008)
	20,000-25,000	Haesaerts (1985)

The majority of the selected soil profiles are located in areas where the loess parent material is dominant according to the 1/100000 scale map of parent materials (figure 1.9). Only one profile fell in a zone in which loess represents less than 25 % of the parent material of the SMU.

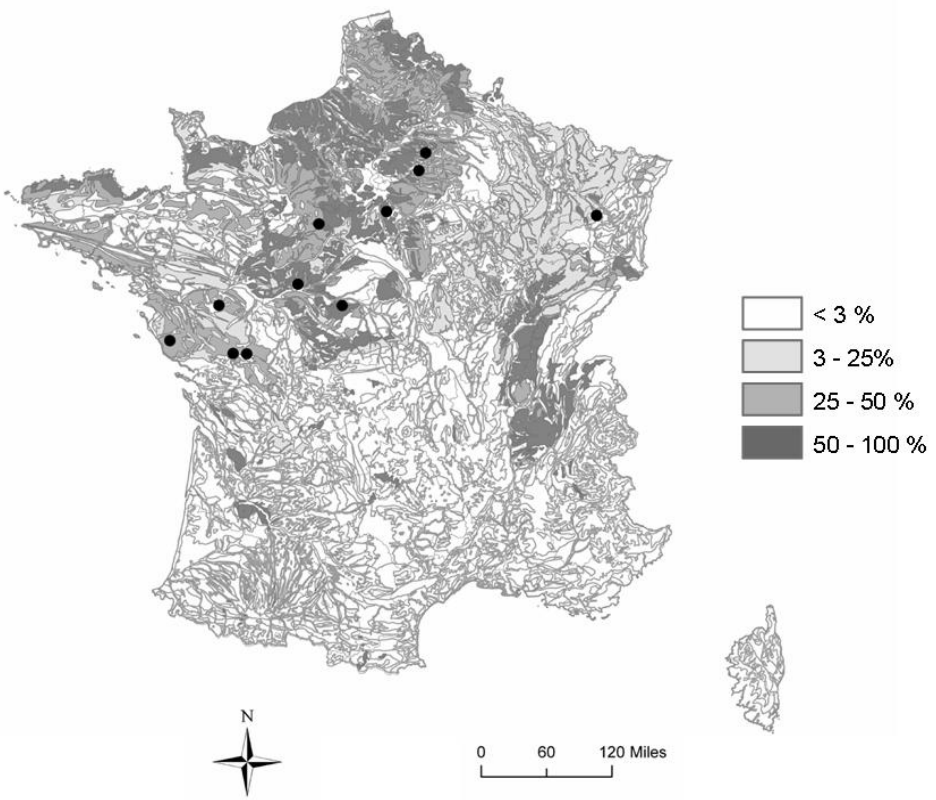


Figure 1.9: Location of the Luvisols and Albeluvisols formed mainly by lessivage, with loess as the parent material. The grey level represents the abundance of loess as the parent material of soils derived from the French soil map as a percentage of SMUs (INRA, 1998)

After loess deposition, decarbonation and desaturation occur before the initiation of lessivage (Jamagne, 1973). To estimate the duration over which lessivage may have occurred, we first

estimated the time that was necessary to decarbonate and desaturate the loess at a depth equivalent to the E- and B-horizons. This duration is a function of both the initial carbonate content of the loess and of the decarbonation rate, which is a function of the amount of water percolating through the soil (Egli and Fitze, 2001).

Based on these data, we estimated that the age of the loess ranges from 15000 years to 20000 years, and its carbonate content ranges from 10 % to 20 %. Contents below 10 % were considered results of the analysis of partially decarbonated loess. To perform the calculations, we assumed that the amount of water percolating through the soil was equal to the effective rainfall. Climatic records given by Finke and Hutson (2008) for Belgium over the 15000 last years allowed us to calculate the effective rainfall for different periods of time (table 1.6). For each period, a decarbonation rate (table 1.6) was estimated using the estimated effective rainfall and the carbonate leaching equation provided by Egli and Fitze (2001).

Table 1.6: Range of rainfall, evapotranspiration, effective rainfall and decarbonation rates for different periods of time considered over the last 15000 years

Periods (year BP)[a]	Annual precipitation (mm)	Annual potential evapotranspiration (mm)	Annual effective rainfall (mm)[b]	rate of decarbonation (mol m^{-2} y^{-1}) [c]
14,500-13,000	700-800	510-540	190-260	0.25-0.39
13,000-11,000	610-715	550-585	130-160	0.14-0.19
11,000-8,000	705-985	585-630	120-355	0.19-0.58
8,000-3,000	850-900	645	205-255	0.28-0.38
Actual	815-980	660	155-320	0.18-0.51

[a] *Periods were determined based on the climatic records provided in Finke and Hutson (2008). Before 14500 (BP), glaciation occurred, resulting in negative effective rainfall. These periods are thus not presented here.*

[b] *Effective rainfall = precipitation – potential evapotranspiration.*

[c] *Decarbonation rates were determined using the equation provided by Egli and Fitze (2001). Due to negative effective rainfall, no decarbonation occurs before 14500 (BP).*

We also assumed that lessivage starts when the height of decarbonated loess corresponds to the height of the parent material necessary to form the present A/E- and B-horizons (heights for the DoneSol profiles were previously calculated by mass balance; table 1.7). The estimated duration for decarbonation ranges from at least 5400 years to 13600 years (figure 1.10). The duration obtained for complete decarbonation using the minimum dissolution rate and the largest $CaCO_3$ initial content is longer than the age of the loess. The considered

decarbonation duration was thus a minimum estimate. The durations obtained for the highest decarbonation rate and the lowest $CaCO_3$ initial content were of the same order of magnitude as the durations estimated by other researchers (Finke and Hutson, 2008) for the same type of material. If we consider a 0.5 decrease in pH every 100 years (Cornu et al., 2007; 2008), desaturation may have lasted over 300 years after decarbonation was completed and before lessivage started. In their simulation approach, Finke and Hutson (2008) considered the impact of the liming that was used in agriculture over at least the last 3000 years, which probably prevented lessivage (Concaret, 1981; Boulaine, 1989). In parallel, the acidification of soil to pH values below 5.5 also stops lessivage, as described above. As already mentioned, we assume that a period of 100 years decreases soil pH by 0.5; this allows us to estimate that the period of lessivage ends when soil pH reaches a value below 5.5. Based on these assumptions, lessivage may have occurred over a maximum of 710 to 9100 years (figure 1. 10). Finke and Hutson (2008) estimated the duration of lessivage at 4000 to 14000 years, depending of the type of ecosystem considered. The duration of lessivage evaluated here is thus somewhat shorter than theirs.

Table 1.7: For the 11 considered soil profiles: quantity of particles eluviated from the A/E-horizons and accumulated in the B-horizon and thickness of parent material assumed to be decarbonised before the start of lessivage; pH of the upper soil horizon and estimation of the quantity of particles exported over the period of time during which lessivage occurs

	Mass balance calculation				
Profiles	Losses of E horizon calculated (g cm-²)	Gain of B horizon calculated (g cm-²)	Height of parent material decarbonated (cm)[a]	pH of upper horizon[b]	Amount of particles transferred (g cm-²)[c]
21213	10.0-13.0	8.1-10.2	107	6.60	0.11-6.7
21524	3.6-4.7	3.8-4.8	83	6.50	0.16-9.2
68547	12.2-15.8	14.9-18.9	69	6.00	0.18-10.4
73336	6.1-7.9	3.7-4.7	93	4.70	0.14-8.0
78873	3.4-4.5	2.8-3.5	89	6.20	0.15-8.6
79320	3.1-4.0	2.2-2.8	59	5.02	0.19-11.1
79348	4.3-5.6	2.3-3.0	80	6.84	0.10-6.1
84745	17.3-22.4	12.1-15.3	162	4.70	0.01-1.0
85771	4.0-5.2	7.0-8.9	89	7.91	0.08-5.2
94264	6.8-8.8	4.3-5.4	56	6.00	0.19-11.5
102572	7.3-9.5	11.4-14.4	76	7.03	0.10-6.4

[a] *Height of parent material decarbonised to produce A/E and B-horizons*

[b] *Data provided by Donesol database*

[c] *The quantity of particles transferred was estimated on the basis of effective rainfall for the different time periods and the concentration of particles transferred in the experiment, with rainfall intensities ranging from 1 mm h^{-1} to 44 mm h^{-1}.*

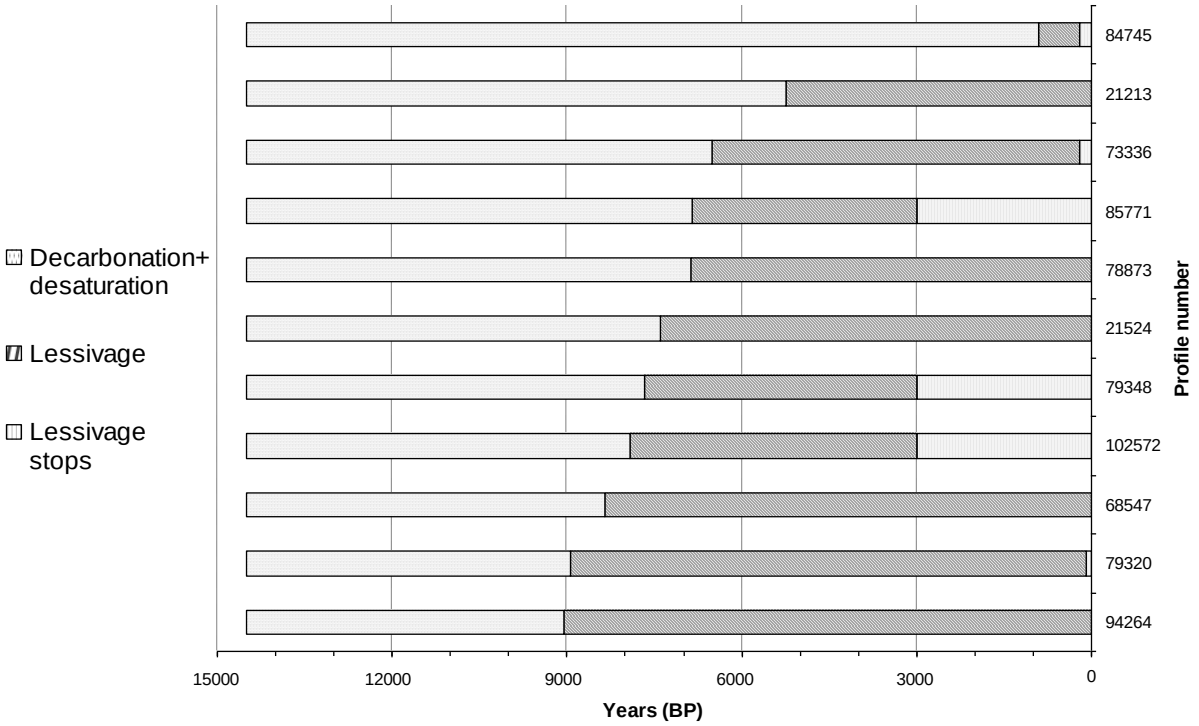


Figure 1.10: For the 11 considered soil profiles: the duration of decarbonation and desaturation, the duration of lessivage and the period of time over which lessivage stops as pH reaches values higher or lower than 6.5 and 5.5, respectively

4.2.2 Estimated amount of particles transferred

From the column experiments, we estimated the range of particles transferred through the soil during the period of lessivage. Therefore, we were able to determine a likely quantity of particles that migrated through the soil and compare it to the quantity of particles accumulated in B-horizons over that period. We estimated the quantity of water percolating through the soil per year to determine the quantity of particles that migrated through the soil over that period of time. We assumed that this quantity was equal to the effective rainfall, as mentioned before, which evolved through time over the last 15000 years (table 1.6).

In 64 % of cases, the quantity of particles that may have transferred through the soil over the period of time during which lessivage occurred is of the same order of magnitude as the quantity of fine particles accumulated in the B-horizon (table 1.7).

V. Conclusion

According to our mass balance calculation, lessivage, classically described as a major soil forming process in Albeluvisols and Luvisols, is actually responsible for the formation of only 1 % to 12 % of the Luvisol and Albeluvisol profiles reported in the French soil database, DoneSol. In the remaining cases, lessivage may or may not be a secondary process of soil evolution that occurs along with a change in parent material, bioturbation or chemical weathering. While our approach allows us to determine if this process is the main process responsible for soil formation, it does not allow us to rule out its occurrence as a secondary or accessory process in the soil.

Additionally, in half of the present soil profiles, pH and CEC are not favourable to lessivage due to agricultural liming.

We also calculated that lessivage may have occurred over 710 to 9100 years in soils developed on loess. Considering the quantity of particles that migrate in soils, this duration is sufficient to explain the observed accumulation of particles in the B-horizon in 64 % of cases.

The quantity of migrating particles used for these estimations was not obtained for soil conditions in which lessivage occurs. Nevertheless, the conditions in which lessivage occurs should be more favourable to particle transfer, and therefore, this absence should not invalidate our conclusion. These estimations were based only on the quantity of particles exiting the soil column, i.e., the eluviated particles, assuming that they were accumulated entirely in the B-horizon. However, there are no experimental data in the literature to confirm this assumption.

L’analyse précédente nous a permis de montrer que les expérimentations de transfert de particules existant dans la littérature ne permettait pas complètement d’étudier le processus de lessivage dans la mesure où :

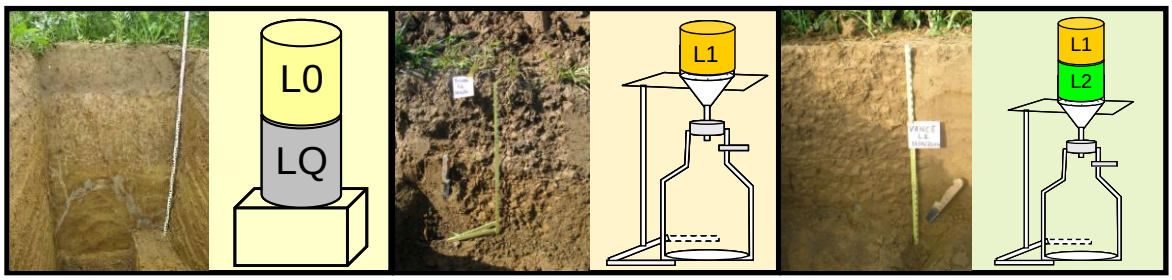
- les sols utilisés dans ces expérimentations n’étaient pas des sols ayant des conditions physico-chimie favorables au lessivage ;
- les expérimentations étaient en général de courte durée (une ou quelques pluies tout au plus) ;
- le processus de fixation des particules n’était généralement pas étudié dans ces expérimentations.

Sur la base de cette analyse, nous avons décidé de construire des expérimentations permettant de répondre à ces manques. L'analyse des expérimentations existantes nous a aussi permis de penser aux mieux nos expérimentations pour étudier spécifiquement les processus d'éluviation et d'illuviation.

Enfin, les bilans de masse sur des profils de sols de la base de données DoneSol et les calculs des durées de lessivage, nous ont permis d'extrapoler sur des durées pédologiques les résultats obtenus dans nos expérimentations.

Chapitre 2

Matériel, Méthodes et développements méthodologiques



I. Introduction

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, il n'existe pas dans la littérature d'expérimentation de transfert de particules sur colonne de sol conçue pour des conditions favorables au lessivage. Par ailleurs, les expérimentations réalisées dans la littérature ont rarement porté sur plus de quelques pluies, or le lessivage est un processus à long terme. Enfin, seul le départ de particules a généralement été suivi, aucune expérimentation ne porte à notre connaissance sur le suivi du dépôt de ces particules.

Ce constat nous a conduit à mettre en place des expérimentations de pédogenèse expérimentale sur colonne de sol pour suivre au cours du temps les processus d'éluviation et d'illuviation dans des conditions favorables au lessivage, en restant le plus près possible de la réalité de terrain.

De façon à pouvoir suivre l'illuviation au cours du temps, nous avons décidé de faire des prélèvements destructifs à différents pas de temps après un certain nombre de pluies. Cela nous a amené à concevoir le dispositif expérimental suivant dans lequel des cylindres de sol sont arrêtés progressivement au cours du temps après X, Y ou Z pluies respectivement (pour les dates t1, t2 et t3) (figure 2.1). Ce disposotif pose le problème de la détection de faibles quantités de particules migrantes dans un solide réceptacle.

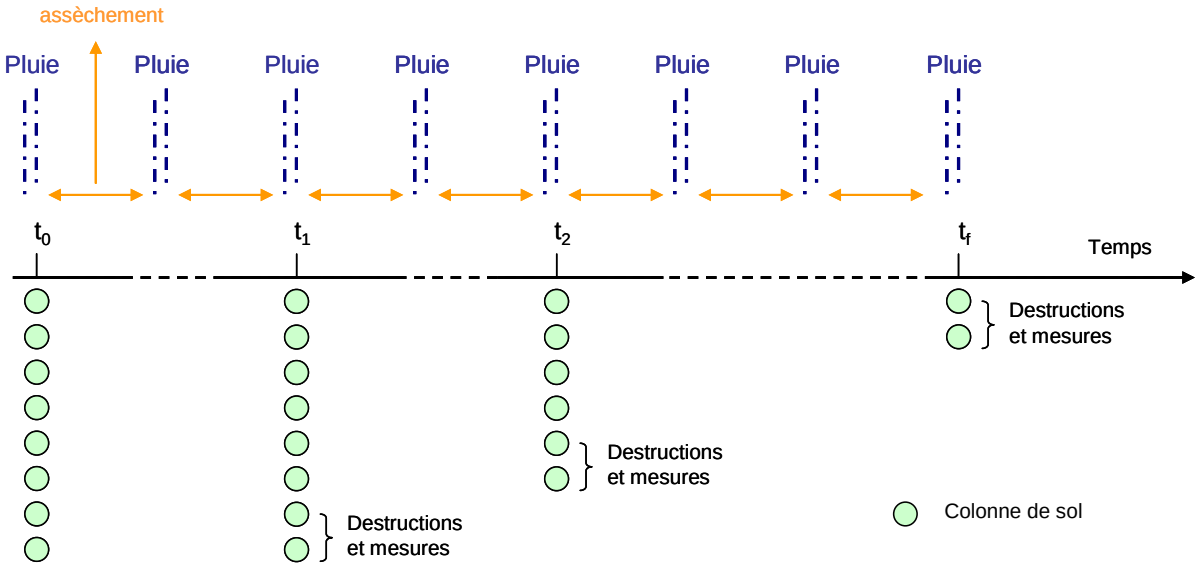


Figure 2.1: Principe général des expérimentations

L'analyse bibliographique précédente a en outre mis en évidence que :

1- la condition à la limite inférieure (drainage libre versus succion) de la colonne avait des conséquences importantes sur la forme des particulogrammes ainsi que sur les quantités de particules exportées en début de pluie ;

2- les colonnes de petite taille exportaient plus de particules que les colonnes de taille plus importante, créant ainsi un départ artificiel de particules ;

3- aucune conclusion n'a pu être tirée sur l'impact de l'utilisation de matériel remanié du fait de la diversité des protocoles expérimentaux mis en œuvre dans les différentes études.

Sur cette base nous avons choisi de réaliser des expérimentations sur colonne de taille décimétrique avec succion à la base. Nous avons également décidé de tester l'importance de deux paramètres sur le lessivage : le rôle de la structure du sol, et le rôle des événements climatiques extrêmes (orage). Afin de mettre en place de telles expérimentations, un certain nombre de questions a dû être résolu.

Ensuite, la question de la reproductibilité des événements pluvieux au cours de l'expérimentation s'est posée ainsi que la recherche de traceurs permettant l'analyse de faibles quantités de particules migrantes.

Ces différents aspects sont abordés dans ce chapitre.

II. Matériel et méthode

Pour permettre la mise en œuvre de ces expérimentations un certain nombre de questions ont dû être résolues au préalable:

1- Quels matériaux doivent être utilisés pour remplir les colonnes ?
2- Quelles pluies doivent être simulées tant en terme de quantité (intensité x durée) qu'en terme de qualité de l'eau ?
3- Quelle taille doivent avoir les colonnes ?
4- Comment appliquer la succion à la base des colonnes ?

Dans ce qui suit, nous nous attacherons à répondre dans un premier temps à ces diverses questions avant de présenter les expérimentations réalisées.

2.1- Quels matériaux utiliser pour remplir les colonnes ?

Dans la partie 1, nous avons montré que certaines caractéristiques pédologiques étaient favorables à l'éluviation et à l'illuviation (tableau 2.1) et que ces processus se développent principalement dans des matériaux limoneux et forment les Luvisols.

Tableau 2.1 : Conditions pédologiques favorables respectivement à l'éluviation et à l'illuviation (d'après le chapitre 1)

	Eluviation	Illuviation	Référence
pH	5,5<>6,5	>6,5	Soil Survey Staff, 1999 ; Duchaufour, 1956
<2µm (%)	7,5<>30		Duchaufour, 1983
Minéralogie	smectites	pas de smectites	Jamagne, 1978 ; Jamagne et Pedro, 1981 ; Duchaufour, 1983 ; Seta et Karathanasis, 1996 et 1997 ; Mercier et al., 2000 ; Rousseau et al., 2004

Sur la base des sols analysés par le Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS) en France, des Luvisols ont été sélectionnés et analysés minéralogiquement par la méthode de diffraction des rayons X. La banque d'échantillons du RMQS a permis de sélectionner des

sols avec et sans smectites. Les principales caractéristiques de ces sites sont reportées ci-dessous (tableau 2.2).

Tableau 2.2 : Caractéristiques des sols choisis sur la base des données du RMQS

	Eluviation		Illuviation
Nom du site	Heurtebise	La Brosse	La Pilotière
pH	5,7	6,7	7,2
<2µm (g/kg)	165	192	165
CEC ($cmol^+/kg$)	12,0	11,2	5,6
Minéralogie	smectites	smectites	pas de smectite

Les trois profils de sol sélectionnés ont ensuite été échantillonnés :

- deux horizons, provenant respectivement des profils de « Heurtebise » appelé L0 ci-après et de « La Brosse » appelé L1 ci-après, ont été échantillonnés pour l'expérimentation d'éluviation ;
- un horizon du profil de « La Brosse » et un du profil de « La Pilotière » (appelé L2 ci-après) ont été sélectionnés pour l'expérimentation d'illuviation.

Le limon L0, prélevé entre 145 et 155 cm, est issu de l'horizon C d'un Luvisol situé sur la commune de Nesle la Montagne (02400) dans le département de l'Aisne au lieu dit le Grand Heurtebise (X=681731 et Y=2445237 ; coordonnées en Lambert 2 étendu). Cet horizon, situé entre 140 et 160 cm de profondeur, est de texture limono-argileuse avec une teneur en argile plus faible que l'horizon sus-jacent. Il est compact, plus humide que l'horizon sus-jacent et de couleur jaune-ocre.

Le limon L1, prélevé entre 35 et 50 cm de profondeur, est issu de l'horizon E d'un Luvisol situé sur la commune de St Ouen de la Cour (61130) dans le département de l'Orne au lieu dit La Brosse (X= 470948 et Y= 2379798 ; coordonnées en Lambert 2 étendu). Cet horizon, situé entre 35 et 50 cm de profondeur, est de couleur brun-jaune, à texture argilo-limoneuse, plus compact que l'horizon sus-jacent mais avec une activité biologique importante.

Le limon L2, prélevé entre 35 et 50 cm de profondeur, est issu de l'horizon E d'un Luvisol situé sur la commune de Ruillé sur Loir (72262) dans le département de la Sarthe au lieu dit La Pilotière (X= 471090 et Y= 2316012 ; coordonnées en Lambert 2 étendu). Cet horizon, situé entre 35 et 50 cm de profondeur, est de couleur brun-jaune, à texture limono-argileuse avec une activité biologique importante.

Une description plus complète des sols dont ont été issus ces différents limons a été reportée en annexe (Annexe 1). L'analyse a posteriori des différents limons prélevés montre (tableau 2.3) que les limons L0 et L1 ont bien les pH requis pour une expérimentation d'éluviation.
Par contre, le L0 présente une masse volumique apparente trop élevée pour pouvoir réaliser des expérimentations en colonne non perturbée. Seules des expérimentations en colonnes remaniées ont donc été réalisées avec ce limon et le limon L1 a été prélevé pour les expérimentations sur sol non pertubé.
Le limon L2 sélectionné comme réceptacle pour le processus d'illuviation, présente un pH favorable à ce processus.
Les limons L0 et L1 ont en outre été sélectionnés pour leur richesse en smectites, alors que le L2 a été choisi pour sa pauvreté en ce minéral. En effet, ce minéral, particulièrement affecté par le processus de lessivage d'après la littérature (voir chapitre 1), pourra servir de traceur dans la quantification de l'illuviation.

Ces limons ont été prélevés sous différentes formes afin de :

- réaliser les expérimentations d'éluviation/d'illuviation en laboratoire ;
- caractériser leurs propriétés hydrodynamiques.

Sur le site d'Heurtebise, 150 kg de vrac ont été prélevés pour réaliser les expérimentations en colonnes remaniées et caractériser les propriétés hydriques des colonnes ainsi obtenues. Trois cylindres de 500 cm^3 ont aussi été prélevés pour mesurer la masse volumique apparente.
Sur les sites de la Brosse et de la Pilotière, des cylindres de sol non perturbés (hauteur : 15 cm ; diamètre : 13,5 ou 15 cm[1]) ont été prélevés pour les expérimentations sur colonnes, et des cylindres de 500 cm^3 ont été prélevés pour mesurer la masse volumique apparente. Des

[1] Les cylindres de 15 cm de diamètre sont en métal. Afin de se garder la possibilité d'analyser la structure par tomographie de rayons X, certains échantillons non perturbés ont été prélevés dans des cylindres en plastique (diamètre 13,5 cm).

cylindres non perturbés (hauteur : 7 cm ; diamètre 15 cm) ont également été prélevés pour caractériser les propriétés hydrodynamiques.

Tous ces échantillons ont été empaquetés sur le terrain puis, une fois au laboratoire, conservés en chambre froide à une température de 4 °C.

Tableau 2.3 : Synthèse des propriétés des trois limons prélevés

Propriétés	**Heurtebise**	**La Brosse**	**La Pilotière**
Structure du sol	Perturbé	Non perturbé	Non perturbé
Profondeur de prélèvement (cm)	145-155	35-50	35-50
Lutum (<2µm) (g/kg) [1]	259	307	156
Limon fin (2-20µm) (g/kg) [1]	338	285	319
Limon grossier (20-50µm) (g/kg) [1]	351	302	380
Sable fins (50-200µm) (g/kg) [1]	33	80	109
Sable grossier (200-2000µm) (g/kg) [1]	19	26	36
Masse volumique (g/cm^3)	1,8	1,6	1,5
Porosité		0,39	0,44
Teneur en eau à saturation (cm^3/cm^3)		0,37	0,31
Conductivité hydraulique à saturation (m/s)		1,00E-06	4,38E-05
pH	5,82	6,19	7,03
CEC (cmol+/kg) [2]	11,4	17,8	7,3
Ca^{2+} échangeable (cmol/kg) [2]	7,65	14,4	5,5
Mg^{2+} échangeable (cmol/kg) [2]	3,55	1,1	0,4
K^+ échangeable (cmol/kg) [2]	0,13	0	0
Na^+ échangeable (cmol/kg) [2]	0,11	0,4	0,2
Carbone organique (g/kg)	1,33	3,54	2,81
Azote total	0,26	0,515	0,364
C/N	5,07	6,87	7,74
Matière organique (g/kg)	2,30	6,12	4,87
Smectite [3]	Abondante	Abondante	Absente

[1] *La composition granulométrique cinq fractions, a été déterminée au Laboratoire d'Analyses des Sols de l'INRA d'Arras par la méthode normalisée AFNORX31-107.*

[2] *La CEC ainsi que les cations échangeables ont été déterminés au laboratoire de l'INRA d'Orléans par la méthode à la cobaltihéxammine. Les mesures sont réalisées sur des échantillons de vrac séchés et tamisés à 2 mm.*

[3] *La minéralogie des argiles a été déterminée par diffraction des rayons X sur lames orientées selon la méthode décrite par Robert et Tessier (1974).*

Sur les sites de la Brosse et de la Pilotière, nous avons observé de nombreux vers de terre et conduits de vers de terre. Pour éviter que le sol prélevé ne se déstructure au cours des expérimentations de laboratoire, tous les cylindres ont été mis sous tension électrique afin d'électrocuter les vers de terre.

2.2- Quelles pluies simuler tant en terme de quantité (intensité x durée) qu'en terme de qualité de l'eau ?

Pour quantifier l'impact que peut avoir l'intensité des événements pluvieux sur le transfert de particules, nous avons décidé de tester deux types d'événements pluvieux : une pluie d'orage et une pluie fine.
Une pluie d'orage se définit comme une pluie de forte intensité sur un sol sec, et une pluie fine se définit comme une pluie de faible intensité sur un sol humide.

2.2.1 Choix des événements pluvieux

Pour choisir les deux intensités de pluie, orage et pluie fine, les plus proches possibles de celles rencontrées in situ, nous avons étudié des historiques de données météo (suivi de terrain INRA) pour le site de Mons (80) pour lequel nous disposions de données horaires (mm/h) sur dix sept années (1994-2011). Pour déterminer l'intensité d'une pluie d'orage, nous avons étudié le nombre d'orages rencontrés les mois d'été sur ce site (juin à septembre) et leur intensité. Pour la pluie fine, nous avons étudié les intensités minimales et maximales des mois de novembre à février.

Sur les dix sept années de données disponibles, les différentes intensités rencontrées durant ces mois d'été ainsi que leurs fréquences d'apparition sont présentées dans le tableau 2.4. Les pluies de 47,5 mm/h et 25,5 mm/h sont des pluies extrêmes (fréquence 1 en 17 ans). Les classes d'intensité les plus fortes rencontrées en dehors de deux pluies extrêmes sont les classes 12-14,4 mm/h et 14,4-16,8 mm/h. Pour une intensité inférieure à 12 mm/h, les pluies n'ont pas été considérées comme des pluies d'orage. Durant ces dix sept ans, seulement 17 orages ont eu lieu, ce qui représente en moyenne 1 orage par an.

Tableau 2.4 : Répartition en classes des intensités horaires obtenues sur le site de Mons pour les mois de juin à septembre des années 1994-2010 ainsi que leur fréquence d'apparition. En vert sont surlignées les pluies correspondant à des orages

Intensité (mm/h)			Fréquence
Borne inférieure	Borne supérieure	Centre	
0,2	2,6	1,4	2132
2,6	4,9	3,7	186
4,9	7,3	6,1	76
7,3	9,7	8,5	34
9,7	12,0	10,8	9
12,0	14,4	13,2	9
14,4	16,8	15,6	6
16,8	19,1	17,9	0
19,1	21,5	20,3	0
21,5	23,9	22,7	0
23,9	26,2	25,0	1
26,2	28,6	27,4	0
28,6	30,9	29,8	0
30,9	33,3	32,1	0
33,3	35,7	34,5	0
35,7	38,0	36,9	0
38,0	40,4	39,2	0
40,4	42,8	41,6	0
42,8	45,1	44,0	0
45,1	47,5	46,3	1

Pour les pluies fines d'hiver, sur la totalité des données disponibles, les intensités maximales sont de 11,5 et 11 mm/h. La majorité des événements pluvieux ont une intensité inférieure à 2 mm/h (tableau 2.5).

Pour réaliser ces événements pluvieux nous disposons, au laboratoire, d'un simulateur de pluie. Celui-ci est constitué de deux rampes d'aspersion comportant chacune 5 buses.

Selon la taille des buses choisies (grosseurs des gouttes) et la vitesse d'oscillation de celles-ci, différentes intensités de pluie peuvent être réalisées. Cependant le simulateur ne peut assurer une intensité inférieure à 6 mm/h. Cette intensité est de l'ordre des intensités maximales enregistrées pour les pluies d'hiver (tableau 2.5) et a donc été choisie pour la pluie fine. Une intensité de 20 mm/h a été choisie pour les pluies d'orage car une telle intensité est réaliste par rapport aux intensités observées à Mons lors des orages estivaux.

Tableau 2.5 : Répartition en classes des intensités horaires obtenues sur le site de Mons pour les mois de novembre à février des années 1994-2011 ainsi que leurs fréquences d'apparition. En vert sont surlignées les pluies proches de l'intensité de 6 mm/h choisie pour nos expérimentations

Intensité (mm/h)			Fréquence
Borne inférieure	Borne supérieure	Centre	
0,2	0,8	0,5	1935
0,8	1,3	1,0	741
1,3	1,9	1,6	353
1,9	2,5	2,2	166
2,5	3,0	2,7	128
3,0	3,6	3,3	22
3,6	4,2	3,9	10
4,2	4,7	4,4	7
4,7	5,3	5,0	10
5,3	5,9	5,6	8
5,9	6,4	6,1	2
6,4	7,0	6,7	4
7,0	7,5	7,3	7
7,5	8,1	7,8	0
8,1	8,7	8,4	0
8,7	9,2	9,0	1
9,2	9,8	9,5	1
9,8	10,4	10,1	0
10,4	10,9	10,7	0
10,9	11,5	11,2	2

Le choix de la durée des pluies ne peut être fait de façon indépendante de celui de la taille des cylindres et sera donc discuté dans le paragraphe 1.3.

2.2.2 Choix de la composition de l'eau

Le simulateur de pluie dispose d'un récupérateur d'eau de pluie qui peut être utilisé pour réaliser les expérimentations. Dans notre cas, les quantités d'eau utilisées ainsi que la durée des expérimentations sont importantes et non compatibles avec les réserves du simulateur. Nous avons donc été contraints d'utiliser pour nos expérimentations l'eau du réseau de distribution soit directement, soit après osmose. Ces deux types d'eau ont été analysés et comparés à la composition de l'eau de pluie afin de choisir celle qui s'en rapprochait le plus (tableau 2.6).

Tableau 2.6 : Concentrations en anions et cations des différentes eaux étudiées

Echantillons	pH	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+ mg/L	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
Eau pluie (Orléans, 18/11/2009)	6,06	5,4	3,8	1,2	2,9	4,0	< lq*	1,4
Eau osmosée	5,70	3,7	3,1	< lq*	1,8	2,6	< lq*	0,9
Eau robinet	7,38	**21,5**	4,2	**11,3**	**12,5**	3,6	**5,1**	**61,0**

* *limite de quantification*

L'eau du robinet est beaucoup plus chargée que l'eau de pluie en calcium, sodium, sulfate et chlorure et présente un pH plus élevé, alors que l'eau osmosée a une composition et un pH peu différent de l'eau de pluie. De façon à éviter une ressaturation de la CEC par le calcium apporté par l'eau du robinet lors des expérimentations, nous avons choisi de réaliser celles-ci avec de l'eau osmosée dont la composition a été suivie tout au long des expérimentations (tableau 2.7).

Tableau 2.7 : Valeurs moyennes et écart type du pH, de la conductivité et des anions et cations majeurs de l'eau osmosée (utilisée pour les pluies)

	pH	Conductivité µs/cm	Na^+	K^+	Mg^{2+} mg/L	Ca^{2+}	Cl^-
Moyenne	6,05	11,38	2,30	2,33	0,12	0,68	3,46
Ecart-type	0,61	3,14	0,33	1,45	0,09	0,42	0,90

2.3- Choix de la taille des colonnes et du régime hydrique

2.3.1 Choix de la taille des colonnes

Les systèmes naturels étant hétérogènes, le choix de taille des colonnes était important. Effectivement, un milieu hétérogène à une échelle donnée, peut être homogène à une échelle plus intégrée. Il faut par conséquence que le volume échantillonné soit de taille suffisamment grande pour qu'il puisse intégrer l'hétérogénéité du milieu étudié. C'est ce qu'on appelle le

« Volume Elémentaire Représentatif » (VER) qui est défini comme le plus petit volume de sol de dimension *n* pouvant représenter le domaine des variations à l'échelle *n*-1 (Bear, 1972).
Dans l'étude bibliographique menée dans le chapitre 1, nous avons mis en évidence l'importance de la taille des colonnes sur le transfert de particules. Plus les colonnes sont petites (<10 cm), plus la concentration en particules transférées est élevée (figure 1.6 du chapitre 1). Des colonnes de petite taille entraînent donc probablement une surestimation de la quantité de particules qui migrent naturellement dans les sols.

En conséquence, nous avons choisi pour constituer ces colonnes des cylindres de 15 cm de haut et de 13,5 cm de diamètre. La hauteur du cylindre de sol devait être suffisamment grande pour être représentative du sol in situ (VER) et permettre un transfert vertical de particules, mais également pas trop grande pour permettre le prélèvement sur le terrain de nombreux échantillons.
Pour le diamètre, le choix résulte d'un compromis entre un diamètre suffisant pour limiter l'impact des effets de bord et néanmoins pas trop grand pour permettre de localiser de nombreuses répétitions sous le simulateur de pluie avec une bonne homogénéité de pluie.

2.3.2 Choix du régime hydrique (durées des pluies et conditions initiales)

2.3.2.1 Caractéristiques générales

Afin de choisir les régimes hydriques, nous avons réalisé des tests sur des cylindres (diamètre=13,5 cm et hauteur=15 cm) de sol remanié de Heurtebise (L0) de masse volumique apparente de 1,45 g.cm^3, posés sur des cylindres de quartz pur à la même masse volumique apparente[1]. Pour pouvoir comparer les expérimentations entre les deux intensités de pluie (20 mm/h et 6 mm/h), nous avons décidé d'appliquer la même quantité d'eau à la surface des cylindres. Au cours des expérimentations, nous voulons qu'une quantité d'eau suffisante traverse le cylindre supérieur sans avoir pour autant la formation d'une nappe durable en surface qui engendrerait l'apparition d'autres processus tels que l'oxydo-réduction. De plus, pour chaque simulation de pluie, nous souhaitons que la condition initiale soit identique, il faut donc que le temps de drainage/séchage entre chaque simulation de pluie soit raisonnable.
Idéalement, une pluie d'orage correspond à une intensité de pluie de 20 mm/h, sur une courte durée (1 à 2 h) et sur un sol sec (environ -1500 hPa) alors que la pluie fine correspond à une pluie d'intensité 6 mm/h, sur une durée de 5 à 6 h, et sur un sol humide (environ -100 hPa).

[1] La fabrication des cylindres est présentée en détails dans la partie 1.5.1.1 de ce chapitre.

Pour avoir une idée de la quantité d'eau à appliquer à la surface des cylindres (durée des pluies), nous avons calculé la quantité d'eau nécessaire pour remplir toute la porosité. Pour un cylindre de sol de masse volumique apparente 1,45 g.cm^3 et de 15 cm de hauteur et 13,5 cm de diamètre, il est nécessaire de faire tomber environ 68 mm d'eau pour que toute la porosité soit remplie.

Ainsi, nous avons testé différentes durées de pluie et de conditions initiales du sol pour déterminer les conditions expérimentales (tableau 2.8).

2.3.2.2 Intensité 20 mm/h

Pour l'intensité 20 mm/h, une nappe se forme en surface après 38 mm de pluie et de l'eau coule dans le bac sous jacent (tableau 2.8). Comme nous voulons éviter la formation d'une nappe et avoir une durée de pluie assez courte, nous avons fixé la quantité d'eau reçue à 30 mm, ce qui permettra de limiter la formation de la nappe et d'avoir une durée de pluie de 1h30 à 20 mm/h. Pour ce qui est de la condition initiale, les -1500 hPa initialement prévus sont difficiles à mettre en place au laboratoire d'un point de vue technique. Tous d'abord les tensiomètres, qui servent à mesurer le potentiel matriciel dans le sol, décrochent au delà de -800 hPa. Ensuite, le fait de dessécher très fortement risque de créer des retraits annulaires du sol dans le cylindre et donc des écoulements préférentiels le long des parois de celui-ci. Enfin, une condition initiale de -1500 hPa risque d'entraîner de longues périodes de séchage entre chaque cycle de pluie. Effectivement, lors de tests, nous avons constaté que, pour revenir à une condition initiale de -470 hPa, il nous avait fallu 20 jours en plein été en sortant tous les jours le cylindre dehors. Comme les expérimentations ont lieu toute l'année, il n'était pas possible d'envisager un séchage en extérieur en plein hiver. Nous avons donc testé un séchage en intérieur qui a duré 1 mois et demi. Ces durées étant vraiment trop longues pour pouvoir réaliser un grand nombre de pluies sur l'année, nous avons fait un test de séchage en étuve à 30 °C. Cette température a permis de diminuer le temps de séchage à une semaine, ce qui rend les expérimentations plus facilement réalisables.

Tableau 2.8 : Résultats des différents tests réalisés sur la durée des pluies, la condition initiale et la condition de séchage pour les intensités 20 mm/h et 6 mm/h à partir des cylindres de sol remanié de limon L0 posés sur un limon de quartz tous les deux fabriqués à une masse volumique apparente de 1,45 g.cm^3

Type de pluie	Condition initiale (hPa)	Nombre d'évènements	Quantité d'eau (mm)	Durée de l'expérimentation	Nappe superficielle	Percolation/ drainage	Mode de séchage	Condition finale (hPa) (à 5cm)
Pluie d'orage	-600	5	52,6	12/08/2009	Oui	Oui	20 jours à l'extérieur (12/08/09-31/08/09)	-470
	-470	4	38,0	31/08/2009	Oui	Oui	1mois 1/2 à l'intérieur (1/09/09-21/10/09)	-470
	-600	5	50,8	14/08/2009	Non	Non	5 jours à l'intérieur (14/08/09-19/08/09)	-100
	-470	4	38,9	21/10/2009	Oui	Oui	7 jours à l'étuve à 30°C (22/10/09-29/10/09)	-470
	-470	4	39,7	29/10/2009	Oui	Oui	5 jours à l'étuve à 30°C (30/10/09-3/11/09)	ND
Pluie fine	-80	8	31,5	27/08/09-2/09/09	Oui	Oui	pas de séchage	ND
	-80	11	31,2	26/08/09-2/09/09	Oui	Oui	pas de séchage	ND
	-80	14	18,0	7/09/09-18/09/09	Oui	Oui	10 jours à l'intérieur (19/09/09-29/09/09)	-80
	-80	1	12,4	21/08/2009	Oui	Non	pas de séchage	-60

2.3.2.3 Intensité 6 mm/h

Comme nous souhaitons que la même quantité d'eau (30 mm) tombe à la surface des cylindres quelle que soit l'intensité appliquée, la durée de la pluie fine (6 mm/h) sera de 5 h. Lors des premiers tests, nous avions souhaité éviter la formation d'une nappe en surface, ce qui nécessitait d'appliquer la pluie en plusieurs événements pluvieux. Cette solution a été abandonnée car il fallait plus de 10 événements pluvieux sur plus d'une semaine pour atteindre les 30 mm de pluie (tableau 2.8). Pour réduire ce temps, nous avons donc choisi de faire tomber la pluie en un seul événement pluvieux de 5 h, et nous avons donc accepté la formation d'une nappe d'eau temporaire en surface. La condition initiale à -100 hPa choisie au début, n'a pas pu être conservée car elle entraînait des durées d'expérimentation trop importantes.

Une condition initiale plus humide que -1500 hPa et plus sèche que -100 hPa va permettre de raccourcir le temps de drainage/séchage entre chaque cycle de pluie. La condition initiale a été fixée à -300 hPa pour les deux intensités de pluie et le séchage sera réalisé dans une étuve à 30 °C dans la mesure du possible. La durée des événements pluvieux est fixée à 1h30 pour 20 mm/h et 5 h pour 6 mm/h, ce qui correspond à une quantité d'eau reçue d'environ 30 mm.

2.4- Caractérisation des propriétés hydrodynamiques des horizons d'intérêt

2.4.1 Méthodes de caractérisation des propriétés hydrodynamiques des horizons d'intérêt

2.4.1.1 Caractérisation de la conductivité hydraulique en régime saturé

La conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}), est déterminée par la méthode du perméamétre à charge constante. Cette méthode est basée sur la loi de Darcy qui traduit l'évolution du flux en fonction de différents gradients de charge hydraulique. La circulation de l'eau se fait *per ascensum*, c'est-à-dire du bas vers le haut évitant ainsi le déplacement de particules de sol (Quétin et Raison, 1997). Le cylindre de sol (diamètre =15 cm et hauteur = 7 cm) est porté à saturation et laissé à l'équilibre pendant une semaine. Il est ensuite placé sur un banc de mesure. On lui impose une charge hydraulique en maintenant un niveau d'eau au dessus de sa face supérieure. Le volume d'eau qui s'écoule est mesuré toutes les 3 minutes et l'on conserve la valeur obtenue au bout d'une heure, lorsque le régime est stable. Une nouvelle charge est ensuite imposée à l'échantillon de nouveau pendant 1 heure. Cette opération est répétée 5 à 6 fois. Durant toute l'expérimentation, la température de l'eau est maintenue à 20 °C.

La conductivité hydraulique à saturation est déterminée par :

$$K_{sat} = \frac{V}{A.t} \times \frac{l}{h} \qquad \text{(équation 2.1)}$$

avec K_{sat} la conductivité hydraulique à saturation (m.s^{-1}), V le volume d'eau qui a percolé à travers l'échantillon (m^3) pendant le temps t, A la surface de l'échantillon de sol (m^2), t le temps durant lequel la mesure est effectuée (s), l la hauteur de l'échantillon de sol (m) et h la hauteur de la charge d'eau imposée (m).

La conductivité hydraulique à saturation de l'échantillon est la moyenne géométrique des valeurs calculées pour chaque charge.

2.4.1.2 Courbe de rétention en eau et conductivité hydraulique en régime insaturé par la méthode évaporatoire de Wind

Nous avons utilisé la méthode évaporatoire de Wind (1968) qui permet de déterminer simultanément la courbe de rétention en eau, $h(\theta)$, et la conductivité hydraulique en conditions non saturées, $K(\theta)$. La courbe de rétention est déterminée pour des valeurs de potentiel comprises entre h=-10 hPa et h=-800 hPa. Pour la courbe de conductivité, les potentiels varient entre h=-50 hPa et h=-800 hPa (Norme ISO-11275, 2004).

Le cylindre de sol est d'abord humidifié par capillarité jusqu'à saturation en eau pendant 8 jours puis il est placé sur une balance. Sont ensuite installés horizontalement 5 tensiomètres à 5 altitudes différentes. La surface supérieure de l'échantillon est laissée libre à l'air et la teneur en eau du sol diminue par évaporation. Les tensiomètres mesurent l'évolution du potentiel de l'eau au cours du temps ($h(t,z)$) et la balance enregistre la perte de masse ($m(t)$) au cours du temps.

L'expérience est stoppée dès que 2 tensiomètres ont « décroché », c'est-à-dire lorsqu'il y a rupture de continuité hydraulique à l'intérieur du capillaire. L'échantillon est ensuite placé à l'étuve à 105 °C pendant 24 h pour pouvoir déterminer la masse de terre sèche.

Les données sont traitées grâce à l'algorithme de Wind (Wind, 1968). Celui-ci permet, à partir de la teneur en eau moyenne observée, de reconstituer à chaque pas de temps, le profil de teneur en eau en fonction de l'altitude $\theta(z,t)$. Grâce à ces valeurs et aux valeurs de potentiel hydrique (h), la courbe de rétention en eau $h(\theta)$ est déterminée à partir d'une méthode itérative et exprimée selon le formalisme de Van Genuchten (1980) :

$$\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}=\left(1+|\alpha h|^n\right)^{-m} \qquad \text{(équation 2.2)}$$

avec θ, la teneur en eau volumique ($m^3.m^{-3}$), h, le potentiel matriciel (m), θr, la teneur en eau résiduelle ($m^3.m^{-3}$), θs, la teneur en eau à saturation ($m^3.m^{-3}$), α, paramètre de calage (m^{-1}) >0, n, paramètre de calage >1, et m, paramètre de calage >0 (m= 1-1/n (Mualem, 1976)).

Les valeurs de conductivité en fonction de la teneur en eau ou du potentiel en conditions non saturées, sont calculées grâce à la loi de Darcy généralisée en faisant l'hypothèse d'un flux vertical unidimensionnel (Tamari et al, 1993). On modélise ensuite les courbes *K(h)* et *K(θ)* à l'aide des formules de Mualem-Van Genuchten (Van Genuchten 1980) :

$$K(h)=K_{sat}\frac{\left[1-\left(\alpha|h|^{n-1}\right)\times\left(1+\left(\alpha|h|^{n}\right)^{-m}\right)\right]^2}{\left(1+\alpha|h|^{n}\right)^{m/2}} \qquad \text{(équation 2.3)}$$

$$K(\theta)=K_{sat}\theta^{\tau}\left[1-\left(1-\theta^{1/m}\right)^{m}\right]^2 \qquad \text{(équation 2.4)}$$

avec *K(h)*, la conductivité hydraulique au potentiel h ($m.s^{-1}$), *K(θ)*, la conductivité hydraulique à la teneur en eau θ ($m.s^{-1}$), K_{sat}, la conductivité hydraulique à saturation ($m.s^{-1}$), h, le potentiel matriciel (m), τ, facteur de tortuosité, α, paramètre de calage (m^{-1}), n, paramètre de calage, et m, paramètre de calage.

Cette méthode est employée sur les sites de La Brosse (L1) et de La Pilotière (L2).

2.4.1.3 Courbe de rétention en eau issue de données de presse à membrane de Richards

Les expérimentations d'éluviation sur le sol de Heurtebise ont été réalisées sur des cylindres de sol remanié de masse volumique apparante 1,45 $g.cm^{-3}$, pour lesquels la mise en œuvre de la méthode évaporatoire de Wind pour la caractérisation des propriétés hydrodynamiques est délicate. Nous avons donc déterminé la courbe de rétention en eau par la méthode des presses à membrane de Richards (Richards, 1956) décrite par Klute (1986). Les mesures de rétention en eau ont été effectuées pour 11 potentiels matriciels allant d'un état proche de la saturation (-10 hPa) jusqu'au point de flétrissement (-15400 hPa). Pour chaque potentiel matriciel, 8 répétitions ont été faites. Pour cela, 8 mini cylindres de 4,73 cm^3 (hauteur=1,6 cm et diamètre=1,94 cm) ont été sous-échantillonnés dans un cylindre de plus grande taille. Ils ont d'abord été placés dans un bac de réhumectation pendant 24 h pour atteindre la saturation,

puis dans une enceinte pneumatique où ils ont subi une pression constante pendant 7 jours. Les valeurs de teneur en eau aux 11 points de potentiel matriciel ont ensuite été ajustées avec le formalisme de Van Genuchten par le programme RETC (RETention Curves) (Van Genuchten et al, 1991).

2.4.2 Propriétés hydrodynamiques des horizons d'intérêt

Les paramètres d'ajustement du modèle de Van Genuchten aux données expérimentales sont présentés dans le tableau 2.9. La figure 2.2 présente les courbes de rétention et de conductivité pour les 3 sols.

Tableau 2.9 : Paramètres de l'ajustement du modèle de Van Genuchten aux données expérimentales obtenues par presses à membrane sur le sol de Heurtebise (sol remanié), et par expérimentations de Wind sur les sols de la Brosse et la Pilotière (sols non perturbés). La conductivité hydraulique à saturation a été mesurée par la méthode du perméamétre à charge constante

Paramètres	Heurtebise (L0)		La Brosse (L1)	La Pilotière (L2)
Masse volumique (g/cm^3)	1,45		1,6	1,5
Porosité	0,45		0,40	0,43
K_{sat} (m.s^{-1})	2,38E-05		1,00E-06	4,38E-05
θsat (m^3/m^3)	0,45[a]	0,29[b]	0,37	0,31
θr (m^3/m^3)	0,29[a]	0[b]	0	0
α (m^{-1})	150[a]	0,11[b]	2,57	4,21
n	1,60[a]	1,23[b]	1,19	1,17

[a] *: paramètres valables dans la gamme allant de la « saturation » à -100 hPa*

[b] *: paramètres valables dans la gamme -100 à -1500 hPa*

Sur le site de Heurtebise, les données expérimentales ont été ajustées de façon optimale par un double modèle de Van Genuchten (Van Genuchten et al., 1991). De la saturation jusqu'à -100 hPa, les données ont été ajustées par un premier modèle pour lequel on fixe la valeur de θ_{sat} à la porosité, et la valeur de θr à la teneur en eau à -100 hPa. De -100 hPa à -15400 hPa, les données ont été ajustées par un second modèle pour lequel on fixe la valeur de θ_{sat} à la valeur de $\theta_{-100\ hPa}$ simulée par le premier modèle. Le modèle général s'ajuste ainsi idéalement aux données expérimentales (figure 2.2.a).

Sur les sites de La Brosse et La Pilotière, le paramètre θ_{sat} est éloigné de la porosité (tableau 2.9). Ceci s'explique par la présence de macropores qui drainent très rapidement en

début d'expérimentation et ne sont donc pas pris en compte par l'expérimentation de Wind. L'ajustement réalisé n'est donc valide qu'à partir du potentiel de -50 hPa (figure.2.2a).

La conductivité hydraulique à saturation indique des échantillons à drainage limité (figure 2.2b). Les données de conductivité sont cohérentes avec les données de masse volumique apparente (tableau 2.9)

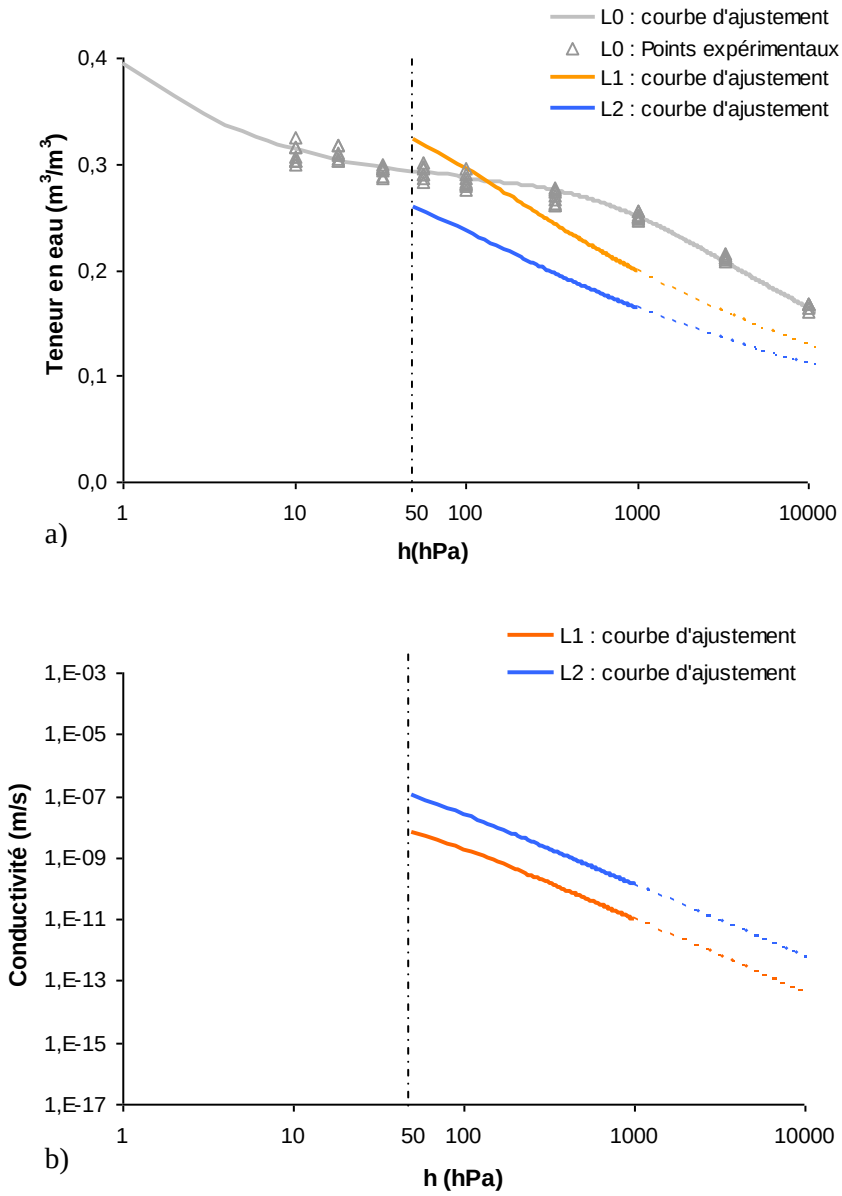


Figure 2.2 : Propriétés hydrodynamiques des sols étudiés .a) Courbes de rétention en eau ; b) Courbes de conductivité hydrauliques pour L1 et L2. Ces courbes ont été modélisées à partir des données obtenues par presse à membrane pour L0 et par méthode évaporatoire de Wind pour L1 et L2. Sur L1 et L2, les courbes ne sont valides que dans la gamme tensiomètrique (de -50 hPa à -800 hPa)

2.5- Descriptions des expérimentations d'éluviation et d'illuviation

Dans cette partie, nous allons dans un premier temps présenter les différents protocoles expérimentaux et leur mise en place, puis dans un deuxième temps, les suivis et analyses réalisés ainsi que leur périodicité.

2.5.1 Les dispositifs expérimentaux utilisés

Pour les raisons discutées en introduction de ce chapitre, nous avons réalisé des expérimentations sur colonne avec succion à la base. La mise en place d'une telle succion n'est pas triviale lorsqu'il s'agit de collecter des particules en sortie de colonne. Nous nous sommes donc inspirés de deux dispositifs existant dans la littérature : l'utilisation d'un banc de sable à la base de la colonne, ou l'utilisation d'un système de dépression réalisé par une pompe à vide (Kjaergaard et al, 2004a). Ces deux dispositifs présentent chacun des avantages et des inconvénients quant à la facilité à mesurer les particules à la base de la colonne ou au contrôle au cours des événements pluvieux de la succion à la base de la colonne (tableau 2.10).

Tableau 2.10 : Avantages et inconvénients des deux dispositifs expérimentaux

Dispositif de succion	Avantage	Inconvénient
Banc de sable	Succion imposée par le sable proche de la réalité de terrain	Difficulté de détecter de très faibles quantités d'argile dans un grand volume de sable de quartz
Pompe	Particules directement mesurées, par turbidimétrie, dans la suspension recueillie à la base de la colonne	Drainage libre pendant la pluie puis succion de -300hPa après la pluie

2.5.1.1 L'expérimentation d'éluviation sur sol remanié L0

Le sol utilisé pour cette expérimentation est le sol du site de Heurtebise (L0).

Pour réaliser une succion à la limite inférieure du L0, nous avons fabriqué un cylindre de quartz pur (constitué à plus de 98,6 % de SiO_2), de texture limoneuse (nommé plus tard LQ). Il a été fabriqué à l'aide de deux quartz commerciaux (produits par la société Sibelco France) de granulométries différentes :

- 70 % d'un quartz provenant de la carrière de Bourron-Marlotte (77), avec un diamètre médian de 90 µm et un pH de 7.

- et 30 % d'un quartz provenant de la carrière de Compiègne (60), avec un diamètre médiant de 62 µm et un pH compris entre 7 et 8,5.

Pour réaliser les colonnes L0/LQ, des cylindres en plastique de 15 cm de haut et 13,5 cm de diamètre ont été remplis avec du matériel L0 ou LQ. Les cylindres de sol et de quartz sont superposés l'un sur l'autre et maintenus ensemble à l'aide d'un caoutchouc et d'un collier de serrage (figure 2.3). Pour que l'eau puisse s'écouler, une plaque percée de trous de 4mm de diamètre a été placée à la base du LQ (figure 2.3). Un filtre est également présent entre le quartz et la plaque pour éviter l'effondrement du cylindre. Pour récupérer l'eau qui s'écoule, les cylindres sont posés sur des bacs.

Figure 2.3 : Assemblage des cylindres et plaque de support

Les cylindres de sol ont été fabriqués à une masse volumique apparente de 1,45 g.cm^3 et une teneur en eau de 20 %. Le sol tamisé à 4 mm a été humidifié petit à petit à l'aide d'un vaporisateur pour atteindre l'humidité souhaitée. Il a ensuite été laissé 24 h à la chambre froide pour que la teneur en eau s'homogénéise, puis il a été tassé dans les cylindres. Pour que la masse volumique apparente soit la plus homogène possible, le remplissage des cylindres s'est fait en plusieurs couches (0-2 cm, 2-6 cm, 6-10 cm, 10-15 cm) à l'aide d'une masse (figure 2.4).

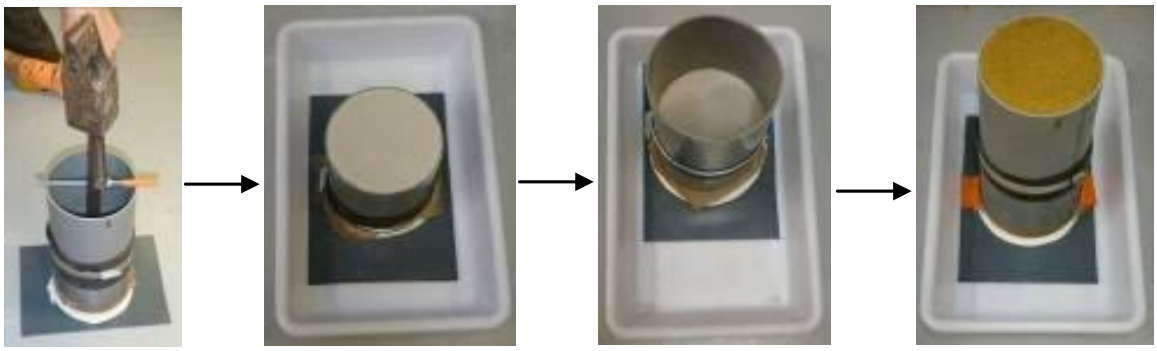


Figure 2.4 : Déroulement de la fabrication des cylindres

Pour cette expérimentation, nous avons fabriqué, pour l'intensité 20 mm/h, 13 colonnes nommées de A à M et pour l'intensité 6 mm/h, 6 colonnes nommées de AA à AF. Pour chaque intensité de pluie, une colonne est instrumentée avec des bougies poreuses pour suivre la chimie de la solution du sol et du quartz à 5, 12 et 25 cm de profondeur et un autre avec des tensiomètres pour suivre le potentiel matriciel du sol et du quartz à 5, 10, 14, 16, 20 et 25 cm de profondeur (tableau 2.11).

Tableau 2.11 : Récapitulatif des instrumentations présentes sur les différentes colonnes pour les deux intensités de pluie

	Colonne	
Intensité	Tensiomètre	Bougie poreuse
20mm/h	G	F
6mm/h	AA	AB

Pour ces expérimentations, une pluie est réalisée chaque semaine. Entre chaque pluie, les colonnes sont mises à sécher à l'étuve à 30 °C. Une nouvelle pluie est démarrée dès que le potentiel matriciel est revenu à son état initial (-300 hPa) pour le tensiomètre à 5 cm. A chaque arrêt, deux colonnes sont retirées de l'expérimentation. Pour la pluie 20 mm/h, 6 arrêts de colonnes sont prévus et pour la pluie 6 mm/h, 3 arrêts (figure 2.5).

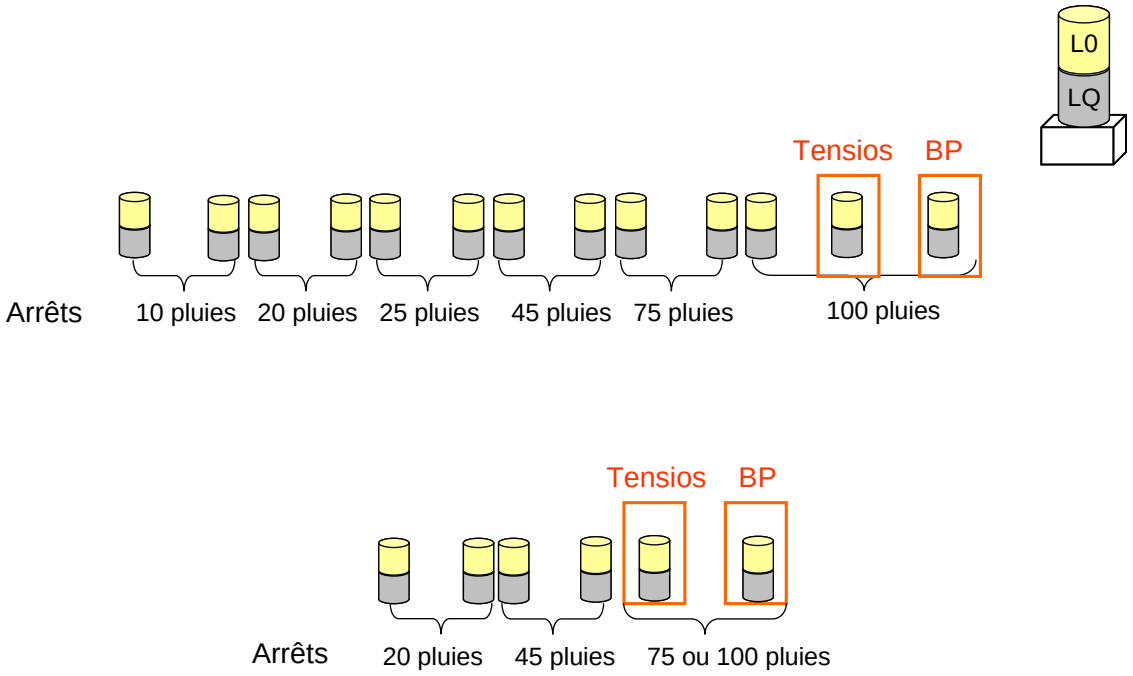


Figure 2.5 : Déroulement de l'expérimentation éluviation sur sol remanié pour les intensités de pluie 20 mm/h et 6 mm/h

2.5.1.2 L'expérimentation d'éluviation sur sol non perturbé L1

Pour cette expérimentation nous utilisons des cylindres de sol non perturbé prélevés sur le site la Brosse (L1).

Pour réaliser les colonnes, le cylindre de sol est fixé dans un entonnoir Büchner lui-même posé sur un erlenmeyer contenant 2 mL de $NaPO_3$ (150 g/L) pour éviter la floculation des argiles observée lors de tests préliminaires. Cet ensemble est mis sous vide grâce à une pompe à vide (figure 2.6). Un filtre en nylon de maille 110 µm est placé à la base des cylindres.

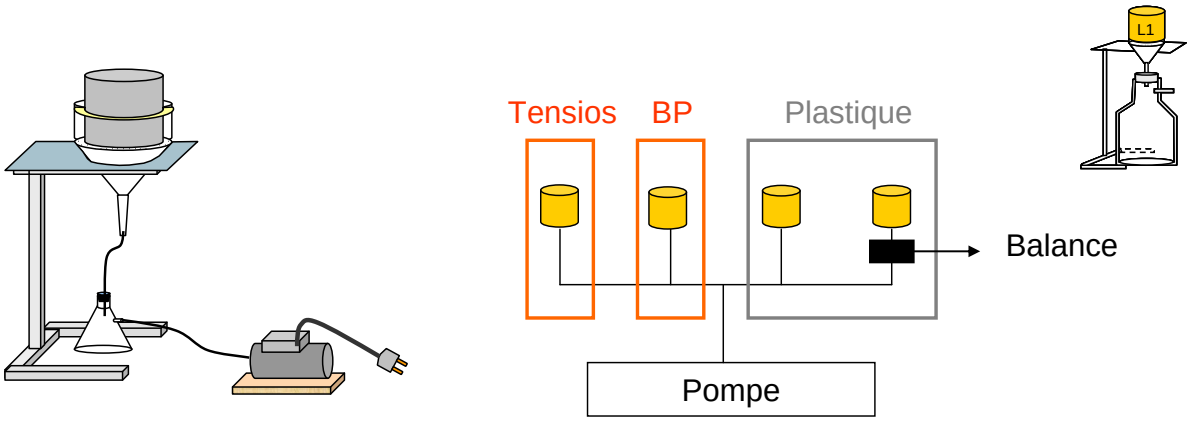


Figure 2.6 : Schéma de la mise en place des colonnes et instrumentations pour l'expérimentation d'éluviation avec le sol L1

Pour chacune des deux intensités, quatre colonnes de sol ont été analysées, nommées H, I, J, K pour l'intensité 20 mm/h et AG, AH, AI, AJ pour l'intensité 6 mm/h. Deux colonnes formées de cylindre en métal sont instrumentés : l'une avec des bougies poreuses à 5 et 12 cm de profondeur, et l'autre avec des tensiomètres à 5 et 10 cm de profondeur. Toutes les deux pluies, une des colonnes est placée sur une balance pour enregistrer la quantité d'eau drainée au cours du temps (tableau 2.12).

Tableau 2.12 : Récapitulatif des instrumentations présentes sur les différentes colonnes pour les deux intensités de pluies

	Colonne		
Intensité	Balance	Tensiomètre	Bougie poreuse
20mm/h	I	K	J
6mm/h	AJ	AG	AH

La pompe est mise en place à la fin de la simulation de pluie sur toutes les colonnes où une nappe s'est formée en surface. Cette pompe créée une dépression de -30 hPa. Dès que la nappe est absorbée, la pompe est coupée. Quand toutes les nappes sont résorbées, les colonnes sont mises à sécher à l'air libre. Dès que le potentiel matriciel est revenu à son état initial, -300 hPa, une nouvelle pluie est démarrée. Entre chaque pluie, il se passe 2 à 3 semaines (temps d'absorption des nappes + temps de séchage).

En tout, nous disposons de 8 colonnes de sol pour cette expérimentation : 4 pour l'intensité 20 mm/h et 4 pour l'intensité 6 mm/h (figure 2.6). Pour chaque intensité, 2 colonnes sont formées de cylindres en plastique (hauteur=15 cm ; diamètre=13,5 cm) et 2 de cylindres en métal (hauteur=15 cm ; diamètre=15 cm).

2.5.1.3 Les expérimentations d'illuviation L1/L2

Pour cette expérimentation, nous utilisons les cylindres de sol non perturbé prélevés sur le site de la Brosse (L1) et sur le site de la Pilotière (L2). Le L1 représente l'horizon d'éluviation (supérieur) tandis que le L2 représente l'horizon d'illuviation (sous jacent).

Avant de mettre en contact les deux cylindres, pour assurer une bonne jonction et une continuité du système, du sol (L2) a été émietté entre les 2 cylindres. Pour chaque intensité 12 colonnes L1/L2 ont été créées. Pour l'intensité 20 mm/h, les colonnes sont nommées de L à W et pour l'intensité 6 mm/h de AK à AV. Des bougies poreuses et des tensiomètres ont été implantés comme précédemment mais pour les profondeurs 5, 12, 20, 25 cm et 5,10, 20,

25 cm respectivement (tableau 2.13). Le protocole expérimental est le même que celui présenté au paragraphe 2.5.1.2 sur le sol L1. Les deux expérimentations sont d'ailleurs réalisées en même temps sous le simulateur de pluie.

Tableau 2.13 : Récapitulatif des instrumentations présentes sur les différentes colonnes pour les deux intensités de pluies

	Colonne		
Intensité	Balance	Tensiomètre	Bougie poreuse
20mm/h	P	N	O
6mm/h	AO	AK	AL

En tout nous disposons de 12 colonnes (L1+L2) pour l'intensité de pluie 20 mm/h et autant pour l'intensité de pluie 6 mm/h (figures 2.7 et 2.8). Pour chaque intensité, 2 colonnes sont en plastique, pour un passage possible au tomographe à rayons X, et les autres sont en métal.

Figure 2.7 : Photos de l'expérimentation

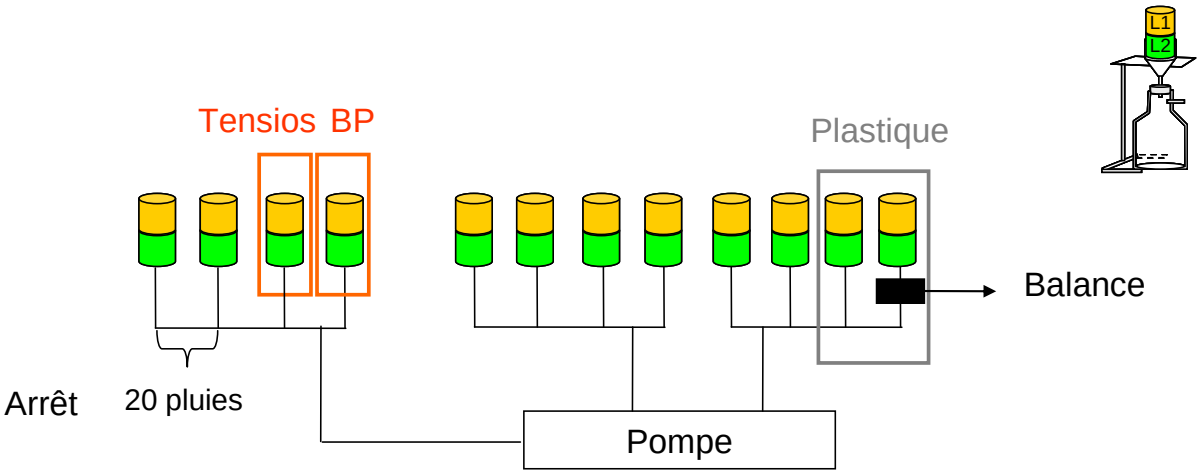


Figure 2.8 : Schéma de la mise en place des colonnes pour l'expérimentation d'illuviation avec les sols L1 et L2

2.5.2 Analyses et mesures réalisées au cours des différentes expériences

Dans le tableau 2.14 sont synthétisées toutes les mesures réalisées sur chaque expérimentation à différents pas de temps.

Le potentiel matriciel est enregistré en continu par une centrale d'acquisition Campbell pour chaque expérimentation, ce qui permet notamment de déterminer, à quel moment, une nouvelle pluie doit commencer. Seul un cylindre par expérimentation est équipé de tensiomètres. Pour l'expérimentation L0/LQ, tous les cylindres ont été pesés quotidiennement afin de suivre l'évolution du poids et donc l'évaporation de l'eau, ceci afin de vérifier l'homogénéité du séchage. Cela n'a pas été possible pour des raisons techniques pour les expérimentations L1 et L1/L2.

Avant chaque simulation de pluie, l'état de surface de chaque cylindre est décrit grâce à une typologie que nous avons développée spécifiquement pour notre projet (tableau 2.15) : présence ou non de croûte de surface, nombre de trous de vers de terre et nombre de fissures. Une fois cette description faite, un léger travail du sol est réalisé en surface, il a pour but de casser les éventuelles croûtes de surface.
Deux types des croûtes peuvent exister : les croûtes structurales et les croûtes sédimentaires. Les croûtes structurales résultent d'une ré-organisation in situ des fragments et particules produits par éclatement et désagrégation mécanique, sans déplacement important ni tri granulométrique (Le Bissonnais et Le Souder, 1995 ; Le Bissonnais, 1996). Les croûtes sédimentaires ou de dépôt résultent d'un déplacement et d'une ségrégation des particules en présence d'un excès d'eau (flaquage et ruissellement). Les mécanismes en causes sont essentiellement la dispersion et la désagrégation mécanique (Le Bissonnais et Le Souder, 1995).

Tableau 2.14 : Synthèse des différentes analyses réalisées pour chaque expérimentation

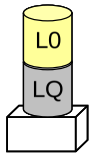
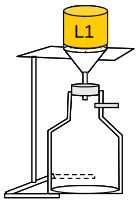
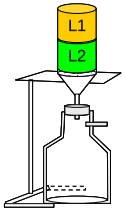
Expérimentations		Chaque jour	A chaque pluie	A chaque arret
Eluviation sur sol pertubé (L0/LQ)		Pesée les échantillons Suivi du potentiel matriciel	Description de l'état de surface des colonnes Analyse de l'eau des bougies poreuses	Analyse au DRX l'eau percolée Réalisation de la tomographie sur L0 Fabrication des lames minces sur L0 "Découpage" du LQ pour analyses (DRX, IR, Fe/Al)
Eluviation sur sol non pertubé (L1)		Suivi du potentiel matriciel	Description de l'état de surface des colonnes Analyse de l'eau des bougies poreuses Suivi de l'hydrogramme Pesée de l'eau percolée Mesure de la turbidité Analyse au DRX des particules	Arrêts seulement à la fin des expérimentations pour tomographie, lames minces et DRX
Illuviation sur sol non pertubé (L1/L2)		Suivi du potentiel matriciel	Description de l'état de surface des colonnes Analyse de l'eau des bougies poreuses Suivi de l'hydrogramme Pesée de l'eau percolée Mesure de la turbidité Analyse au DRX des particules	Fabrication des lames minces sur L1 et L2 "Découpage" du L2 pour DRX Réalisation de la tomographie lors du dernier arrêt

Tableau 2.15 : Typologie pour déterminer l'état de surface de chaque cylindre avant la pluie

Etat de surface	code
Pas de données	0
Croûte structurale + fissures + trous de vers de terre	1
Croûte structurale + trous de vers de terre	2
Croûte structurale + fissures	3
Croûte sedimentaire + fissures + trous de vers de terre	4
Croûte sedimentaire + trous de vers de terre	5
Croûte sedimentaire + fissures	6
Croûte structurale	7
Croûte sedimentaire	8

Après la pluie, l'eau récupérée dans les bougies poreuses est analysée. Sur chaque échantillon, des mesures de pH et de conductivité sont effectuées ainsi que les concentrations en cations et anions majeurs par chromatographie ionique (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cl^-, NO_3^-, SO_4^{2-}). Parfois il arrive que nous n'ayons pas assez d'eau dans les bougies poreuses pour réaliser ces mesures. Pour les expérimentations L1 et L1/L2, l'eau percolée dans les erlenmeyers est mesurée à la fin de la pluie et pesée à la fin de la période de ressuyage (dès que toutes les nappes en surface se sont absorbées). La concentration en particules est déterminée grâce à des mesures de turbidité. Enfin, la caractérisation minéralogique de ces échantillons est réalisée par la méthode de diffraction des rayons X (DRX) sur lame orientée normale et glycolée.

A chaque arrêt, différentes analyses sont réalisées sur les deux colonnes retirées. Les cylindres en plastique sont passés au tomographe à rayons X (General Electric Brightspeed Exel (4 coupes) au centre INRA de Nancy) avant le début des pluies et lorsqu'ils sont arrêtés. Des lames minces sont effectuées en surface et en profondeur. Ces lames sont observées en microscopie optique pour quantifier la porosité par analyse d'image et déterminer la microstructure du sol. Elles vont permettre de voir si des dépôts d'argiles se sont formés à la surface des pores.

Les cylindres de LQ et de L2 sont découpés en 5 sous échantillons de 3 cm d'épaisseur dans lesquels la smectite provenant respectivement du L0 et du L1 est quantifiée par différentes méthodes.

2.6- Conclusion

Dans cette étude deux processus sont analysés : l'éluviation et l'illuviation. Pour cela trois expérimentations ont été mises en place au laboratoire :

- deux expérimentations pour représenter le processus d'éluviation, avec du sol remanié L0 et du sol non perturbé L1 et,
- une expérimentation pour représenter le processus d'illuviation avec deux sols non perturbés L1 et L2.

Pour recréer ces processus, de la pluie a été appliquée à la surface des colonnes avec deux intensités : 20 mm/h et 6 mm/h. Pour pouvoir comparer l'effet de l'intensité de la pluie, dans les deux cas, la quantité d'eau apportée est identique (environ 30 mm). Entre chaque pluie les colonnes sont mises à sécher et avant de démarrer toute nouvelle pluie le potentiel matriciel du sol doit être revenu à son état initial, qui a été fixé en début d'expérimentation à -300 hPa. Après X événements pluvieux, les colonnes sont arrêtées et analysées selon diverses méthodes pour quantifier le départ (éluviation) ou l'arrivée de particules fines (illuviation).

III. Variabilité spatio-temporelle des conditions aux limites et initiales

Le dispositif expérimental décrit précédemment repose sur des conditions aux limites supérieure et inférieure (pluie, succion à la base des colonnes) et des conditions initiales (potentiel matriciel, état de surface) prédéfinies et identiques pour chaque colonne et chaque événement pluvieux. Néanmoins, la réalité expérimentale est plus complexe, nous allons donc, dans un premier temps analyser notre capacité expérimentale à reproduire ces conditions pour les différentes colonnes et au cours des différentes pluies afin de mettre en évidence d'éventuelles dérives temporelles ou des colonnes atypiques.

3.1- Caractéristiques des conditions aux limites supérieure et inférieure

3.1.1 Condition à la limite supérieure : intensité de pluie et quantité de pluie

Pour des raisons de mise au point expérimentale, les différentes expérimentations n'ont pas débuté en même temps. Leur départ différé (figure 2.9) et la nécessité ultérieure de réaliser une seule pluie d'une intensité donnée pour les différentes expérimentations nous ont conduit à élargir la surface utilisée sous le simulateur de pluie de 0,63 m² à 2,3 m² et à modifier les réglages pour pouvoir délivrer successivement des intensités de pluie de 20 mm/h et de 6 mm/h.

Concrètement, cela se traduit, pour l'intensité 20 mm/h sur l'expérimentation L0/LQ, débutée en premier, par une augmentation à partir de la pluie 22 de l'intensité moyenne reçue par les colonnes et de la variabilité inter-colonne qui passent d'une intensité moyenne de 21,3 ± 1,1 mm/h à 25,0 ± 3,5 mm/h après la pluie 22 (figure 2.10a et tableau 2.16). Lors de la pluie 41, l'intensité a été plus élevée que lors des autres pluies. Nous avons considéré qu'il n'y a pas eu d'incidence majeure de cet événement sur l'expérimentation. Pour les expérimentations sur les colonnes L1 et L1/L2, les modifications de réglages effectuées sur le simulateur de pluie se traduisent par une très forte disparité des intensités de pluie reçues lors de la première pluie (figure 2.10a).

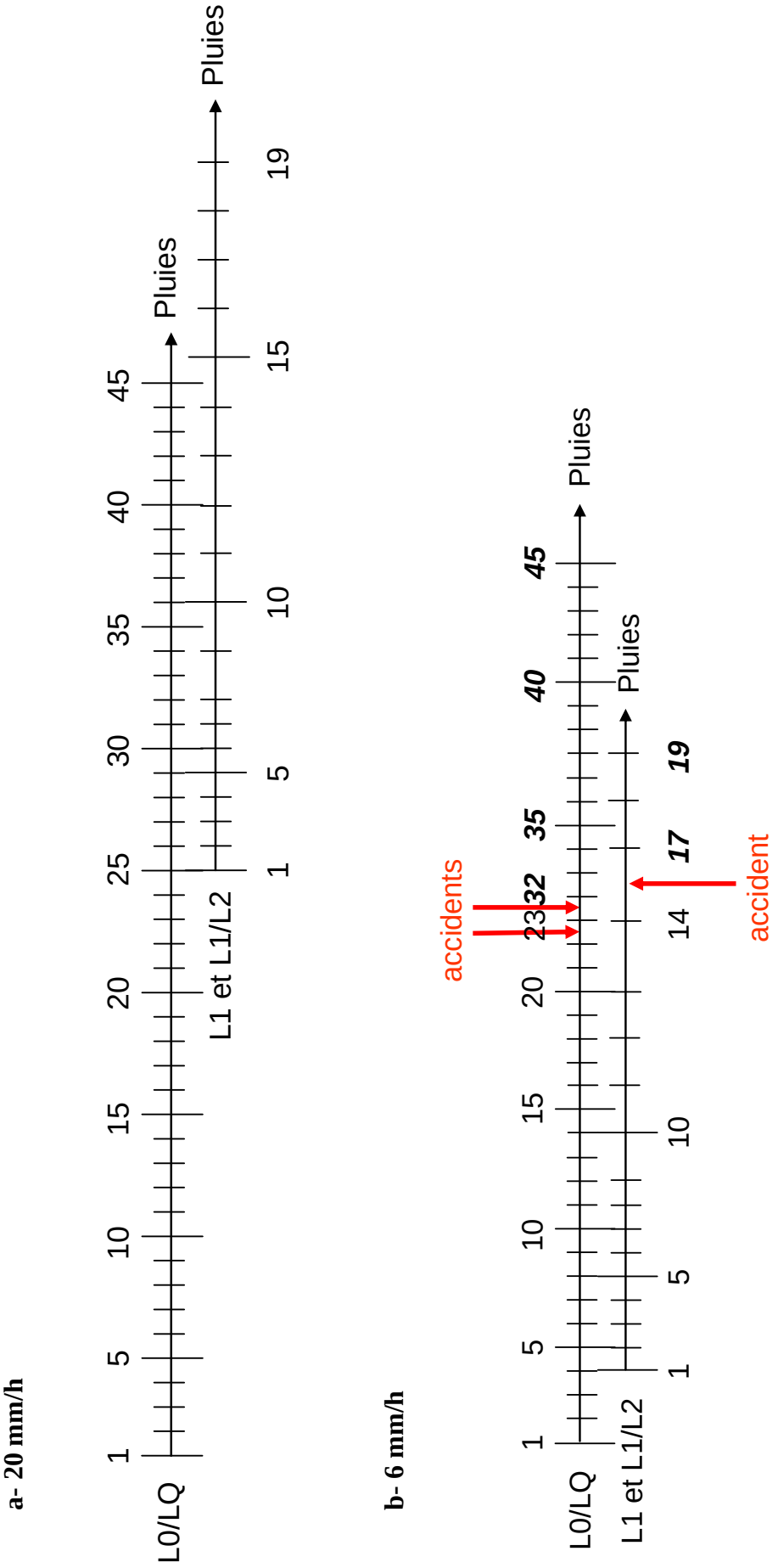


Figure 2.9 : Déroulement temporel des expérimentations pour a) l'intensité 20 mm/h et b) l'intensité 6 mm/h. Les pluies en gras et italiques ont été renommées suite à l'accident survenu sur le simulateur de pluie

Enfin, les colonnes I de l'expérimentation L1 et P de l'expérimentation L1/L2 ont reçu des intensités moyennes et modales légèrement plus faibles car elles sont pesées régulièrement lors des simulations de pluies pour le suivi de l'hydrogramme et sont donc souvent positionnées en bordure de l'espace de simulation de pluie. Leurs quantités de pluie moyenne (et modale) par pluie et totale sont, de ce fait, inférieures à celles des autres colonnes (tableaux 2.17 et 2.18).

Néanmoins, quelle que soit l'expérimentation considérée, ces intensités de pluies restent proches de la valeur de consigne de 20 mm/h.

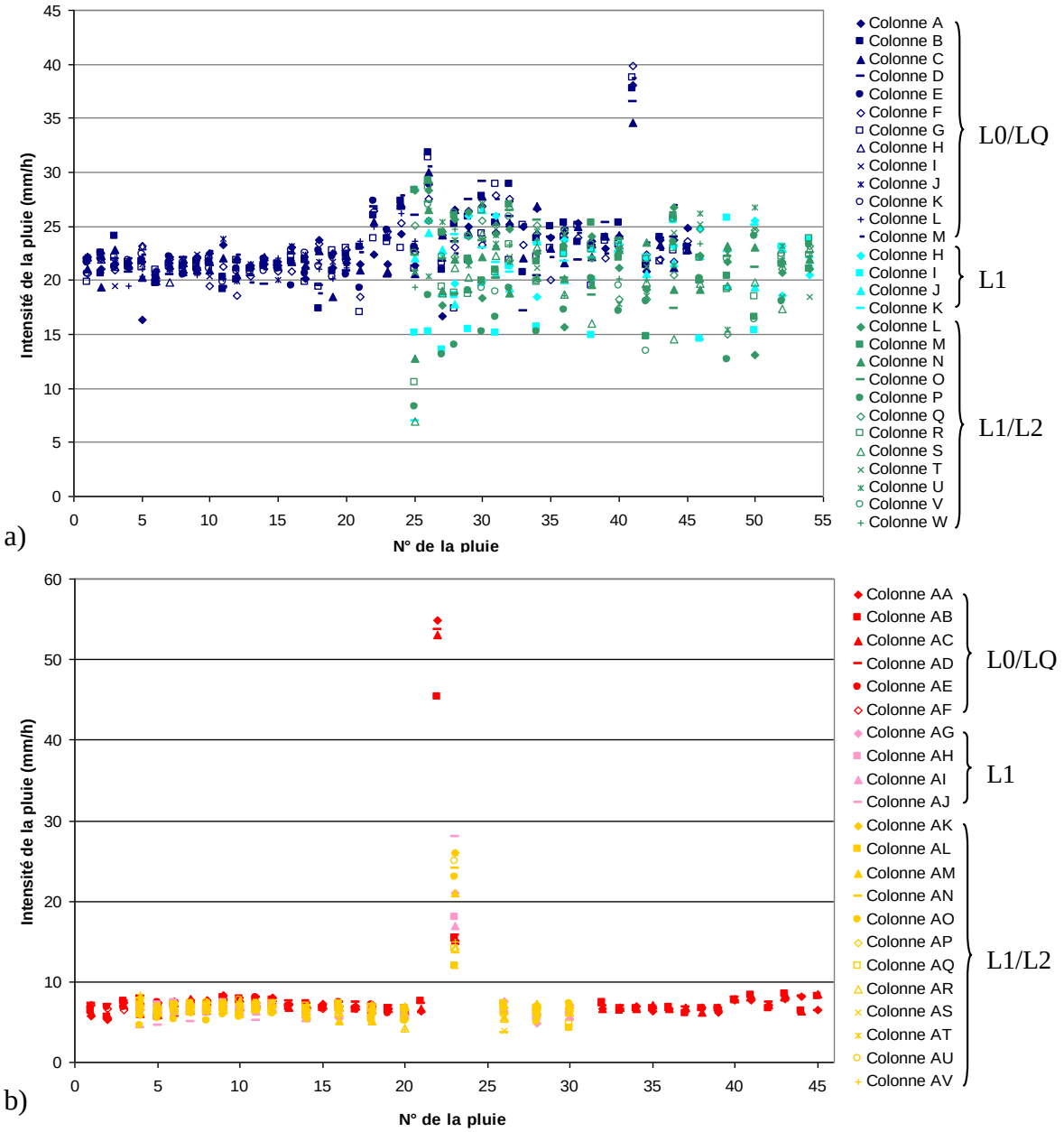


Figure 2.10 : Evolution temporelle des intensités de pluies reçues pour les différentes colonnes des différentes expérimentations pour a) l'intensité 20 mm/h et de b) l'intensité 6 mm/h. Les numéros de pluies présentés en abscisse correspondent au n° de pluie de l'expérimentation L0/LQ

Tableau 2.16 : Intensités de pluies et quantités d'eau reçues par les différentes colonnes de l'expérimentation L0/LQ

Colonne	Intensité de pluie (mm/h)		Quantité de pluie (mm)					
					Total			
	Moyenne[1]	Modale	Moyenne[2]	Modale	10 pluies	20 pluies	25 pluies	45 pluies
A	23±3	22	35±5	34	300	625	795	1562
B	23±3	23	35±5	34	303	626	796	1581
C	23±3	22	35±4	33	305	626	792	1554
D	23±3	22	34±5	33	296	618	783	1551
E	23±3	22	35±5	34	307	636	805	1577
F	23±3	23	35±5	34	300	626	795	1558
G	23±3	22	34±5	33	294	615	780	1523
H	21±1	22	32±2	33	322	-	-	-
I	21±1	22	32±1	33	320	-	-	-
J	22±1	22	32±1	33	314	648	-	-
K	21±1	21	32±1	32	310	638	-	-
L	22±2	22	33±2	32	308	636	820	-
M	22±2	21	33±3	32	306	632	819	-
AA	7±1	7	35±3	35	-	649	-	1561
AB	7±1	7	34±4	34	-	645	-	1524
AC	7±1	7	35±4	34	-	650	-	1562
AD	7±1	7	35±3	36	-	673	-	1595
AE	7±0,5	7	35±2	34	-	691	-	-
AF	7±1	7	36±3	35	-	716	-	-

[1] *Les événements 22 et 23 de l'intensité 6 mm/h sont particuliers : ils n'ont donc pas été pris en compte dans le calcul de l'intensité de pluie moyenne.*

[2] *Les événements 22 et 23 de l'intensité 6 mm/h sont particuliers : ils ont donc été considérés comme l'équivalent de 10 événements pluvieux dans le calcul de la quantité de pluie moyenne.*

Tableau 2.17 : Intensités de pluies et quantités d'eau reçues par les différentes colonnes de l'expérimentation L1

Colonne	Intensité de pluie (mm/h)		Quantité de pluie (mm)		
	Moyenne[1]	Modale	Moyenne[2]	Modale	Total pour 19 pluies
H	23±3	23	34±4	34	643
I	19±4	16	28±6	23	528
J	22±2	22	33±3	33	625
K	21±4	23	32±6	34	610
AG	7±1	7	33±4	34	630
AH	6±1	7	32±3	33	613
AI	6±1	7	32±3	33	606
AJ	6±1	6	32±4	29	600

[1] *L'événement 14 de l'intensité 6 mm/h est particulier : il n'a donc pas été pris en compte dans le calcul de l'intensité de pluie moyenne.*

[2] *L'événement 14 de l'intensité 6 mm/h est particulier : il a donc été considéré comme l'équivalent de 3 événements pluvieux dans le calcul de la quantité de pluie moyenne.*

Pour l'intensité de 6 mm/h, les intensités de pluie réelles sur l'ensemble des colonnes sont proches de l'intensité de consigne, excepté pour une pluie pour les expérimentations L1/L2 et L1 et deux pluies pour l'expérimentation L0/LQ (figure 2.10a) : lors de ces événements pluvieux, un incident technique sur le simulateur n'a pas permis de maintenir l'intensité de consigne et les colonnes ont reçu selon les expérimentations de deux (L1/L2) à dix (L0/LQ) fois plus d'eau que prévu.

Par ailleurs, comme pour l'intensité 20 mm/h, les colonnes situées sur la balance une fois sur deux (AJ pour L1 et AO pour L1/L2) reçoivent un peu moins d'eau que les autres. Cette différence est néanmoins moins marquée que dans le cas de l'intensité 20 mm/h (tableaux 2.17 et 2.18).

Tableau 2.18 : Intensités de pluies et quantités d'eau reçues par les différentes colonnes de l'expérimentation L1/L2

Colonne	Intensité de pluie (mm/h)		Quantité de pluie (mm)		
	Moyenne[1]	Modale	Moyenne[1]	Modale	Total pour 19 pluies
L	22±4	22	33±6	33	633
M	23±4	22	34±6	33	645
N	21±3	22	32±4	33	602
O	22±3	22	32±4	32	616
P	18±4	18	26±6	27	500
Q	23±3	24	34±4	36	647
R	21±4	22	32±6	33	609
S	20±5	20	30±7	30	577
T	22±2	23	34±3	34	637
U	22±3	22	33±5	33	636
V	22±3	22	33±5	33	624
W	22±3	22	33±5	33	629
AK	7±1	7	34±3	34	655
AL	6±1	6	30±4	32	565
AM	7±1	7	33±4	35	630
AN	7±1	7	34±5	34	641
AO	6±1	6	31±4	29	585
AP	6±1	7	31±3	34	596
AQ	6±1	7	31±4	34	594
AR	6±1	7	32±4	35	600
AS	7±1	7	35±4	34	661
AT	6±0,4	7	32±2	35	610
AU	7±1	7	35±3	34	658
AV	6±1	7	32±5	35	608

[1] *L'événement 14 de l'intensité 6 mm/h est particulier : il n'a donc pas été pris en compte dans le calcul de l'intensité de pluie moyenne.*

[2] *L'événement 14 de l'intensité 6 mm/h est particulier : il a donc été considéré comme l'équivalent de 3 événements pluvieux dans le calcul de la quantité de pluie moyenne.*

A la fin de nos expérimentations, les colonnes ont subi l'équivalent de 45 événements pluvieux pour certaines colonnes L0/LQ (certaines ayant été arrêtées au fur et à mesure) et de 19 événements pluvieux pour les colonnes L1 et L1/L2. L'incident de la forte pluie sur l'expérimentation à 6 mm/h correspond :

- à la pluie 14, pour les expérimentations L1 et L1/L2, qui a apporté trois fois plus d'eau que prévu. Cette pluie est considérée dans la suite de ce travail comme l'équivalent de 3 pluies, ce qui explique l'absence des pluies 15 et 16 dans les différentes figures et tableaux des séquences de pluies à 6 mm/h.
- aux pluies 22 et 23, pour l'expérimentation L0/LQ, qui ont apporté dix fois plus d'eau que prévu, ce qui explique, comme précédemment l'absence des pluies 24 à 31 dans les différentes figures et tableaux des séquences de pluies à 6 mm/h.

Ainsi, si l'on compare les intensités de pluie reçues par l'ensemble des colonnes des différentes expérimentations (tableaux 2.16, 2.17, et 2.18), on constate que celles-ci sont significativement différentes entre le groupe « 20 mm/h » et le groupe « 6 mm/h ». Ces deux modalités sont donc réellement différentes.

En conclusion on retiendra que :

- les intensités de pluie effectives reçues par chaque colonne pour chaque événement pluvieux sont proches des intensités de consigne, respectivement 20 mm/h et 6 mm/h, et que ces deux modalités sont significativement différentes.
- les colonnes positionnées sur les balances ont reçu des quantités de pluie inférieures à celles des autres colonnes, notamment pour l'intensité 20 mm/h.
- des événements de l'intensité 6 mm/h sont exceptionnels. Ils ont apporté trois à dix fois plus d'eau que les autres événements pluvieux pour les expérimentations L1 et L1/L2 d'une part et L0/LQ de l'autre.

3.1.2 Condition à la limite inférieure : la succion appliquée à la base de chaque colonne.

Selon l'expérimentation, la succion appliquée à la base des colonnes diffère. Dans les expérimentations L1 et L1/L2 cette succion est appliquée à l'aide d'une pompe alors que dans le cas de l'expérimentation L0/LQ c'est une colonne de limon de quartz qui exerce la succion à la base du sol L0. Nous séparerons donc l'analyse de ces deux groupes d'expérimentation avant de les comparer.

3.1.2.1 Expérimentations L1 et L1/L2

Dans ces expérimentations, la condition à la limite inférieure est une succion appliquée par une pompe branchée à la base des colonnes dès qu'une nappe est présente en surface. La pompe est mise en route dès la fin de la pluie, et est stoppée lorsque la nappe a disparu. La durée de pompage est donc variable selon les colonnes et selon les événements pluvieux. La valeur initiale de pompage est de 30 hPa en valeur absolue ; lorsque le temps de pompage devient très long, la dépression à la base de la colonne est progressivement augmentée (50 hPa, 100 hPa et ce jusque 220 hPa maximum). Pour estimer l'intensité de la succion appliquée à la base des différentes colonnes, nous avons calculé un indice d'énergie de pompage de la façon suivante[1] :

Energie de pompage (hPa*h)= intensité de la succion (hPa) X durée du pompage (h)

D'une façon générale, lors des 10 premiers événements pluvieux, la succion artificielle est faible et les colonnes sont souvent en situation de drainage libre (figure 2.11). Elles présentent un comportement relativement homogène qui diverge ensuite au cours des pluies suivantes. La succion augmente significativement pour certaines colonnes. On peut alors différencier les comportements suivants :

- des colonnes dont la succion artificielle ne dépasse que rarement 30 hPa et 100 h de succion. Ces colonnes atteignent une énergie de pompage cumulée relativement faible, inférieure à 20000 hPa*h. C'est le cas des colonnes L1 H, I et K à 20 mm/h, L1/L2 L, M, N, P, T, U, V, W à 20 mm/h, L1 AJ à 6 mm/h et L1/L2 Al, AM, AN, AO, AP, AQ, AS, AV à 6 mm/h (figures 2.12, 2.13 et 2.14). Ce groupe représente 20 colonnes sur les 32 colonnes au total.
- des colonnes dont la succion artificielle est parfois supérieure à 30 hPa, mais généralement inférieure à 100 hPa, ou pour lesquelles les durées de succion à 30 hPa dépassent 200 h. Ces colonnes atteignent une énergie de pompage cumulée comprise entre 20000 et 40000 hPa*h. C'est le cas des colonnes L1 AH et AI à 6 mm/h et L1/L2 AK, AR, AT et AU à 6 mm/h (figure 2.12 et 2.14). Ce groupe représente 6 colonnes sur les 32 colonnes au total.
- des colonnes dont la succion artificielle dépasse souvent 100 hPa, avec deux cas de figure : une énergie de pompage cumulée de l'ordre de 60000 à 90000 hPa*h (colonne L1 J à 20 mm/h, L1/L2 R et O à 20 mm/h et L1 AG à 6 mm/h) ; une énergie de

[1] Cette donnée n'a pas pu être déterminée pour les premières pluies pour lesquelles la durée du pompage n'a pas été enregistrée

pompage cumulée supérieure à 120000 hPa*h (colonnes L1/L2 Q et S à 20 mm/h). Ce groupe représente 6 colonnes sur les 32 colonnes au total (figure 2.12, 2.13 et 2.14).

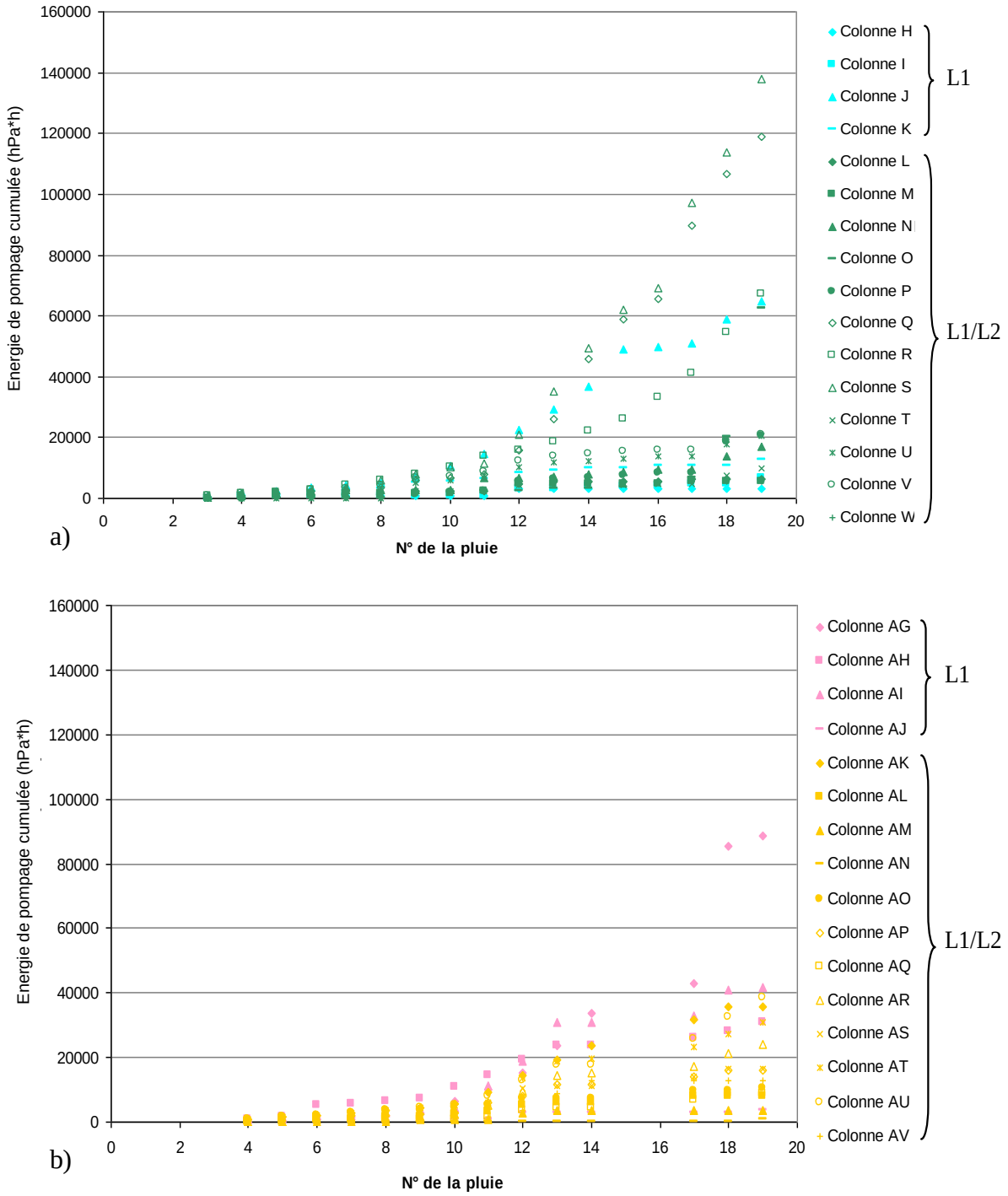


*Figure 2.11 : Energie de pompage cumulées (hPa*h) pour chaque colonne des expérimentations L1 et L1/L2 pour a) l'intensité 20 mm/h et b) l'intensité 6 mm/h*

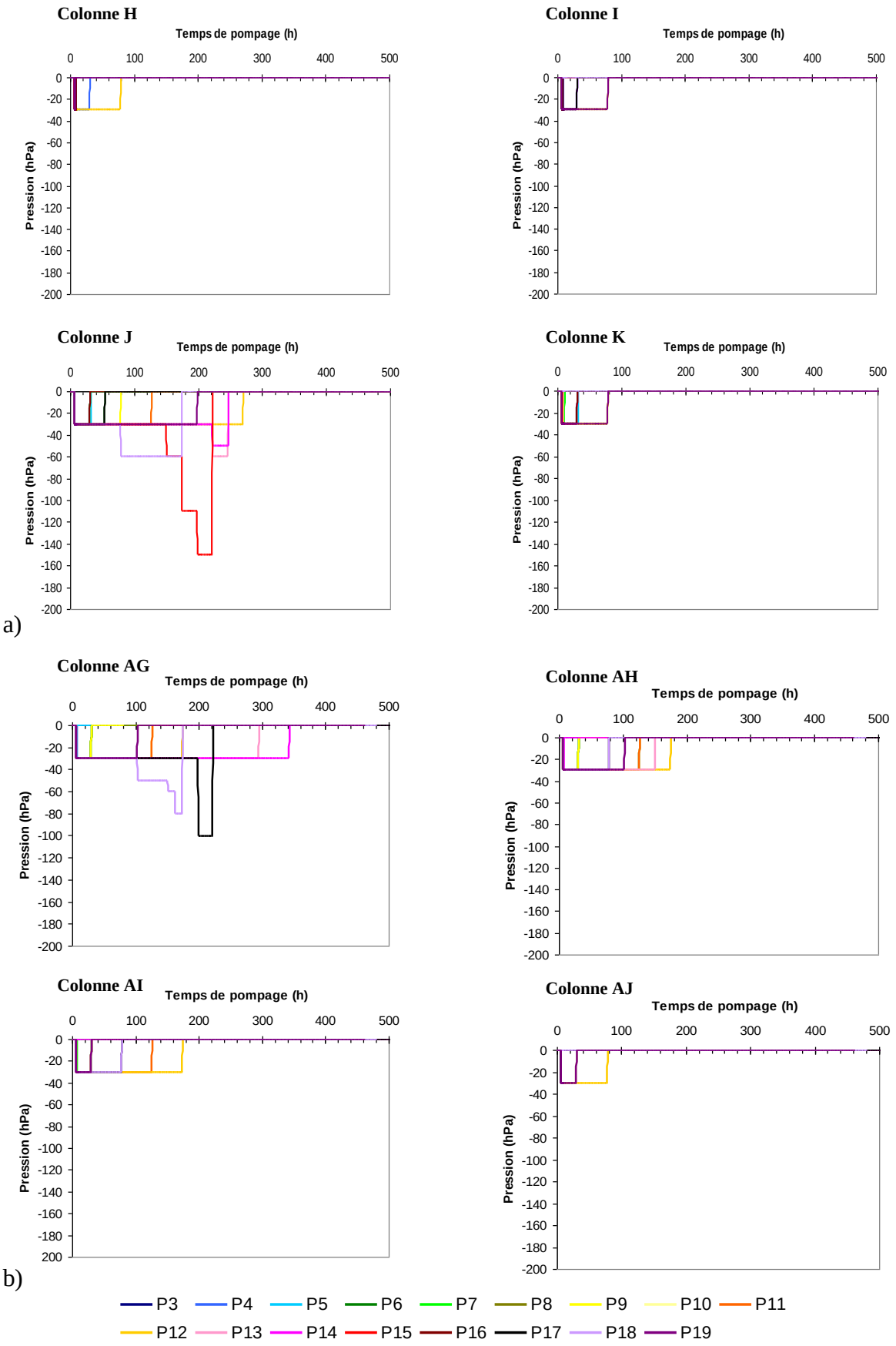


Figure 2.12 : Evolution temporelle des temps de pompage et des dépressions appliquées à la base des colonnes L1 de a) l'intensité 20 mm/h b) de l'intensité 6 mm/h

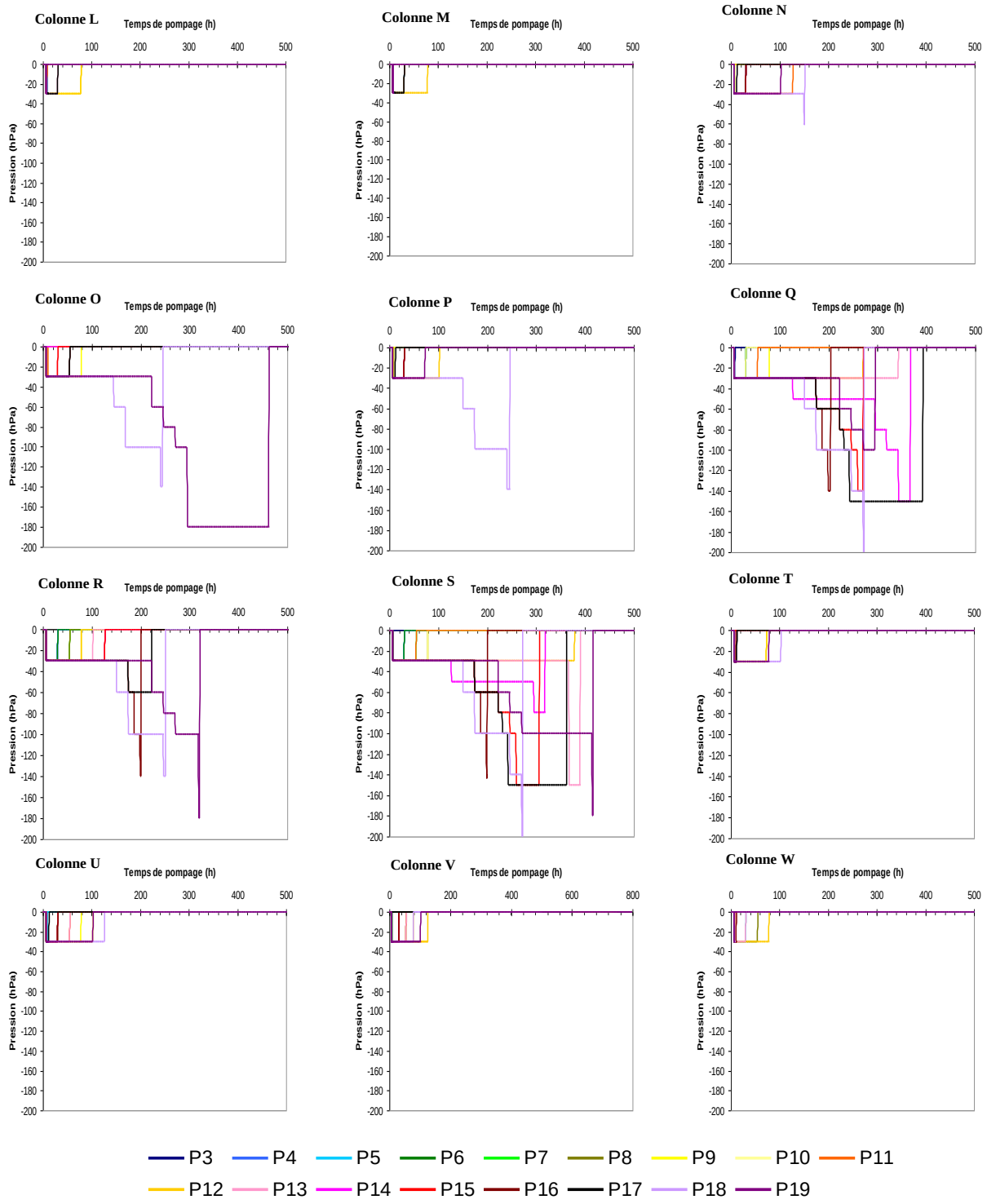


Figure 2.13: Evolution temporelle des temps de pompage et des dépressions appliquées à la base des colonnes L1/L2 de l'intensité 20 mm/h

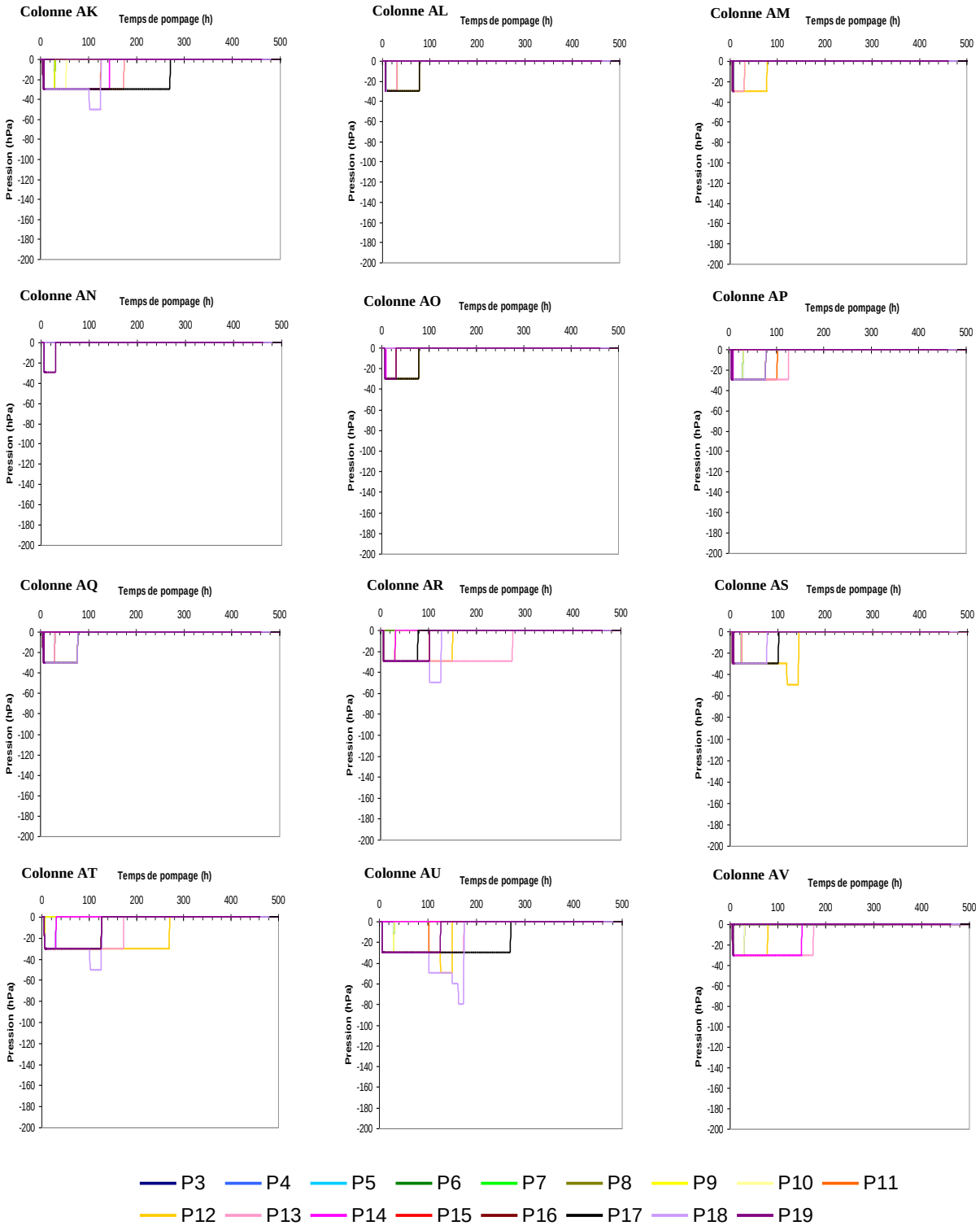


Figure 2.14 : Evolution temporelle des temps de pompage et des dépressions appliquées à la base des colonnes L1/L2 de l'intensité 6 mm/h

Une dernière distinction peut être faite entre des colonnes dont l'énergie de pompage cumulée augmente relativement régulièrement au cours du temps (ce qui est le cas de la plupart des

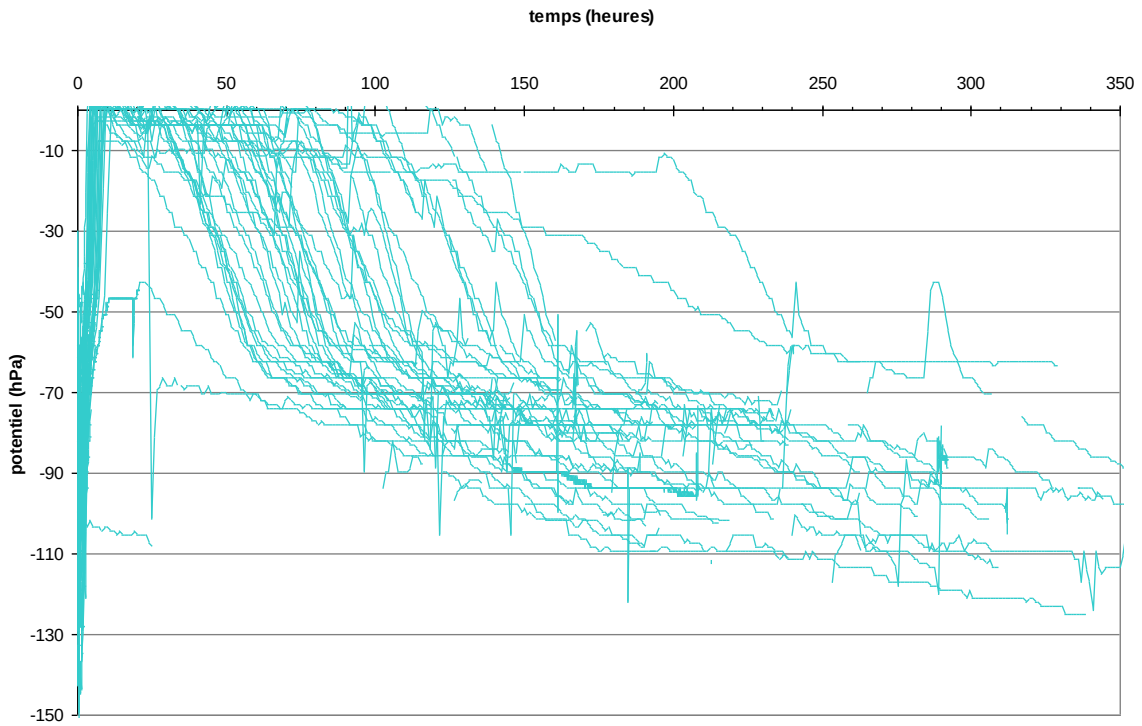
colonnes) et des colonnes dont l'énergie de pompage cumulée augmente brutalement au cours des dernières pluies (colonnes L1/L2 O à 20 mm/h et L1 AG à 6 mm/h). Dans ce dernier cas, il est possible que cette augmentation brutale de l'énergie de pompage corresponde à un colmatage de la porosité de la colonne.

On retiendra que les énergies de pompage restent relativement limitées jusqu'à la pluie 10 quelles que soient l'expérimentation ou l'intensité considérée, les colonnes sont alors souvent en situation de drainage libre. Au contraire, la succion artificielle devient plus importante lors des événements pluvieux suivants avec des divergences de comportements entre les colonnes sans lien notable avec l'intensité de pluie ou la taille de la colonne (L1 versus L1/L2). Il semble que ce soit la variabilité de la structure de la colonne qui soit alors l'élément dominant.

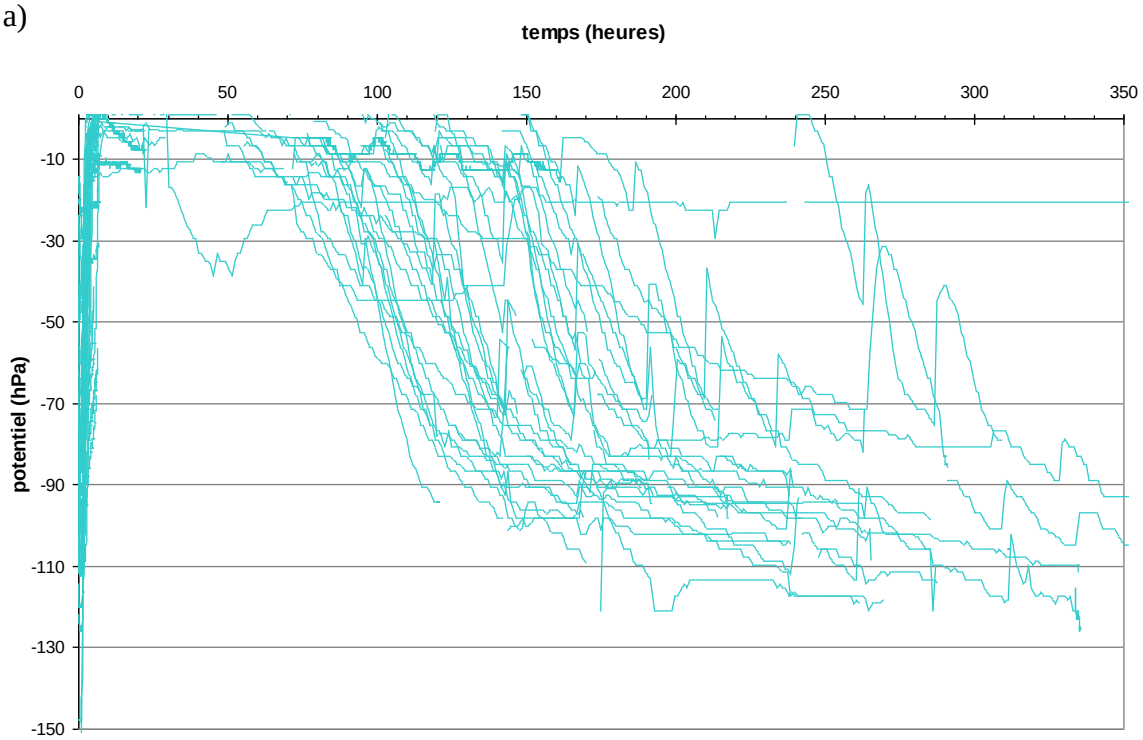
3.1.2.2 Expérimentations L0/LQ

Dans cette expérimentation, la condition à la limite inférieure est appliquée par un limon de quartz comme expliqué dans la partie I de ce chapitre. La succion appliquée par ce limon de quartz sur la colonne de sol remanié L0 est suivie, au cours du temps, à l'aide d'un tensiomètre situé à 5 cm de profondeur dans le LQ. Pour les deux intensités, le potentiel matriciel dans le LQ est d'environ -90 hPa avant le début des événements pluvieux. Les colonnes sont environ une trentaine d'heures à ce potentiel avant le début de la pluie suivante. Après le début de la pluie, la saturation est généralement atteinte après 5 et 7 h (figure 2.15 et tableau 2.19). La succion appliquée par le limon de quartz sur les colonnes diffère selon l'intensité de pluie par rapport :

- à la durée pendant laquelle le limon de quartz est saturé qui est trois fois plus longue dans le cas de l'intensité 6 mm/h par rapport à 20 mm/h ;
- au temps nécessaire pour dessaturer le système (plus long dans le cas de l'intensité 20 mm/h) ;



a)



b)

Figure 2.15 : Evolution temporelle du potentiel matriciel au cours des différents cycles « pluie-séchage » pour le tensiomètre situé à 5 cm dans le LQ pour a) l'intensité 20 mm/h et b) l'intensité 6 mm/h

Tableau 2.19 : Eléments descriptifs de l'évolution temporelle du potentiel matriciel au cours des cycles « pluie-séchage » pour le tensiomètre situé à 5 cm dans le LQ

Intensité	Temps pour arriver à saturation (h)	Temps passé à saturation (h)	Temps nécessaire pour dessaturer (h)	Valeur minimum de la succion (hPa)	Temps passé à cette valeur (h)
20mm/h	7 ± 2	35 ± 28	156 ± 70	93 ± 27	29 ± 26
6mm/h	5,5 ± 1,7	100 ± 43	107 ± 63	94 ± 22	36 ± 57

L'éenrgie de pompage cumulée calculée sur le même principe que pour les expérimentations L1 et L1/L2 est de l'ordre de 400 000 hPa*h après 45 pluies pour les deux intensités de pluie et autour de 150 à 200 000 hPa*h après 20 pluies (figure 2.16).

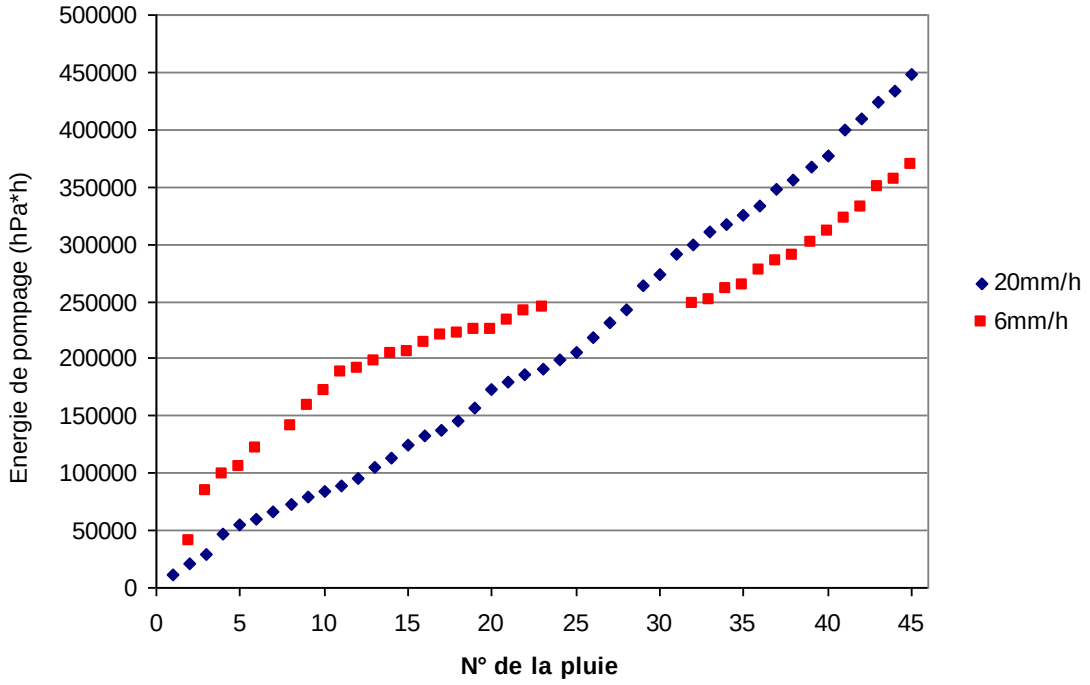


*Figure 2.16 : Energie de pompage cumulée (hPa*h) pour les intensités 20 mm/h et 6 mm/h des expérimentations L0/LQ*

3.1.2.3 Comparaison des deux conditions à la limite inférieure entre les différentes expérimentations

Pour les colonnes L1 et L1/L2, une dépression de 30 hPa est appliquée à la base des colonnes dès la fin de la pluie alors que pour les colonnes LO/LQ le potentiel est de 0 hPa et la condition à la limite est donc un drainage libre. Dès que la nappe est absorbée en surface des colonnes L1 et L1/L2, après une dépression d'une centaine d'heures à -30 hPa dans la majorité des cas, la pompe est arrêtée et la condition à la limite inférieure devient un drainage libre. Pour les colonnes L0/LQ, une potentiel d'environ 90 hPa est atteint environ 200 h après

la pluie. Ainsi, la condition à la limite inférieure entre les deux expérimentations est inversée au cours du temps. Pour un nombre de pluies équivalent (19 pluies), l'énergie de pompage cumulée pour l'expérimentation L0/LQ est légèrement supérieure à celle de la colonne S (L1/L2, 140000 hPa*h) qui est la colonne qui a la plus forte énergie de pompage sur l'ensemble des colonnes L1 et L1/L2 20 mm/h. Ainsi, pour les deux intensités des expérimentations L0/LQ, les énergies de pompage sont nettement plus importantes que pour la majorité des colonnes L1 et L1/L2.

3.2- Caractéristiques des conditions initiales

3.2.1. Evolution de l'état de surface des colonnes au cours des événements pluvieux

L'état de surface de chaque colonne est noté avant chaque nouvelle pluie pour les expérimentations L1 et L1/L2. Les différentes classes d'état de surface sont rappelées dans le tableau 2.20. Plus le chiffre est élevé et moins la surface est percolante.

Tableau 2.20 : Différentes classes d'état de surface des colonnes

Etat de surface	code
croûte structurale + fissures + trous de vers de terre	1
croûte structurale + trous de vers de terre	2
croûte structurale + fissures	3
croûte sédimentaire + fissures + trous de vers de terre	4
croûte sédimentaire + trous de vers de terre	5
croûte sédimentaires + fissures	6
croûte structurale	7
croûte sedimentaire	8

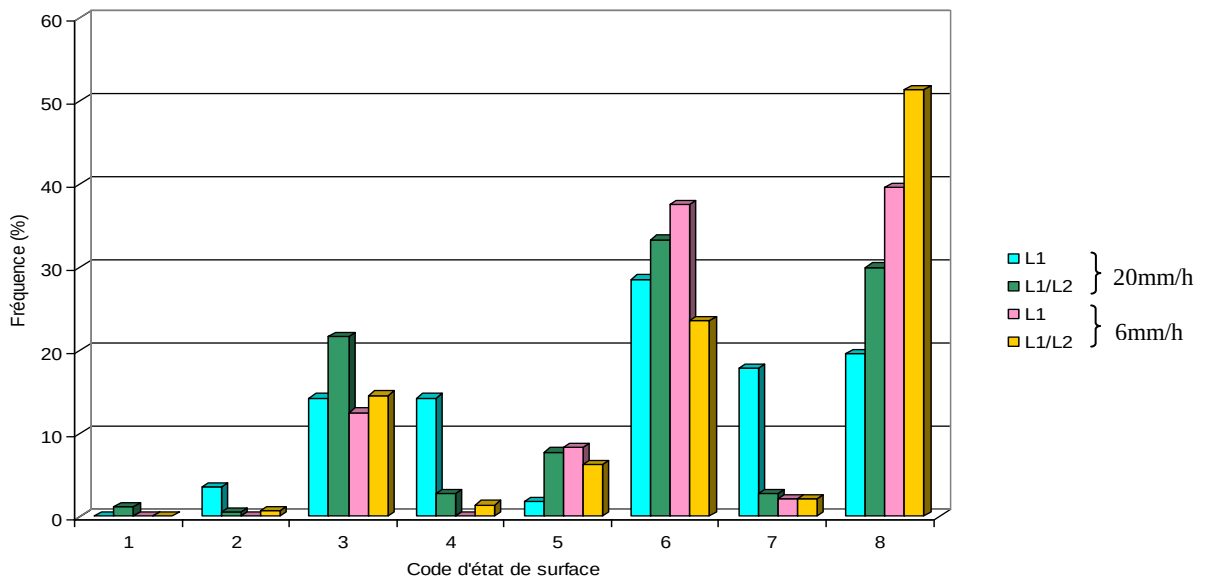


Figure 2.17: Distribution des différentes classes d'état de surface pour les expérimentations L1 et L1/L2

Les croûtes structurales (classes 2, 3 et 7) sont plus fréquemment représentées pour l'intensité 20 mm/h que pour l'intensité 6 mm/h (figure 2.17) avec une différence plus marquée pour les colonnes de l'expérience L1 que pour celles de L1/L2. Au contraire, les croûtes sédimentaires sont plus fréquentes pour l'intensité 6 mm/h. Pour cette intensité, le milieu est moins perturbé par la pluie (moins de splash) et les particules ont probablement plus le temps de se redéposer d'où des croûtes sédimentaires plus fréquentes pour cette intensité de pluie. Il semble également que la présence de fissures en surface des colonnes soit plus fréquente pour l'intensité 20 mm/h que pour l'intensité 6 mm/h. Ainsi même pour une faible intensité de pluie, la teneur en limon des échantillons (58,7 %) les rend sensibles à la dégradation.

On n'observe pas de nette évolution de l'état de surface avec le nombre de pluies, sans doute du fait qu'avant chaque pluie, un léger labour de surface est réalisé à la surface de chaque colonne.

3.2.2. Potentiel matriciel dans le sol au début de chaque événement pluvieux

A l'exception de la pluie 1 pour laquelle les colonnes sont à la teneur en eau de prélèvement, notre cahier des charges expérimental impose que la pluie soit déclenchée lorsque le potentiel matriciel du sol à 5 cm de profondeur dans le L1 est de -300 hPa. Les variations du potentiel matriciel au début de la pluie ont été enregistrées sur les colonnes instrumentées figure 2.18. On observe quelques variations autour de la valeur de consigne, dues essentiellement à des

contraintes techniques, lorsque le potentiel de -300 hPa est atteint en dehors des heures ouvrables et que la simulation de pluie ne peut être démarrée. Cependant, ces variations, inférieures à -100 hPa pour les expérimentations L1 et L1/L2, ne sont pas significatives sur un plan physique. Pour les expérimentations L0/LQ positionnées à l'étuve lors de la phase d'assèchement, la variabilité par rapport à la valeur de consigne est plus importante, avec des valeurs pouvant atteindre -500 ou -600 hPa. Pour l'intensité 20 mm/h, la valeur moyenne du potentiel matriciel avant le début de la pluie est de -404 ± 117 hPa. Pour l'intensité 6 mm/h, elle est de -325 ± 143 hPa.

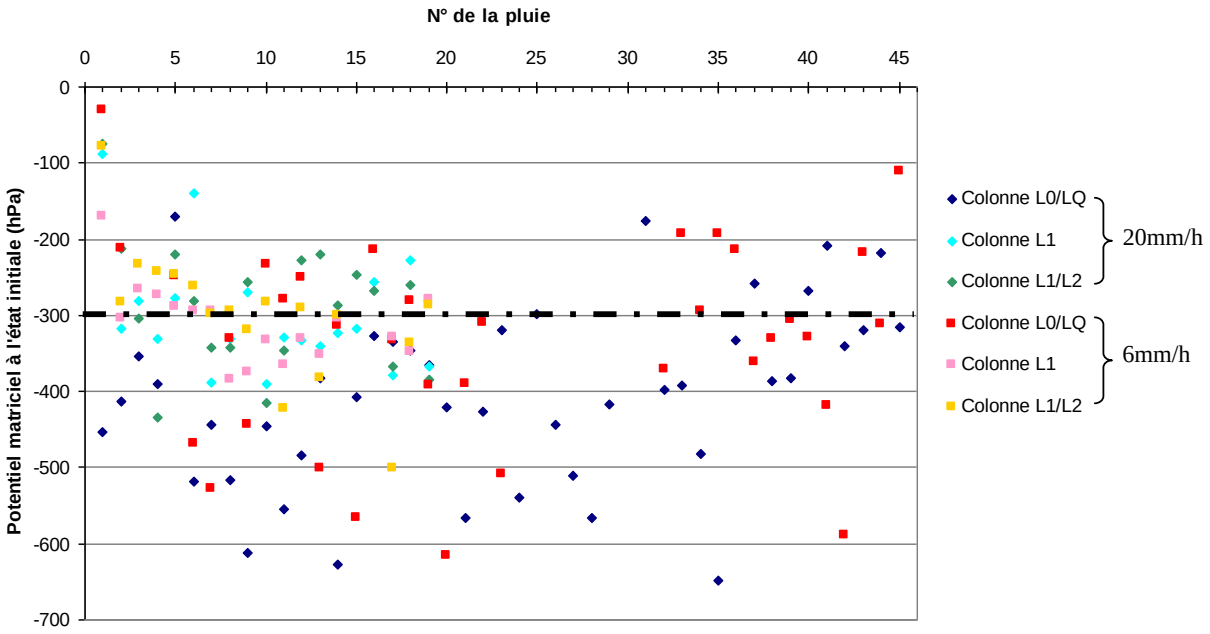


Figure 2.18 : Evolution temporelle du potentiel matriciel avant la pluie, à 5 cm de profondeur, pour les différentes expérimentations

3.3- Conclusions

Cette analyse des conditions aux limites et initiales montre que malgré des difficultés techniques, il est possible de réaliser des pluies à 20 mm/h et 6 mm/h bien différenciées sans une trop grande dérive temporelle. On montre par contre que la succion appliquée à la base des colonnes évolue dans le temps dans le cas des expérimentations L1 et L1/L2 et est plus importante et avec une dynamique inversée dans l'expérimentation L0/LQ par rapport aux expérimentations L1 et L1/L2. Enfin la condition de redémarrage de la pluie est plus variable dans le cas des expérimentations L0/LQ que dans les deux autres expérimentations du fait du séchage à l'étuve.

IV. Mesure de faibles quantités de particules migrantes

Pour quantifier le lessivage, il faut être capable de détecter de faibles quantités de particules fines qui migrent. Il a donc fallu se poser la question suivante : comment détecter et quantifier de très faibles quantités de particules fines qui migrent dans un sol ?
Dans nos expérimentations, nous sommes confrontés à deux types de situation : la quantification de particules fines allochtones dans un solide (particules de L0 dans du LQ ou de L1 dans du L2) et la quantification de particules fines dans une suspension collectée à la base du L1 et du L1/L2. Les réponses techniques apportées à ces deux situations étant totalement différentes en nature, elles font l'objet des deux paragraphes qui structurent ce chapitre.

Comme il a déjà été démontré dans la littérature (Mercier et al., 2000 ; de Jonge et al., 2004) et comme nous le verrons au chapitre 3, les particules mobilisées par le lessivage sont essentiellement des particules de taille 0-2 µm. Nous nous intéresserons ici uniquement à cette fraction.

4.1- Quantification de particules fines allochtones dans un solide

4.1.1 Considérations générales

Lors de l'expérimentation d'éluviation sur sol remanié (L0/LQ), nous étudions le dépôt dans le LQ de particules fines issues du sol L0. L'échantillon LQ est composé à 98,6 % de SiO_2, et ne contient pas d'argile minéralogique.
Lors de l'expérimentation d'illuviation sur sol non perturbé (L1/L2), nous étudions l'arrivée de particules fines du sol L1, qui contient des smectites, dans le sol L2 qui en est dépourvu. La présence de smectites est utilisée comme traceur des particules fines ayant été déposées dans le L2.
Les méthodes mises en œuvre pour détecter les particules illuviées dans les deux cas de figure tiendront compte des particularités des mélanges obtenus.

Les méthodes de quantification mises en œuvre sont soit des méthodes minéralogiques (Diffraction des rayons X, infra-rouge), soit des méthodes basées sur des propriétés physiques (tailles des particules) ou chimiques (concentration en Al et Fe) des deux mélanges obtenus. La diffraction des rayons X est la seule méthode parmi les méthodes retenues qui permet l'identification des différentes phases minérales des mélanges, elle est donc la méthode de référence. Néanmoins cette méthode n'est pas forcément assez sensible. Elle a donc été complétée par d'autres approches plus spécifiques pour chaque mélange considéré.

Dans le cas d'apport de L0 dans le LQ, l'absence d'argile minéralogique dans le LQ au stade t=0 permet d'envisager des méthodes spécifiques aux argiles. Différentes approches ont été considérées :

- la mesure de taille des particules par granulométrie laser, les smectites étant de taille inférieure aux autres argiles minéralogiques (Laird et al., 1991).
- la quantification de la présence de fer et d'aluminium extractibles à l'eau régale, cet extractant ne dissolvant pas le quartz ;
- la spectroscopie infra-rouge dans la zone d'excitation des liaisons Si-O et Al-O, sachant que le second type de liaison est absent du LQ initial ;

Dans le cas de l'apport de L1 dans du L2, les smectites sont identifiées comme un traceur potentiel. Ainsi, l'approche par spectroscopie infra-rouge, méthode peu sensible à l'identification des silicates, n'est pas adaptée. Il en est de même des attaques à l'eau régale qui dissolvent tous les minéraux argileux. Seules les autres approches (DRX et granulométrie) ont donc été testées sur les mélanges (L1/L2).

Le tableau 2.21 résume les différentes approches testées et les fractions concernées pour les différentes expérimentations.

Tableau 2.21 : Récapitulatif des différentes approches testées pour les différentes expérimentations selon la fraction concernée

		Méthodes			
Expérimentation	Fraction	DRX	Infra-Rouge	Al et Fe extrait à l'eau régale	Granulomètre laser
L0/LQ	LQ total		X	X	
	< 2µm	X			X
L1/L2	< 2µm	X			X

4.1.2 Présentation des échantillons analysés

4.1.2.1 Préparation d'échantillons standards

Les méthodes de quantification de la fraction 0-2 µm ont été préalablement calibrées sur des échantillons standards, constitués de fraction 0-2 µm issues des échantillons L0 ou L1, mélangées à de l'échantillon total de type LQ ou L2. Selon les cas, les mélanges ont été réalisés soit à sec, après séchage des particules pour éviter des phénomènes d'agrégation, soit en suspension.

Pour les analyses au DRX et granulomètre laser, les échantillons standards sont des suspensions réalisées selon la même méthode. La fraction 0-2 µm du L0 et du L1 a été extraite par sédimentation selon la loi de Stockes. La concentration de cette suspension a été déterminée et ensuite mélangée en différentes quantités à 100 g de LQ pour la suspension de L0 et 30 g de L2 pour la suspension L1. Les différents mélanges présentés dans le tableau 2.22 ont ainsi été obtenus.

La fraction 0-2 µm de ces mélanges a ensuite été prélevée par sédimentation selon la loi de Stockes et analysée aux DRX et granulomètre laser.

Pour les analyses à la spectroscopie infra rouge et à l'eau régale les mélanges ont été réalisés à sec. La fraction 0-2 µm du L0 a été extraite par sédimentation selon la loi de Stockes puis mise à sécher à 40 °C. Une fois sèche, elle a été mélangée délicatement, selon diverses proportions (tableau 2.22), au LQ total sec dans un mortier en agate. Une fois homogène ces mélanges ont été analysés.

Tableau 2.22 : Récapitulatif des échantillons préparés pour chaque méthode de quantification utilisée

	Méthodes de quantification	Echantillons	
		L0/LQ	L1/L2
Echantillons en solution	DRX	12 mélanges *(L0, LQ, 0,1% ; 0,5% ; 0,8% ; 1% ; 1,2% ; 1,5% ; 1,8% ; 2% ; 2,5% ; 3%)*	10 mélanges *(L1, L2, 0,1% ; 0,5% ; 1% ; 2% ; 3% ; 4% ; 5% ; 10%)*
	Granulomètre laser	-	10 mélanges *(L1, L2, 0,1% ; 0,5% ; 1% ; 2% ; 3% ; 4% ; 5% ; 10%)*
Echantillons sec	IR	18 mélanges *(L0, LQ, 0,05% ; 0,1% ; 0,2% ; 0,3% ; 0,4% ; 0,5% ; 0,6% ; 0,7% ; 0,8% ; 0,9% ; 1% ; 1,2% ; 1,5% ; 1,8% ; 2% ; 2,5%)*	-
	Eau régale	13 mélanges *(L0, LQ, 0,05% ; 0,1% ; 0,2% ; 0,5% ; 0,8% ; 1% ; 1,5% ; 2% ; 3% ; 4% ; 5%)*	-

4.1.2.2. Analyse des échantillons issus des expériences de simulation de pluie

Une fois les méthodes validées sur les échantillons standards, elles ont été mises en œuvre sur les expérimentations sur colonnes arrêtées après un certain nombre de pluies avec deux cas de figure : dans le cas du L0/LQ, les méthodes ont été appliquées sur différentes profondeurs du LQ et sur les particules collectées dans le bac à la base du LQ ; dans le cas du L1/L2, ces méthodes seront appliquées après chaque arrêt sur différentes profondeurs du L2. Au cours de la thèse aucune colonne L1/L2 n'a été arrêtée, ces méthodes seront donc utilisées dans la suite du projet Agriped[1].

4.1.3 Méthodes

4.1.3.1 Quantification des argiles migrantes par mesure de l'évolution de la taille des particules inférieures à 2 µm au granulomètre laser

La distribution granulométrique de la fraction 0-2 µm a été déterminée au granulomètre laser (Malvern S banc long) sur des suspensions. Cette technique est basée sur la diffraction de la lumière. L'intensité du rayonnement diffracté et l'angle de diffraction sont fonction de la taille des particules (Malvern, 2005). Plus la taille est petite, plus l'angle de diffraction est grand.

4.1.3.2 Quantification des argiles migrantes par diffraction des rayons X

La composition minéralogique de la fraction 0-2 µm a été identifiée par DRX sur lames orientées. Cette fraction a été séparée du sol total par sédimentation selon la loi de Stockes et analysée sur lames orientées selon la méthode décrite par Robert et Tessier (1974). Les analyses ont été réalisées sur un diffractomètre de rayons X (DRX) Bruker D8 Advance équipé d'un tube (à rayons X) avec une anticathode au cobalt. La taille du goniomètre est de 435 mm et les fentes utilisées de 0,6 mm et 3 mm. Les trois types de traitements classiques ont été réalisés : normal (N), éthylène glycol (EG) et chauffé à 520 °C (Ch). Avant leur passage au DRX, les lames EG sont mises à saturer 24 h dans un dessiccateur en présence d'éthylène glycol et les lames chauffées sont chauffées dans un four à 520 °C pendant 4 h. Pour le traitement N la fenêtre d'angle d'analyse est comprise entre 3 et 50 ° avec un pas angulaire de 0,02 ° et un temps de comptage de 5 s par pas. Pour les traitements EG et Ch, la fenêtre d'angle est comprise entre 3 et 17 ° ; le pas angulaire et le temps de comptage sont les

[1] Projet ANR (AGRIPED 2010 BLANC 605) débuté en novembre 2010 pour une durée de 4 ans dont le but est de caractériser, quantifier et modéliser l'impact de l'usage des terres sur un processus majeur d'évolution des sols : le lessivage.

mêmes que pour les lames N. Dans notre étude, les trois traitements ont été réalisés uniquement pour l'identification des minéraux sur les pôles purs (L0, L1, L2 et LQ). Toutes les autres lames réalisées n'ont subi que le traitement EG. Deux à trois répétitions ont été réalisées pour chaque échantillon selon la quantité de matière disponible. Toutes les lames ont été réalisées pour un dépôt de 1mL d'une suspension à 6,25 g/L pour les échantillons standards de type L0/LQ et à 7,5 g/L pour les échantillons standards de type L1 et L1/L2.
Pour comparer les quantités de particules 0-2 µm, une semi quantification de la smectite a été réalisée en calculant des rapports de hauteurs des pics (001) pour le traitement EG.

4.1.3.3 Quantification des argiles migrantes par quantification de Al et Fe extrait à l'eau régale

Les mesures ont été réalisées au laboratoire d'analyses des sols d'Arras sur des mélanges secs de la fraction 0-2 µm de L0 dans du LQ total. L'extraction à l'eau régale (norme ISO 11466) est une attaque acide par un mélange de 2/3 d'acide chlorhydrique concentré et d'1/3 d'acide nitrique concentré pendant 16 h à température ambiante, puis à ébullition avec reflux pendant 2 h. Les concentrations en Fe et Al sont alors mesurées sur le filtrat extrait, par spectrométrie d'émission atomique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES) (NF ISO 22036).

4.1.3.4 Quantification des argiles migrantes par spectroscopie infra-rouge moyen en réflexion totale atténuée

a. Analyse par infra-rouge moyen

La spectroscopie en infra-rouge (IR) moyen est une spectroscopie vibrationnelle utilisant des rayonnements électromagnétiques (RE) dont les longueurs d'ondes sont comprises entre 2500 et 25000 nm.
Si l'on considère une molécule diatomique comme étant deux atomes reliés entre eux par un ressort (figure 2.19), les liaisons sont le résultat d'un équilibre de forces : on observe, une répulsion entre les noyaux chargés positivement et les nuages d'électrons chargés négativement, et vice-versa (Banwell, 1983). Chaque ressort vibre à une fréquence donnée qui dépend des atomes impliqués dans la liaison. L'énergie d'un RE incident ne peut être absorbée que lorsque la fréquence de celui-ci est un nombre entier de fois égal à la fréquence de vibration-rotation propre de la liaison interatomique.

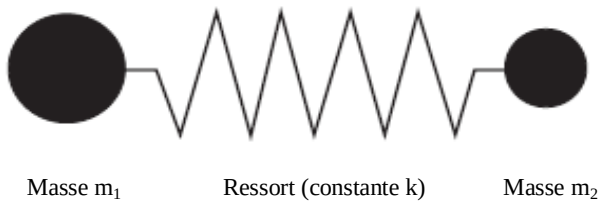


Figure 2.19 : Modèle simple d'une molécule diatomique : les deux masses m_1 et m_2 sont liées par un ressort caractérisé par la constante de rappel k

Il est donc possible d'attribuer des absorptions à des liaisons chimiques spécifiques. L'intensité de l'absorption étant proportionnelle à la concentration de l'espèce absorbante, une analyse quantitative est possible. L'analyse infra-rouge en réflexion totale atténuée (IR-ATR), est une technique non destructive d'analyse de surface de matériaux ayant une forte absorbance. Les radiations infra-rouges lumineuses subissent une réflexion totale à l'interface cristal – échantillon, puis sont dirigées vers le détecteur. Plus les longueurs d'ondes sont élevées, plus l'absorption est intense. La spectroscopie IR-ATR est une approche rapide qui ne nécessite pas ou très peu de préparation de l'échantillon, notamment l'absence de pastillage – que l'on pratique en spectroscopie IR classique – ce qui permet de s'affranchir de toutes les incertitudes liées à la préparation des pastilles.

Les mesures ont été réalisées sur un spectromètre thermo-Nicoler IR 200 (au Laboratoire Systèmes chimiques complexes de l'Université d'Aix-Marseille III). Cet appareil permet des mesures en réflexion totale atténuée (ATR) dans l'infra rouge moyen grâce à une cellule de type Spectra-Tech Foundation Thunderdome.

Six répétitions ont été réalisées pour chaque échantillon en deux prises d'essai.

b. Traitement des données

Les données ont été traitées par régression selon les moindres carrés partiels (PLS) (Wold, 1966 et Tenenhaus, 1999). La PLS est une méthode alternative à la régression linéaire multiple classique (MLR). Dans la méthode PLS, les données sont d'abord traitées par ACP, puis une régression MLR est appliquée aux données issues de l'ACP, avec les coordonnées factorielles comme variables prédictives. La régression PLS permet de réduire la matrice initiale. Le choix des nouveaux axes se fait selon les directions les plus pertinentes en termes de prédiction des propriétés physico-chimiques. La PLS permet de prendre en compte un grand nombre de variables observées sur un petit nombre d'échantillons. Elle permet également d'interpréter les relations entre les variables prédictives et les propriétés à prédire.

Les résultats obtenus pour les six répétitions ont été, au préalable, moyennés et normalisés par la méthode standard normal variate (SNV, Barnes et al., 1989). Douze échantillons standards ont servi à calculer la droite de calibration et 7 ont été utilisés pour valider cette droite.

4.1.4 Résultats

4.1.4.1 Analyses de l'apport de particules 0-2 µm par granulométrie laser

La quantification de l'apport de particules 0-2 µm de L0 dans le LQ par la granulométrie laser n'a pas donné de résultats concluants, la méthode n'étant pas assez sensible.

Par contre, dans le cas d'un apport de particules 0-2 µm de L1 dans le L2, des évolutions ont été mises en évidence. Les distributions granulométriques du 0-2 µm du L1, du L2 (pôles purs) et des différents échantillons standards ont une allure similaire avec deux modes centrés sur les classes granulométriques [0,36-0,42 µm] et [1,24-1,44 µm] (figure 2.20) ; la proportion de particules dans le mode [1,24-1,44 µm] diminue lorsque la quantité de particules 0-2 µm de L1 dans L2 augmente (on observe l'inverse pour les particules du mode [0,36-0,42 µm]).

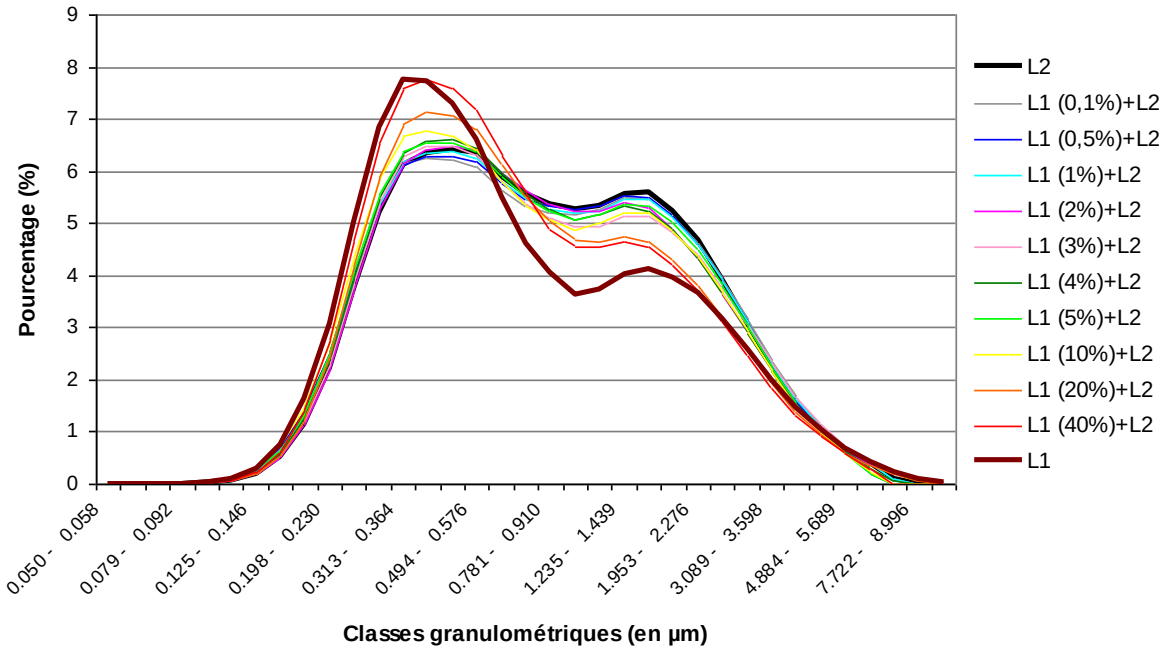


Figure 2.20: Distribution granulométrique du 0-2 µm des deux pôles purs L1 et L2 et des 10 mélanges de 0-2 µm de L1 dansL2

Ce résultat est cohérent avec l'apport de smectites par le L1, minéral de petite taille (Laird et al., 1991). Ainsi, plus la quantité de particules 0-2 µm augmente dans les échantillons standards « L1+L2 », plus ceux-ci sont enrichis en smectites et donc en particules fines. La

relation entre la proportion de particules 0-2 µm et le pourcentage de particules des modes [1,24-1,44 µm] et [0,36-0,42 µm] est décrite sur la figure 2.21.

Pour le mode 1,24-1,44 µm, le R^2 obtenu pour la droite de régression linéaire est faible, cette classe granulométrique ne peut pas être utilisée comme traceur de l'apport de particules de 0-2 µm de L1 dans L2.

Pour le mode 0,36-0,42 µm, le R^2 est de 0,82 mais la pente de la droite de régression, très faible (0,045), ne permet pas de déterminer un apport de particules fines avec une bonne sensibilité.

Cette méthode, plus qualitative que quantitative, n'est donc pas assez sensible et ne peut pas être utilisée pour quantifier le processus d'illuviation. Elle n'a pas été utilisée dans la suite de ce travail et nous ne présenterons donc pas de résultats sur des échantillons issus des simulations de pluie.

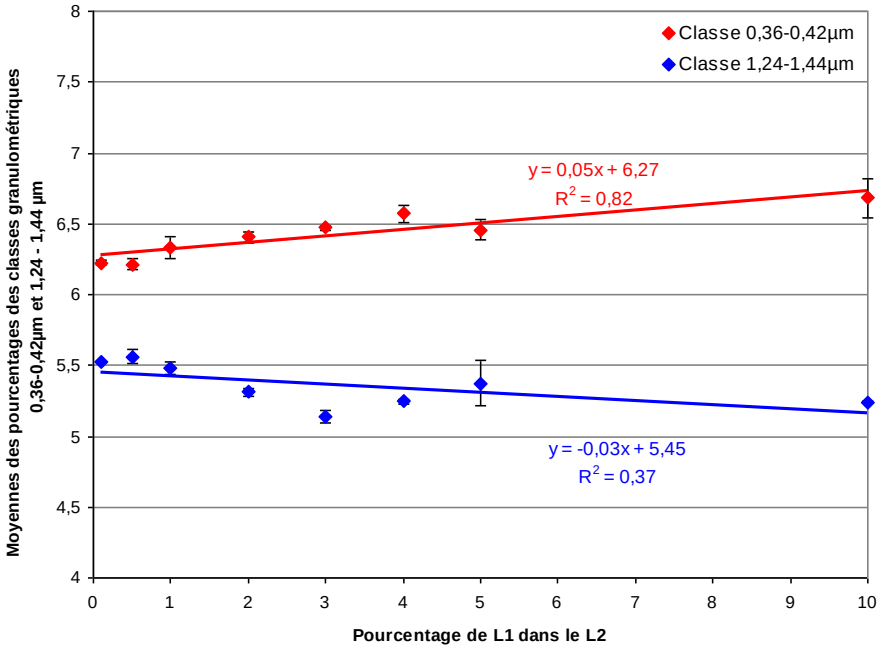


Figure 2.21 : Droite de mélanges des deux modes issus de la distribution granulométrique pour 8 mélanges de 0-2 µm de L1 dans L2

4.1.4.2 Analyses de l'apport de particules 0-2 µm par DRX

a. Quantification de l'apport de particules 0-2 µm de L0 dans le LQ par DRX

La figure 2.22 montre que l'intensité du pic 001 de la smectite, apportée par le 0-2 µm du L0 et absente du LQ, augmente avec la concentration 0-2 µm de L0.

Sur cette base la hauteur du pic 001 de la smectite à 17 Å des lames en éthylène glycol, a été mesurée et rapportée à la quantité de 0-2 µm de L0 apportée (figure 2.23) et ce pour les différents échantillons standards. La hauteur de ce pic est proportionnelle à la quantité de

0-2 µm de L0 ajoutée au LQ malgré une dispersion importante des répétitions (figure 2.23). Une droite de calibration a été réalisée pour les échantillons standards aux 8 concentrations suivantes : 0 %, 0,1 % ; 0,8 % ; 1 % ; 1,2 % ; 1,8 % ; 2 % et 3 %. Trois échantillons standards (0,5 % ; 1,5 % et 2,5 %) ont été utilisés pour la validation de la calibration. La droite de calibration ainsi obtenue a un R^2 de 0,75, ce qui est relativement faible (figure 2.23).

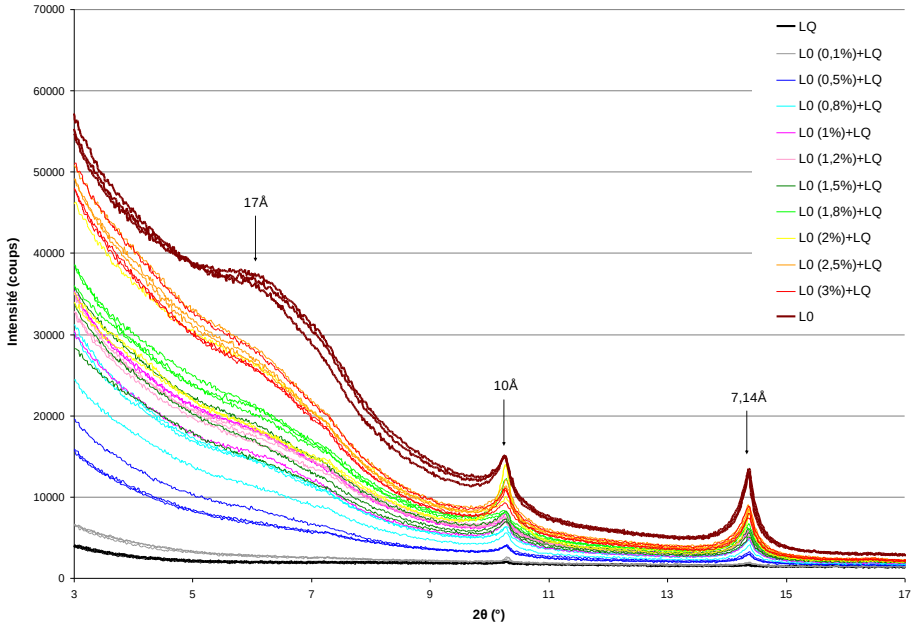


Figure 2.22 : Diffractogrammes des lames glycolées de la fraction 0-2 µm des échantillons LQ, L0 et des 10 mélanges de 0-2 µm de L0 dans LQ

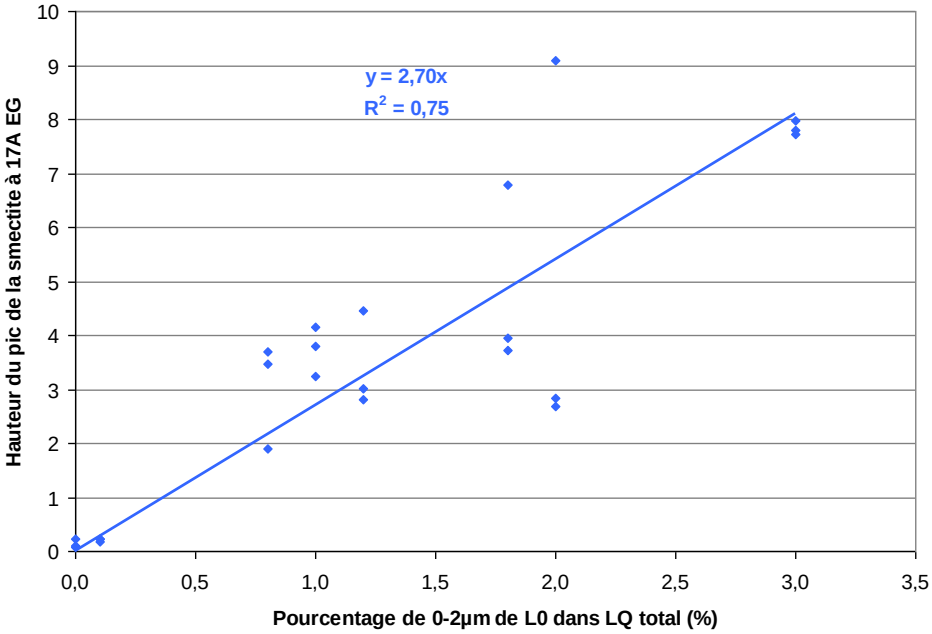


Figure 2.23 : Droite de calibration de la mesure de l'abondance de L0 dans le LQ déterminée par la mesure par DRX de l'intensité du pic 001 de la smectite

Les 3 échantillons de validation (tableau 2.23) montrent que l'incertitude de la méthode est de l'ordre de 10 % au delà de 2,5 % de L0 dans LQ, de l'ordre de 30 % pour des concentrations comprises entre 2,5 et 1,5 % de L0 dans LQ, et de plus de 50 % pour des concentrations inférieures à 1,5 % de L0 dans LQ. Un nombre de standards plus important serait nécessaire pour affiner cette approche. Néanmoins ces premiers résultats montrent que la méthode n'est vraisemblablement pas assez sensible face au processus étudié. Nous ne présenterons donc pas de résultats sur des échantillons issus des expérimentations de simulation de pluie.

Tableau 2.23 : Analyse des standards utilisés pour valider la droite de calibration de 0-2 µm de L0 dans le LQ

Echantillons standards	Valeur de référence (%)	Valeur prédite moyenne (%)	% d'erreur
0,5%L0+LQ	0,50	0,23	-54,0
1,5%L0+LQ	1,50	1,04	30,7
2,5%L0+LQ	2,50	2,73	9,2

b. Quantification de l'apport de particules 0-2 µm de L1 dans le L2 par DRX

A partir des diffractogrammes obtenus en éthylène glycol pour les différents échantillons de L1/L2, nous constatons une évolution significative du pic de la smectite avec l'augmentation du pourcentage de 0-2 µm de L1 dans le L2 (figure 2.24).

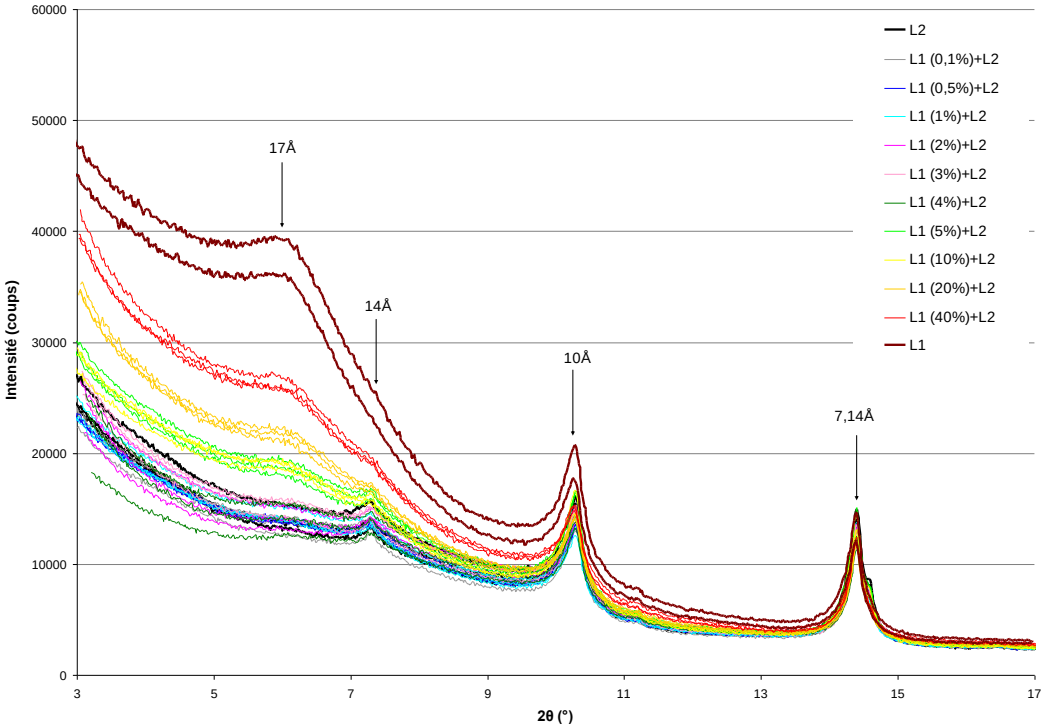


Figure 2.24 : Diffractogrammes des lames glycolées de la fraction 0-2 µm des échantillons L1, L2 et des 10 mélanges de 0-2 µm de L1 dans L2

La hauteur du pic de la smectite à 17 Å en éthylène glycol est proportionnelle à la quantité de 0-2 µm de L1 ajoutée au L2 (figure 2.25). Une droite de calibration a été réalisée sur 6 échantillons standards (0,1 % ; 0,5 % ; 2 % ; 3 % ; 5 % et 10 %) et deux échantillons standards (1 % et 4 %) ont été utilisés pour la validation (tableau 2.24). La droite de calibration ainsi obtenue a un R^2 de 0,90 (figure 2.25), valeur acceptable en termes de calibration. Néanmoins, les échantillons de validation montrent que pour des mélanges de l'ordre de 1 %, l'erreur de mesure est de 57 %. Cette erreur est réduite à 15 % pour des mélanges de concentrations de l'ordre de 4 % (les calculs ont été réalisés sur la moyenne des trois répétitions).

Cette approche semble donc peu sensible pour des concentrations en 0-2 µm de L1 dans du L2, inférieures à 2 %.

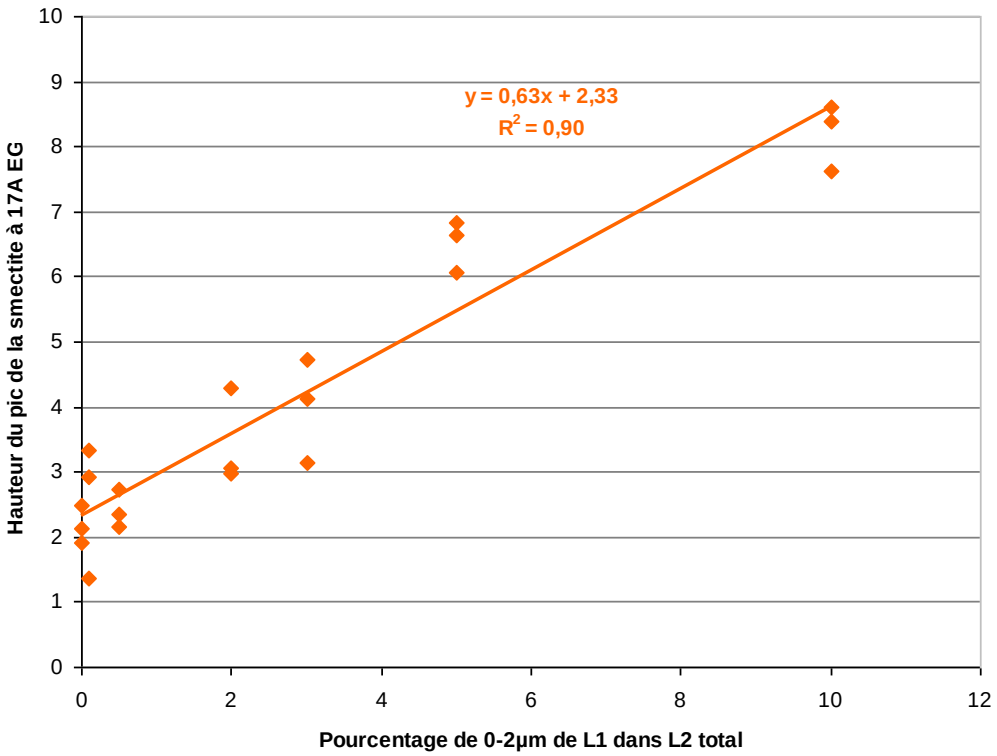


Figure 2.25 : Droite de calibration de la mesure de l'abondance de L1 dans le L2 déterminée par la mesure par DRX de l'intensité du pic 001 de la smectite

Tableau 2.24 : Analyse des standards utilisés pour valider la droite de calibration de 0-2 µm de L1 dans le L2

Echantillons standards	Valeur de référence (%)	Valeur prédite moyenne (%)	% d'erreur
1%L1+L2	1,0	0,43	-56,5
4%L1+L2	4,0	4,61	15,2

4.1.4.3 Analyses de l'apport de particules 0-2 µm par la mesure des teneurs en Fe et Al extraites à l'eau régale

a. Etude des échantillons standards

Les teneurs en Fe et Al extraites à l'eau régale sont très contrastées entre le 0-2 µm du L0 et le LQ total : de 78 667 mg/kg et 283 mg/kg pour Al et 66 000 mg/kg et 150 mg/kg pour Fe pour le 0-2 µm du L0 et le LQ total respectivement. La figure 2.26 montre que le seuil de détection est de 0,8 % de 0-2 µm de L0 dans LQ. Pour le fer, ce seuil représente 623 mg/kg et pour l'aluminium 880 mg/kg.

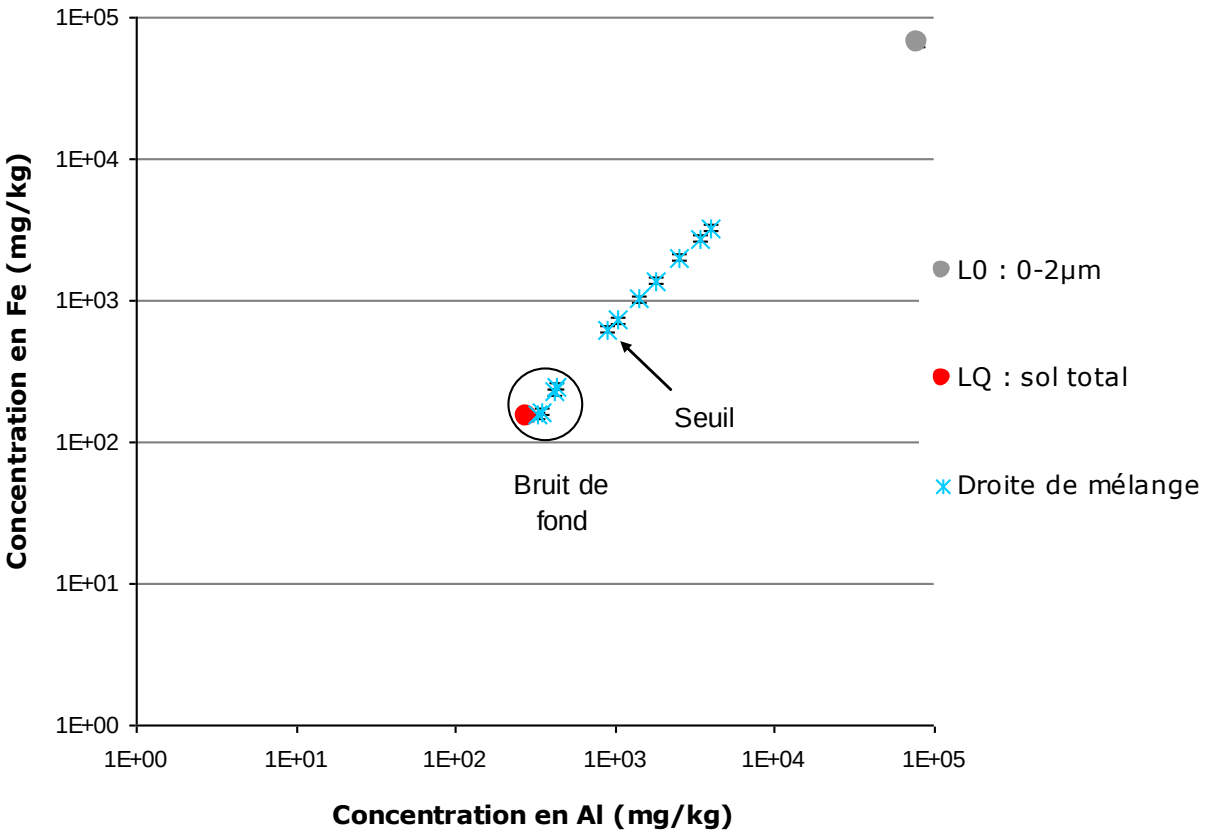


Figure 2.26 : Rapport Fe/Al déterminé par la méthode d'extraction à l'eau régale pour les deux pôles pures 0-2 µm de L0 et sol total de LQ et pour les 11 échantillons standards

A partir de ces résultats, des droites de calibration ont été calculées. Elles sont basées soit sur la concentration en Al extrait à l'eau régale, soit sur celle en Fe. Les droites de calibration obtenues pour le fer et l'aluminium sont reportées figure 2.27. Pour ces deux droites les R^2 sont de 1.

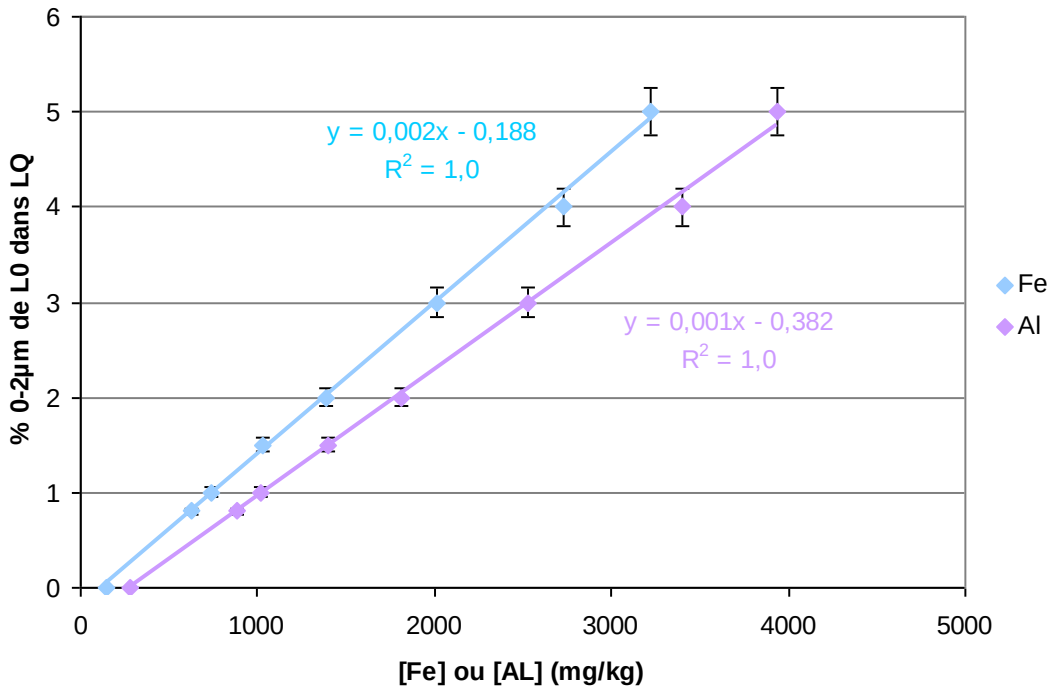


Figure 2.27 : Droite de calibration de la mesure de l'abondance de 0-2 µm de L0 dans le LQ déterminée par la mesure des concentrations en fer et en aluminium extraites à l'eau régale

b. Etude des échantillons issus des simulations de pluie

Les concentrations en fer et aluminium obtenues pour les échantillons issus des expérimentations de pluie se situent en dessous du seuil de détection de 0,8 % déterminé précédemment (tableau 2.25). Ainsi, cette méthode n'est, pour le moment, pas assez sensible pour détecter l'apport des particules inférieures à 2 µm de L0 dans le LQ.

Tableau 2.25 : Concentrations en fer et aluminium extraites à l'eau régale dans les trois premiers centimètres du LQ pour les différents arrêts 20 mm/h et 6 mm/h

Intensité	Arrêt	Colonne	Fe (mg/kg)	Al (mg/kg)
20mm/h	10 pluies	L0 - H	250	357
		L0 - I	150	270
	20 pluies	L0 - J	186	363
		L0 - K	186	350
	25 pluies	L0 - L	134	249
		L0 - M	137	253
	45 pluies	L0 - A	165	290
		L0 - D	152	290
6mm/h	20 pluies	L0 - AE	101	273
		L0 - AF	88	268
	45 pluies	L0 - AC	184	306
		L0 - AD	189	303

4.1.4.4 Analyses de l'apport de particules 0-2 µm par spectroscopie infra-rouge moyen

a. Etude des échantillons standards

L'analyse des pôles purs (0-2 µm de L0 et LQ) a mis en évidence la présence de quatre pics autour de 982, 912, 872 et 831 cm^{-1} présent dans le 0-2 µm du L0 et absent du LQ (figure 2.28).

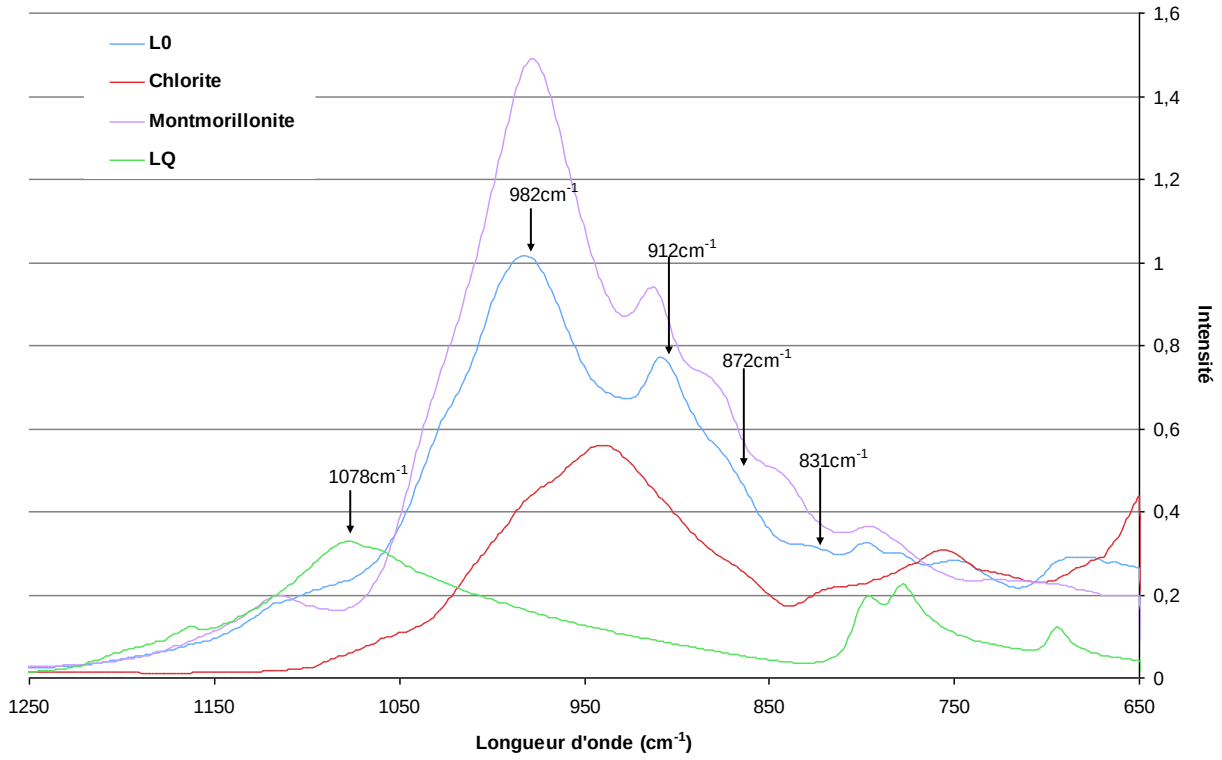


Figure 2.28 : Signal des pôles purs de 0-2 µm du L0, LQ total et des argiles de références (chlorite et montmorillonite) dans la zone des liaisons Si-O et Al-O en IR-ATR

Des échantillons purs de montmorillonite du Wyoming et de chlorite ont été analysés. La montmorillonite présente des pics à 982 cm^{-1} et 912 cm^{-1} (figure 2.28) comme le 0-2 µm de L0 ce qui n'est pas le cas de la chlorite. La présence des pics aux mêmes longueurs d'onde pour la montmorillonite et le 0-2 µm de L0 permet de vérifier que ces pics sont attribuables aux smectites présentes dans le 0-2 µm du L0. L'analyse quantitative a été menée par PLS dans une zone en entourant le pic à 912 cm^{-1}, allant de 1052 cm^{-1} à 802 cm^{-1}.

L'analyse de la forme des composantes obtenues par PLS sur les 18 standards (figure 2.29) montre que les 4 premières composantes sont définies par des pics autour de 1002, 914, 876 et 836 cm^{-1}. Ces pics sont caractéristiques de la présence de 0-2 µm du L0 dans le LQ (figure 2.28). Les pics à 914, 876 et 836 cm^{-1} correspondent aux pics de la smectite alors que le pic à 1002 cm^{-1} est lié à la somme du pic du quartz (1078 cm^{-1}) avec le pic de la smectite

(982 cm^{-1}). La cinquième composante est beaucoup plus bruitée. Nous avons donc décidé de n'utiliser que les 4 premières composantes de la PLS pour réaliser la régression sur les 12 échantillons de calibration.

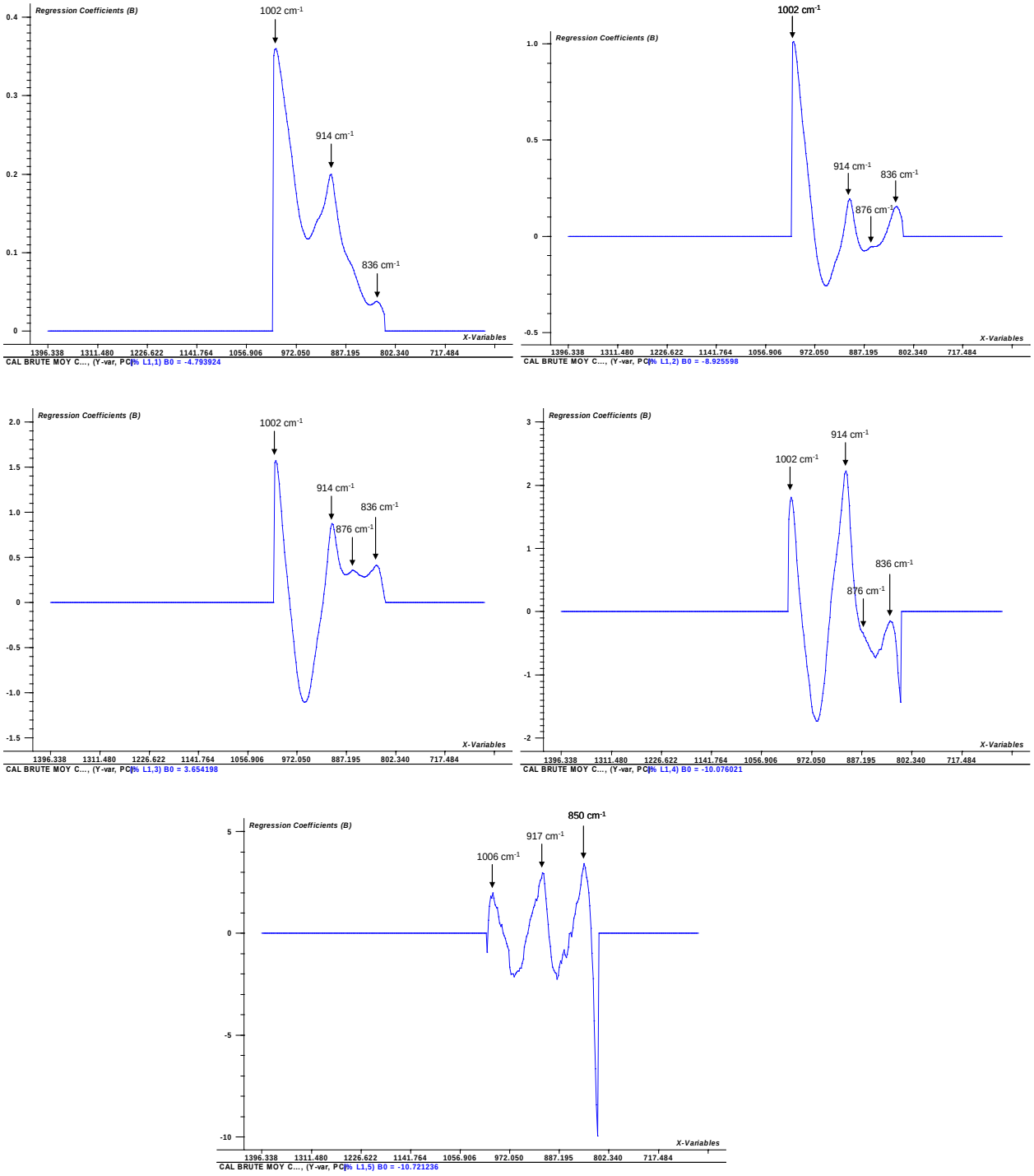


Figure 2.29 : Signal des 5 premières composantes de la PLS

La droite de calibration ainsi obtenue est présentée en figure 2.30. Elle a un R^2 de 0,95 et une pente de 0,96. Les 7 échantillons de validation (tableau 2.26) montrent que l'incertitude de la méthode est de 30 % avec une limite de quantification à 0,05 % de 0-2 µm de L0 dans du LQ.

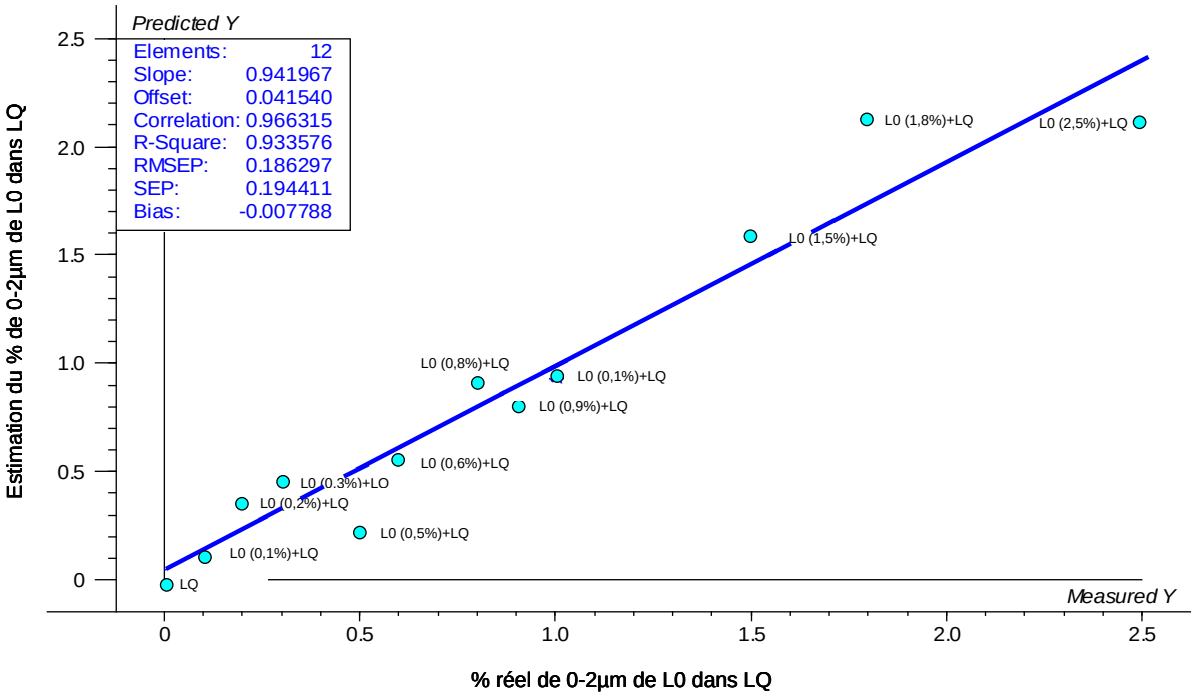


Figure 2.30 : Droite de calibration à 4 composantes déterminée par la méthode PLS sur des résultats d'infra rouge dans la zone allant de 1052 cm^{-1} à 802 cm^{-1} pour 12 échantillons standards

Tableau 2.26 : Analyse des standards utilisés pour valider la droite de calibration à 4 composantes de l'infra rouge

Echantillons standards	Valeur de référence (%)	Valeur prédite (%)	% d'erreur
0,05% L0+LQ	0,05	0,06	17,2
0,4% L0+LQ	0,40	0,47	16,5
0,7% L0+LQ	0,70	0,89	26,7
1,2% L0+LQ	1,20	1,44	19,7
1,5% L0+LQ	1,50	1,29	14,1
2% L0+LQ	2,00	1,82	9,3
2,5% L0+LQ	2,50	1,90	24,1

b. Etude des échantillons issus des simulations de pluie

L'analyse des échantillons arrêtés après les différentes pluies montre que dans la grande majorité des cas, on détecte des particules inférieures à 2 µm (figure 2.31). Les concentrations

calculées par la méthode sont comprises entre 0 à 0,6 % de 0-2 µm de L0 dans le LQ, sans réelle relation ni avec la profondeur, ni avec le temps.

Les concentrations obtenues par cette méthode sont inférieures à 0,8 % de 0-2 µm de L0 dans le LQ, limite de quantification obtenue pour l'approche à l'eau régale (présentée précédemment). Les résultats obtenus par ces deux méthodes sont donc cohérents.

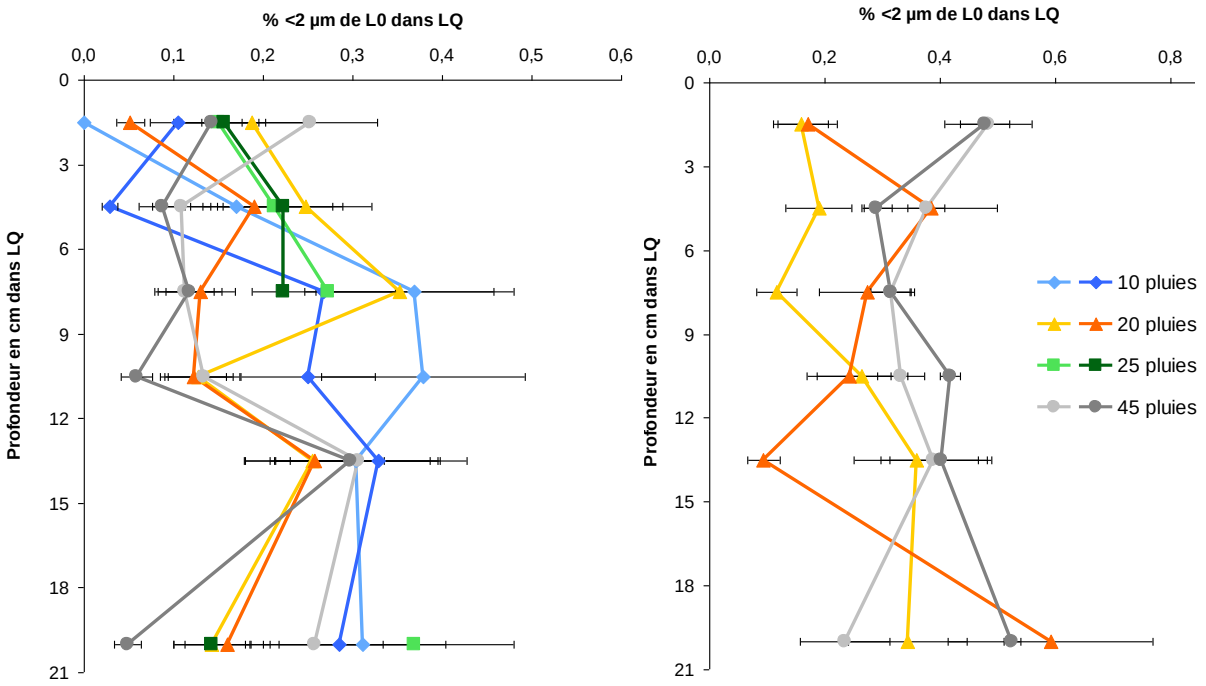


Figure 2.31 : Pourcentage de 0-2 µm de L0 dans le LQ déterminé à l'IR-ATR pour les différents arrêts pour les 5 profondeurs de LQ et pour les particules présentes dans l'eau de drainage (point au-delà de 18 cm). a) intensité 20mm/h et b) intensité 6mm/h

4.2- Quantification et identification des particules en suspension diluée

4.2.1 Méthode de quantification

Pour déterminer la concentration de particules dans une suspension diluée, telle que celles collectées après les pluies à la base du L1 ou du L1/L2, nous avons mesuré la turbidimétrie des suspensions à l'aide d'un turbidimètre Hach 2100AN. Cette technique permet de mesurer la concentration de particules en suspension par l'absorbance d'un rayonnement lumineux. La source lumineuse du modèle Hach 2100AN est une lumière blanche émise par un filament de

tungstène combinée à un filtre à 860 nm. Cette absorbance exprimée en NTU (Néphélométric Turbidity Units) est une expression de la turbidité.

4.2.1.1 Matériel d'étude

a. Fabrication d'échantillons standards

La méthode a été étalonnée grâce à un ensemble de suspensions standards de L1 de concentrations connues et ce pour plusieurs fractions granulométriques (0-100 µm, 0-10 µm et 0-2 µm) obtenues par tamisage pour le 0-100 µm et par sédimentation selon la loi de Stockes pour le 0-10 µm et le 0-2 µm.

La fraction 0-100 µm représente la totalité des particules collectées lors des expérimentations de simulation de pluie, puisque nous avons placé, à la base des cylindres de sol, un filtre en nylon de diamètre 110 µm. Les fractions 0-10 µm et 0-2 µm représentent, selon la littérature, les fractions mobilisées par le lessivage (Mercier et al., 2000, De Jonge et al., 2004).

Pour la fraction granulométriques 0-100 µm, 16 suspensions standards de concentrations comprises entre 0,1 g/L à 8 g/L ont été analysées (0,1 g/L ; 0,15 g/L ; 0,2 g/L ; 0,3 g/L ; 0,4 g/L ; 0,5 g/L ; 0,65 g/L ; 0,8 g/L ; 1 g/L ; 2 g/L ; 3 g/L ; 4 g/L ; 5 g/L ; 6 g/L ; 7 g/L et 8 g/L).

Pour les fractions granulométrique 0-10 µm et 0-2 µm, les gammes d'étalonnage ont été réalisées sur 17 concentrations comprises entre 0,05 g/L et 4 g/L (0,05 g/L ; 0,08 g/L ; 0,1 g/L ; 0,15 g/L ; 0,2 g/L ; 0,3 g/L ; 0,4 g/L ; 0,5 g/L ; 0,65 g/L ; 0,8 g/L ; 1 g/L ; 1,5 g/L ; 2 g/L ; 2,5 g/L ; 3 g/L ; 3,5 g/L et 4 g/L). Au-delà de 4 g/L des dilutions sont requises.

Pour chaque suspension deux sous-échantillons ont été préparés et ont chacun été passé deux fois au turbidimètre représentant ainsi 4 répétitions par suspension.

b. Echantillons des expérimentations de simulation de pluie

Après chaque pluie, les suspensions récupérées dans les erlenmeyers sont passées au turbidimètre pour déterminer les concentrations en particules des fractions 0-100 µm, 0-10 µm et 0-2 µm. Pour les suspensions présentant des concentrations supérieures à >5000 NTU, des dilutions sont réalisées et la suspension ainsi diluée est repassée au turbidimètre.

De plus des suspensions standards de la fraction 0-2 µm [0,08 g/L (68 NTU +/- 4,1 NTU) ; 0,5 g/L (416 NTU+/- 25 NTU), 1 g/L (855 NTU +/- 44 NTU) et 4 g/L (4060 NTU +/- 207)] sont passées régulièrement afin de s'assurer de l'absence de dérive temporelle de la mesure de turbidité. Le cas échéant les calibrations sont refaites.

4.2.1.2 Résultats

A partir de ces échantillons standards, deux gammes d'étalonnage linéaires ont été définies sur 12 (respectivement 13) des 16 (respectivement 17) suspensions standards de la gamme 0-100 µm (respectivement les fractions 0-2 et 0-10 µm) : une première droite pour les faibles valeurs de NTU (<450NTU pour le 0-100 et le 0-2 µm et <850 NTU pour le 0-10 µm) et une deuxième pour les fortes valeurs (figure 2.32). Les 4 suspensions standards restantes ont été utilisées pour valider ces calibrations (deux standards par gamme de concentrations ont été conservés pour chacune des fractions étudiées ; tableau 2.27).

Quelle que soit la gamme de taille de particules, les R^2 des droites de calibration sont supérieurs à 0,99, valeur acceptable pour des calibrations (figure 2.32). La mesure de NTU varie de 5 à 7 % pour toutes les fractions. L'analyse des échantillons standards montre que l'incertitude sur la concentration estimée à partir des mesures de NTU est d'environ 15 % pour la fraction 0-100 µm, d'environ 10 % pour la fraction 0-10 µm (avec une valeur extrême à 21 % pour la plus faible concentration) et de 5 % pour la fraction 0-2 µm (tableau 2.27).

Tableau 2.27 : Analyse des standards utilisés pour valider la droite de calibration du turbidimètre pour la fraction 0-100 µm du L1 pour les gammes allant de 1 à 8 g/L et de 0,1 à 1 g/L, 0-10 µm pour les gammes allant de 0,05 à 0,8 g/L et de 0,5 à 4 g/L et 0-2 µm pour les gammes allant de 0,05 à 0,5 g/L et de 0,5 à 4 g/L

Granulométrie	Echantillons standards	Valeur de référence (%)	Valeur prédite moyenne (%)	% d'erreur
0-100µm	0,2g/L	0,20	0,23	13,0
	0,65g/L	0,65	0,68	4,1
	2g/L	2,00	1,71	-14,7
	6g/L	6,00	6,06	1,0
0-10µm	0,15g/L	0,15	0,12	-21,0
	0,5g/L	0,50	0,50	0,05
	1,0g/L	1,00	0,90	-10,5
	3,5g/L	3,50	3,16	-9,7
0-2µm	0,15g/L	0,15	0,15	-3,3
	0,3g/L	0,30	0,29	-4,5
	1,0g/L	1,00	0,97	-2,7
	3,5g/L	3,50	3,32	-5,0

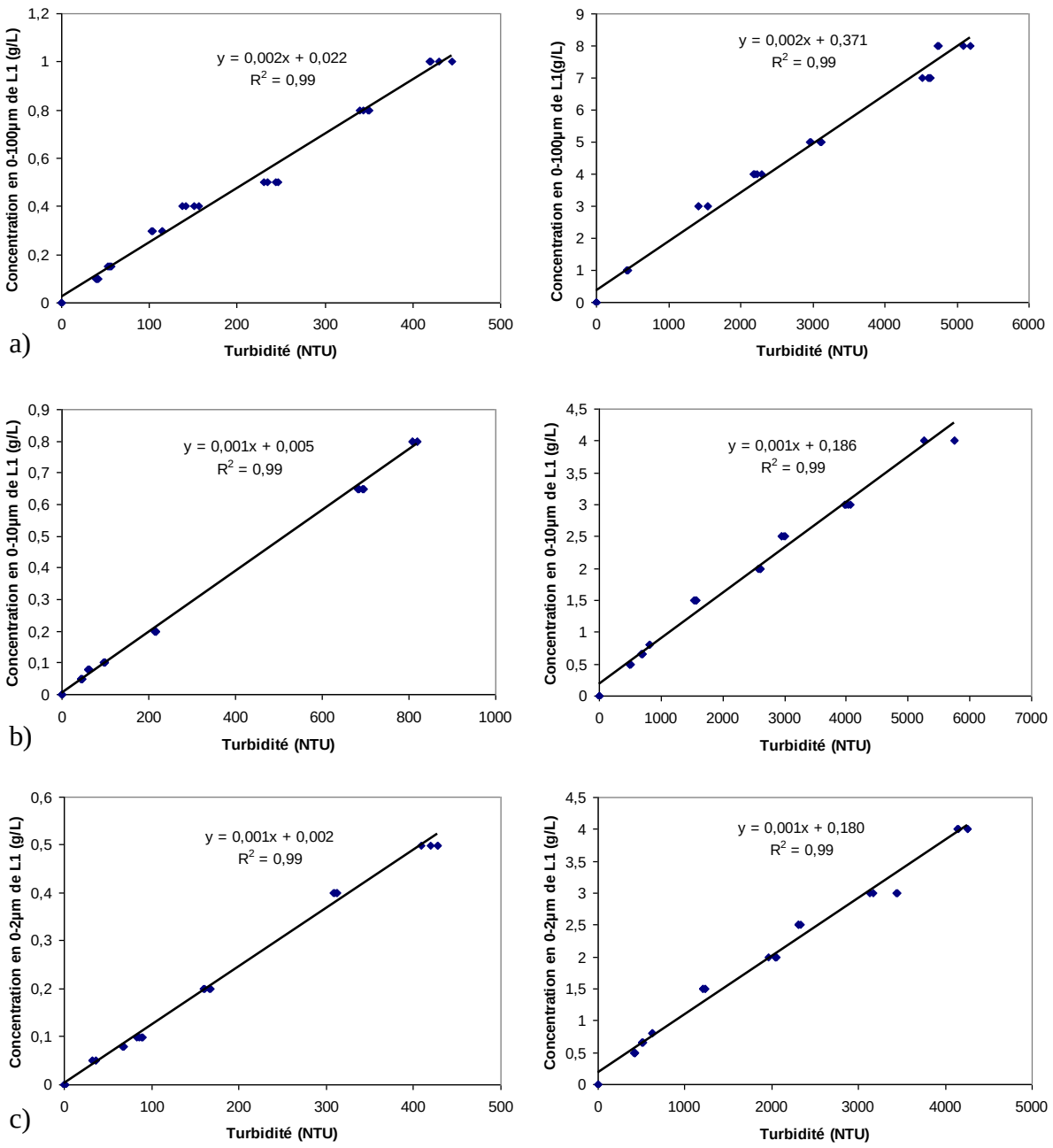


Figure 2.32 : Droites de calibration du turbidimètre pour les fractions :

a) 0-100 µm du L1 pour les gammes allant de 0,1 à 1 g/L (à gauche) et 1 à 8 g/L (à droite)

b) 0-10 µm du L1 pour des gammes allant de 0,05 à 0,8 g/L (à gauche) à 0,5 à 4 g/L (à droite) et

c) 0-2 µm du L1 pour des gammes allant de 0,05 à 0,5 g/L (à gauche) à 0,5 à 4 g/L (à droite)

La figure 2.33 présente l'évolution au cours du temps des mesures de suspensions standards de la fraction 0-2 µm. Quelle que soit la suspension standard considérée, les concentrations obtenues correspondent à la mesure théorique compte tenu de l'incertitude de mesure estimée précédemment et reportée sur la figure. Aucune dérive temporelle de la mesure de NTU n'est

donc observée pour les standards 0-2 µm suivis. Nous considérons que ces résultats sont transposables aux fractions 0-10 µm et 0-100 µm.

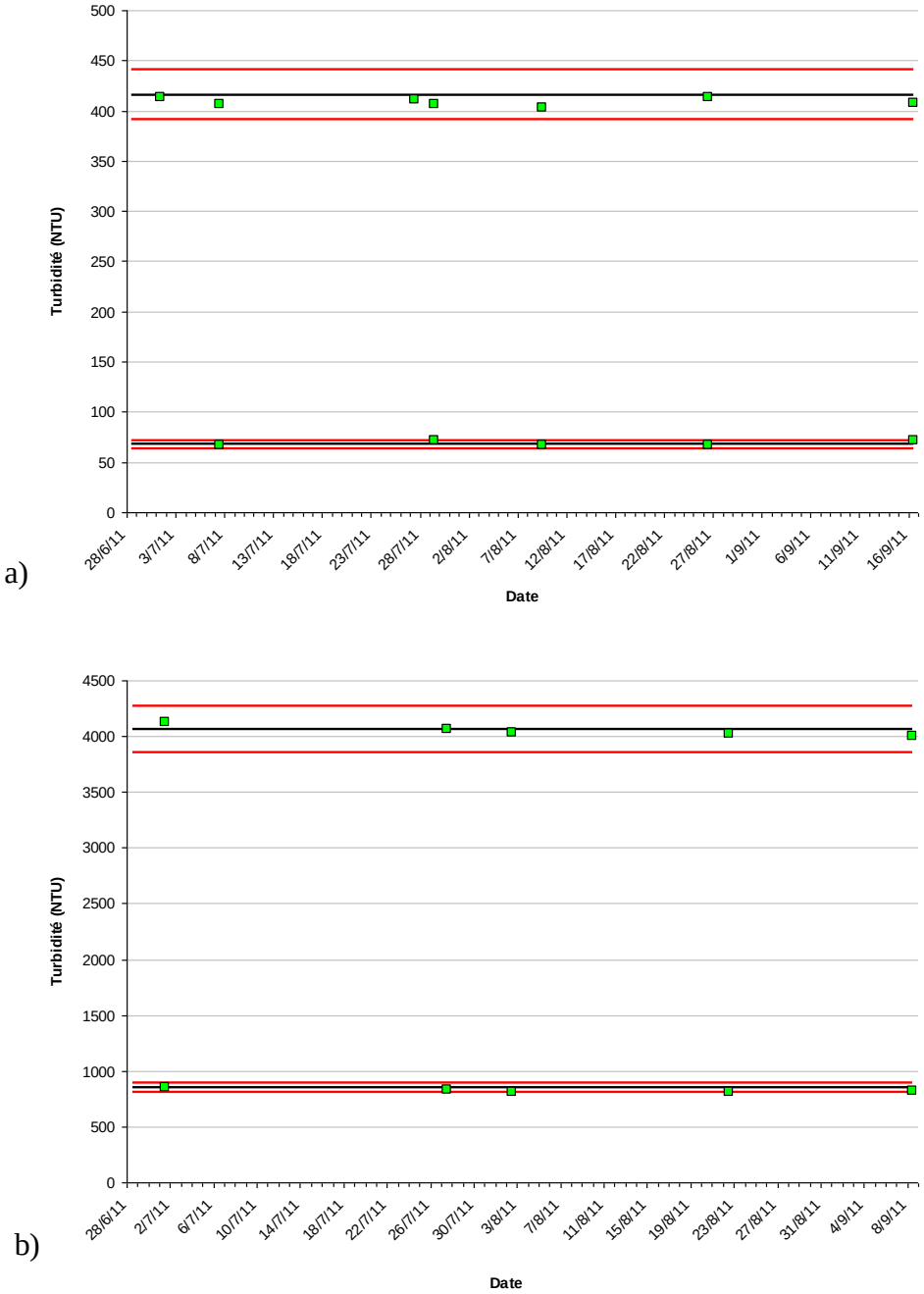


Figure 2.33 : Valeurs de turbidimétrie obtenues pour les standards de concentrations a) 0,08 g/L et 0,5 g/L et b) 1 g/L et 4 g/L. En noir est représenté la valeur de référence et en rouge l'écart accepté par rapport cette valeur

4.2.2 Identification des particules en suspension

Les suspensions recueillies à la base des expérimentations sur colonnes de L1 et de L1/L2 sont analysées pour déterminer les différentes phases minérales qui ont migrées.

4.2.2.1 Principe

Les différentes phases minérales du 0-2 µm du L1, du L2 et de la fraction 0-0,2 µm du L1 ont été identifiées par diffraction des rayons X (figure 2.35). Le pôle 0-2 µm du L1 est caractérisé par la présence de smectite (pic à 12,5 Å en N qui se déplace à 17 Å en EG), illite (pics à 10 Å, 4,98 Å et 3,32 Å en N), kaolinite (pics à 7,14 Å et 3,57 Å en N), et quartz (pics à 4,25 Å et 3,34 Å en N). Le pôle 0-0,2 µm du L1 est principalement composé de smectite avec des traces d'illites et de kaolinite. Enfin, le pôle 0-2 µm du L2 est dépourvu de smectite et caractérisé par la présence de chlorite (pic à 14 Å en N et EG). Illite, kaolonite et quartz sont aussi présents dans ce pôle. Les suspensions issues des simulations de pluie pour les expérimentations L1 et L1/L2 ont aussi été caractérisées par diffraction des rayons X. L'analyse de ces différents spectres DRX a été faite par la méthode de résolution multivariée de courbes par moindres carrés alternés (MCR-ALS : Multivariate Curve Resolution-Alterning Least Squares, Tauler, 1995). Cette analyse permet de reconstruire un spectre constitué de mélanges inconnus (suspension des simulations de pluies), par une résolution multivariée des courbes des différents pôles purs qui le composent (ici 0-2 µm du L1, du L2 et 0-0,2 µm du L1).

Pour les expérimentations sur colonne de type L1, nous avons fait l'hypothèse sur la base de la littérature que les particules migrantes sont composées des fractions 0-2 µm et 0-0,2 µm du L1, et pour les colonnes de type L1/L2 nous avons ajouté la fraction 0-2 µm de L2 (figure 2.34). Dans la pratique, l'ensemble de ces fractions a été utilisé comme pôles purs dans la MCR-ALS.

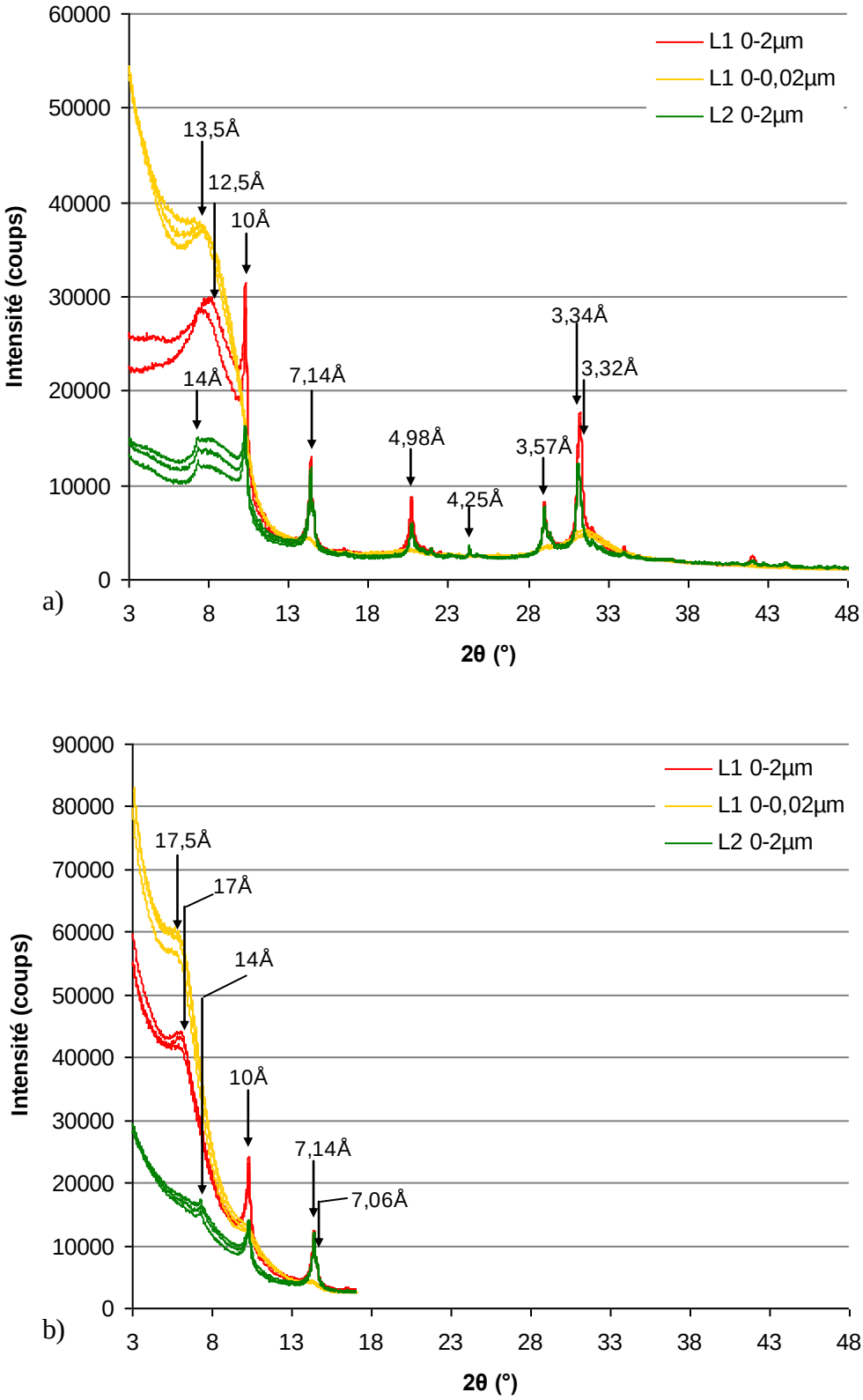


Figure 2.34 : Diffractogrammes des lames normales et glycolées des fractions 0-2 µm L1, 0-0,02 µm L1 et 0-2 µm L2

Dans le cas des suspensions collectées à la base des colonnes de L1 seul, le traitement des résultats par MCR-ALS devrait donner une contribution nulle au pôle 0-2 µm de L2 absent de

cette expérimentation par construction. Or la réalité est plus complexe et une faible contribution de la fraction 0-0,2 µm apparaît pour ce pôle (figure 2.35). Nous avons considéré que : 1) ces valeurs étaient de l'ordre du bruit de fond, et 2) dans la suite de ce travail, toute contribution inférieure à cette valeur était de l'ordre de grandeur du bruit de fond.

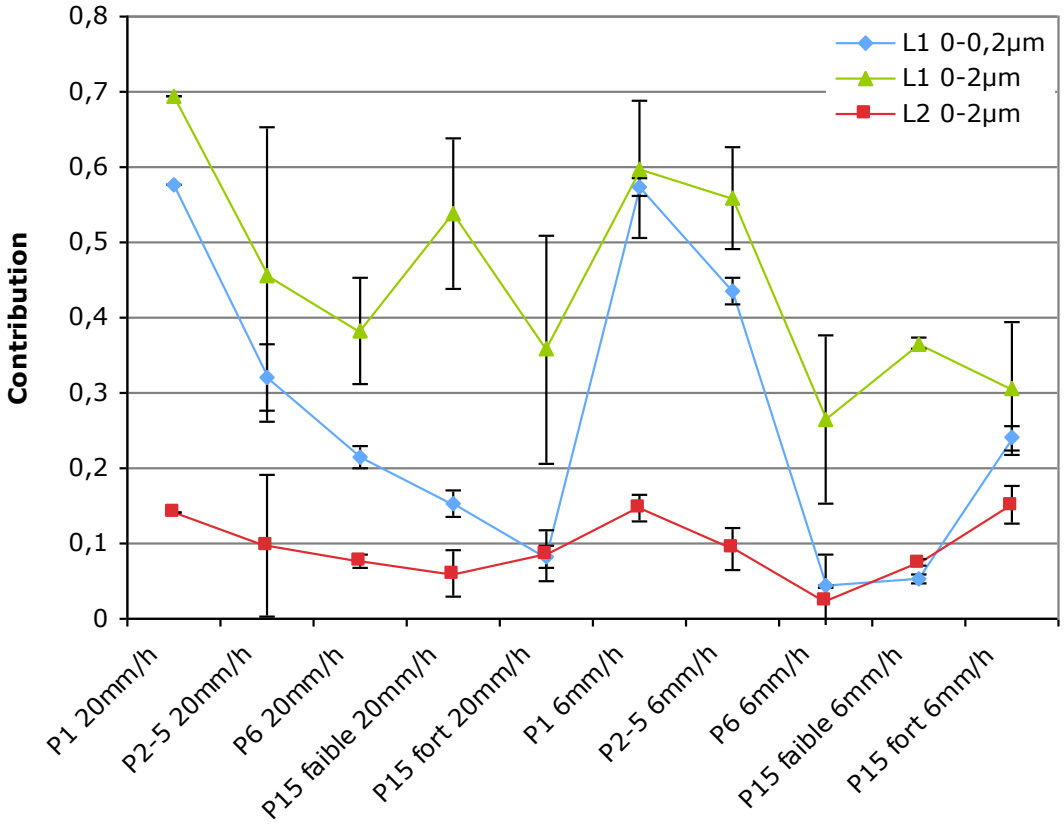


Figure 2.35 : Résultats des traitements MCR-ALS des diffractogrammes des suspensions collectées à la base du L1

4.2.2.2 Limite de l'approche

Les traitements par MCR-ALS ont été réalisés uniquement sur les lames EG des échantillons, pour lesquelles nous disposions de trois répétitions. Les résultats présentés résultent d'une moyenne des ces trois répétitions avec un écart type (figure 2.35). Les traitements n'ont pas pu être réalisés sur les lames N pour lesquelles nous ne disposons pas de répétition et la matière disponible ne nous permettait pas de refaire plusieurs lames. Or des analyses réalisées au granulomètre laser sur les suspensions des expérimentations montrent la présence d'une fraction plus grossière (5-10 µm) (figure 2.36a), présence confirmée par la présence sur les résultats de DRX d'une plus forte abondance de quartz sur les lames normales (figure 2.36b). Sur les lames EG, le quartz n'apparaît pas du fait de la plage angulaire d'analyse choisie. De ce fait, les résultats fournis par la MCR-ALS ne sont pas quantitatifs mais présentent uniquement un rapport d'abondance des espèces présentes.

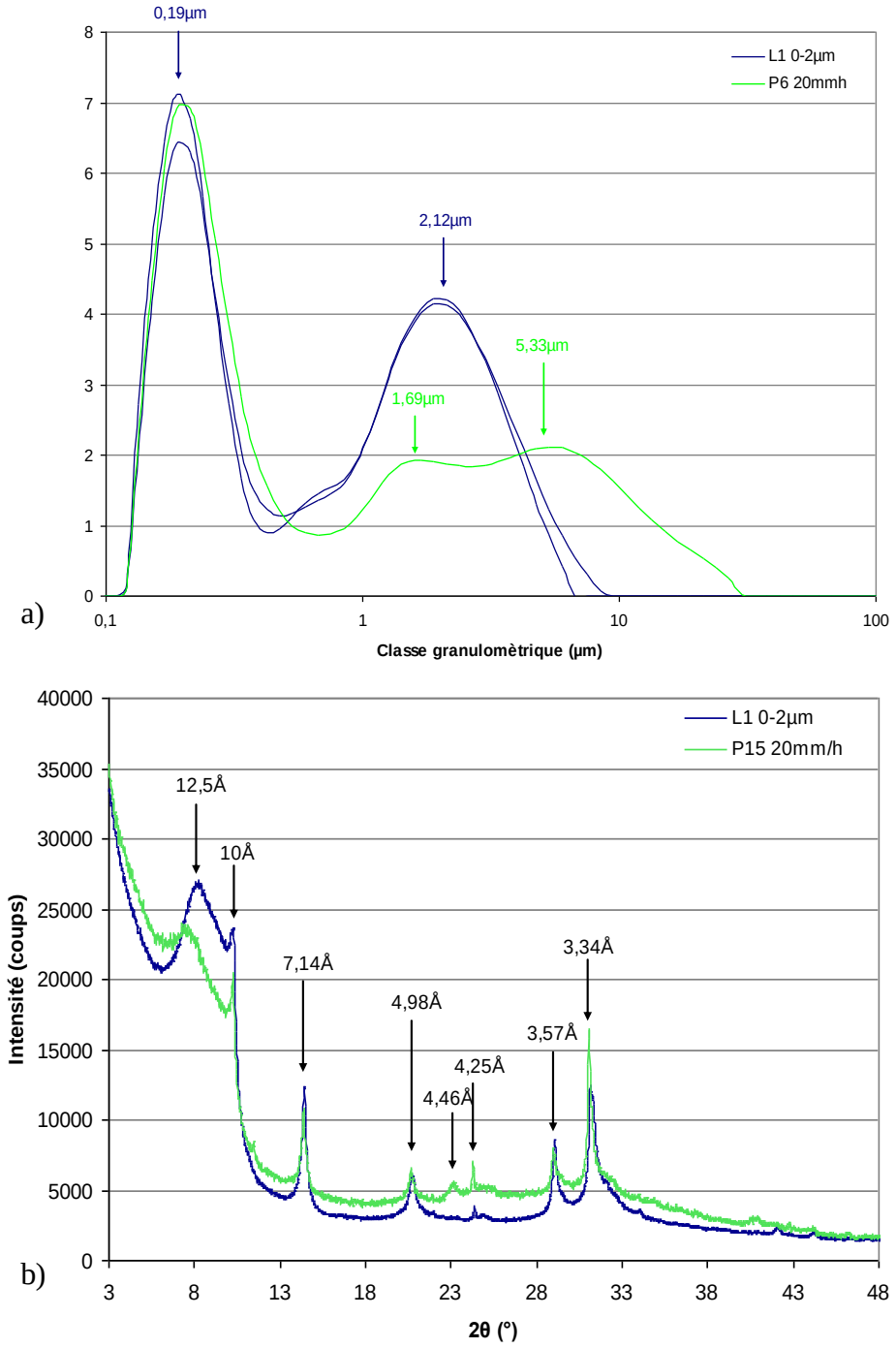


Figure 2.36 : a) distribution granulométrique et b) diffractogrammes des lames N de la fraction 0-2 µm du sol L1 et de la suspension récoltée après les pluies 6 (a) et 15 (b) pour l'intensité 20 mm/h de l'expérimentation L1

Pour avoir des résultats quantitatifs, il faudrait réaliser une analyse MCR-ALS sur les lames N en ajoutant un pôle pur : la fraction 0-5 µm du L1 comme le démontre un essai de déconvolution manuel (figure 2.37).

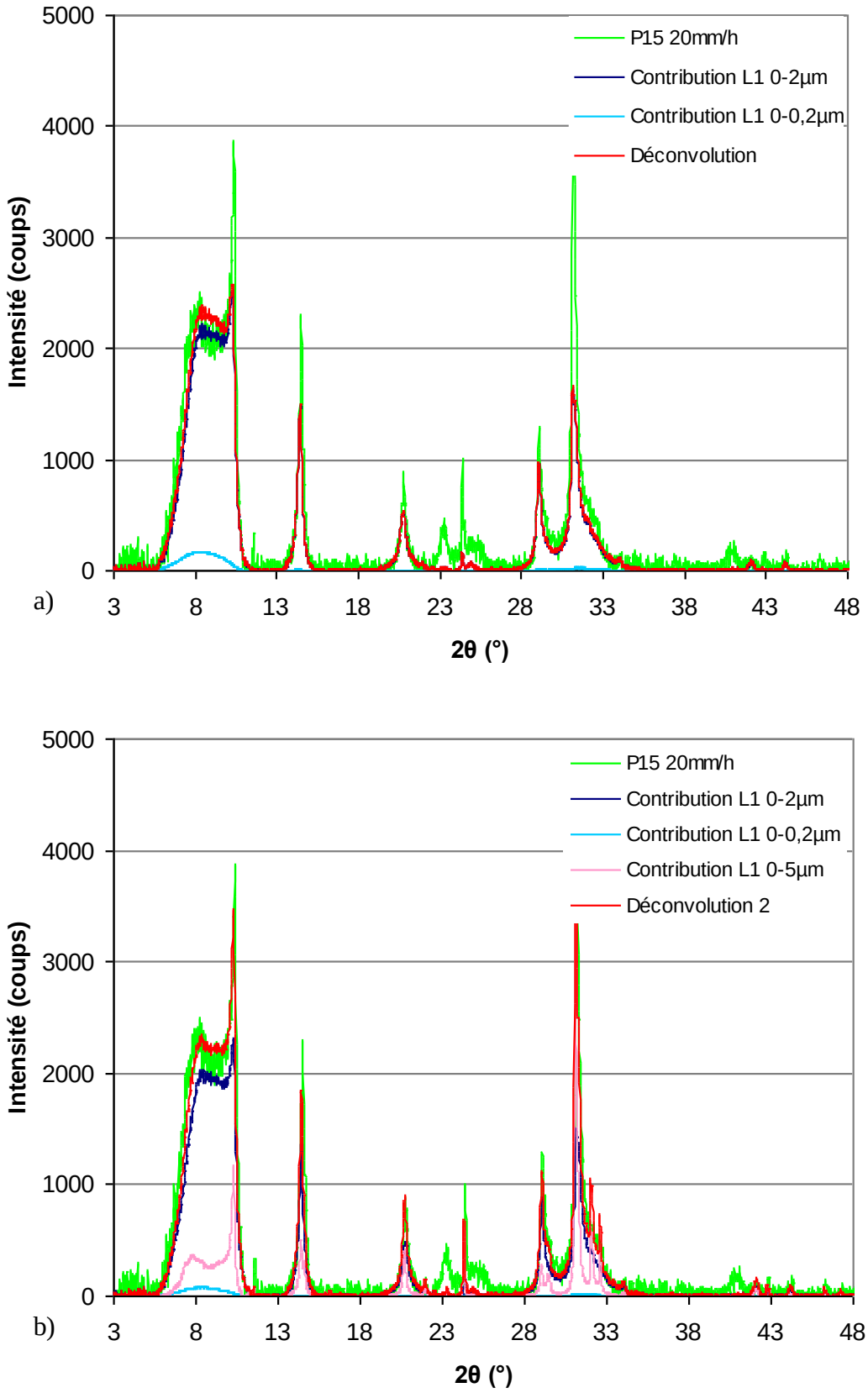


Figure 2.37 : Contribution du a) 0-2 µm et 0-0,2 µm du L1 et b) du 0-2, 0-0,2 et 0-5 µm du L1 au diffractogramme des rayons X normal de la suspension récoltée après la pluie 15, 20 mm/h. Pour faciliter la déconvolution le bruit de fond a été enlevé

4.3- Conclusion

Pour l'expérimentation d'éluviation sur sol remanié L0/LQ, sur tous les traceurs testés, seules la spectroscopie infra rouge et la mesure des teneurs en Fe et Al extrait à l'eau régale permettent de quantifier des apports de 0-2 µm de L0 dans le LQ. Les limites de quantification de ces deux méthodes sont respectivement de 0,05 % et de 0,8 %.
Les résultats obtenus sur des échantillons inconnus issus de l'arrêt des colonnes L0/LQ sont cohérents pour les deux méthodes, ce qui permet une validation de l'approche utilisée ici.

Pour l'expérimentation L1/L2, parmi les traceurs testés, seule la diffraction des rayons X sur lame orientée glycolée permet de quantifier des apports de 0-2 µm de L1 dans le L2 pour des concentrations en L1 supérieures à 2 %. De telles concentrations sont déjà considérables pour le processus analysé, ainsi d'autres approches devront être envisagées. Les approches proposées jusqu'ici sont basées sur l'analyse de l'intégralité de la masse du sol. Or de nombreux travaux mettent en évidence l'importance des pores de grande taille sur les transferts de particules (Jarvis et al., 1999 ; Finke et Hutson, 2008 ; Michel et al., 2010). Des analyses de diffraction des rayons X sur lame mince de sol recoupant des macropores du L2 pourront être envisagées. De telles analyses nécessitant l'accès au rayonnement synchrotron n'ont pu être envisagées dans le cadre de cette thèse.
Pour la mesure des concentrations des particules en suspensions, les droites de calibrations établies au turbidimètre donnent des résultats satisfaisants. Cette méthode peut donc être utilisée pour estimer les concentrations de particules 0-100 µm, 0-10 µm et 0-2 µm. L'identification des particules dans les suspensions s'effectue par analyse de diffraction aux rayons X. Le traitement des spectres par la méthode MCRALS nous permet d'accéder à une information couplant identification et taille des particules.

V. Conclusion

Trois expérimentations ont été mises en place au laboratoire :

- deux expérimentations pour représenter le processus d'éluviation, avec du sol remanié L0 et du sol non perturbé L1 et,
- une expérimentation pour représenter le processus d'illuviation avec deux sols non perturbés L1 et L2.

Deux intensités de pluies ont été sélectionnées (20 mm/h et 6 mm/h) avec des quantités d'eau apportée identiques (environ 30 mm) dans les deux cas. Entre chaque pluie, les colonnes sont mises à sécher, et avant de démarrer toute nouvelle pluie le potentiel matriciel du sol doit être revenu à son état initial de -300 hPa. L'analyse de la reproductibilité des conditions initiales et aux limites au cours de l'expérimentation montre que : (1) malgré des difficultés techniques, les deux intensités de pluie de 20 mm/h et de 6 mm/h sont bien obtenues sans trop de dérive temporelle ; (2) par contre, la succion appliquée à la base des colonnes évolue dans le temps pour les expérimentations L1 et L1/L2. Elle est plus faible et sa dynamique est inverse de celle de l'expérimentation L0/LQ ; (3) le potentiel qui conditionne la pluie à t+1 est plus variable dans le cas des expérimentations L0/LQ que l'on sèche dans l'étuve, que dans les deux autres expérimentations L1 et L1/L2. Au final, les expérimentations réalisées présentent une complexité d'ordre technique qui devra être prise en compte lors de l'analyse des résultats.

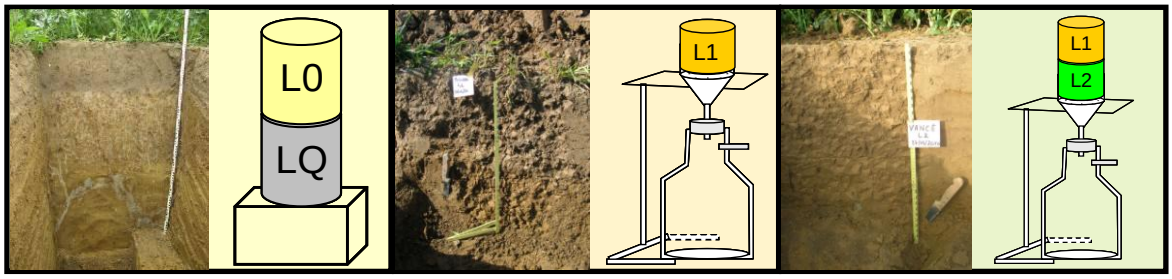
Enfin, après X événements pluvieux, les colonnes sont sorties du dispositif expérimental et analysées selon diverses méthodes pour quantifier le départ (éluviation) ou l'arrivée de particules fines (illuviation).

Pour l'expérimentation sur sol remanié L0/LQ, l'éluviation est mesurée par spectrométrie infra rouge et mesure des teneurs en Fe et Al extraits à l'eau régale. Les limites de quantification de ces deux méthodes sont respectivement de 0,05 % et de 0,8 %.

Pour l'expérimentation L1/L2, l'illuviation peut être mesurée par diffraction des rayons X sur lame orientée glycolée pour des concentrations de la fraction 0-2 µm de L1 supérieures à 2 % de la fraction 0-2µm du L2. De telles concentrations sont déjà considérables pour le processus analysé et ne pemettront peut-être pas d'analyser des départs précoces de particles.

Chapitre 3

Quelles particules migrent dans les sols ?



I. Introduction

Le lessivage est un processus de transfert vertical de particules dont les caractéristiques (taille, proportion et composition minéralogique) restent sujettes à débat dans la littérature. En ce qui concerne la taille, De Jonge et al. (2004) décrivent des migrations de particules de taille comprise entre 2 et 10 µm, alors que d'autres travaux mentionnent principalement des transferts de smectites, qui sont les argiles les plus fines (Mercier et al., 2000). Le lessivage peut être subdivisé en 3 principaux ensembles de mécanismes : la mobilisation des particules, leur transport et leur déposition. La mobilisation par mise en suspension des particules peut être considérée comme responsable des caractéristiques des particules qui vont par la suite migrer et se déposer. Pour décrire cette mobilisation, nous proposons donc ici de développer un test de laboratoire qui permettrait de connaître, a priori et en fonction du type de sol, les caractéristiques des particules mobilisables lors de nos expérimentations de simulation de pluie. Nous proposons donc dans ce chapitre :

- de décrire la granulométrie des particules recueillies à la base des colonnes L1 et L1/L2 soumises à la simulation de pluie. En effet, les particules mobilisables feront partie de ces classes granulométriques (même si l'on ne peut exclure que d'autres puissent avoir été mobilisées puis s'être redéposées très rapidement) ;
- d'analyser les tests disponibles dans la littérature, puis de proposer le protocole le mieux adapté à l'étude du lessivage. En effet, la question de la mobilisation a été abondamment traitée par les auteurs qui s'intéressent à l'érosion ou qui analysent la fraction fine des sols. Peu de tests étant spécifiquement dédiés au lessivage, nous adapterons ces protocoles à notre cas d'étude, et en particulier à la taille des particules mobilisées que nous aurons décrites précédemment ;
- de mettre en œuvre ce test sur nos échantillons et de comparer les résultats aux résultats des expérimentations les plus proches disponibles dans la littérature.

Ces trois points structurent la suite de ce chapitre.

II. Quelle est la fraction granulométrique du sol qui migre ? Résultats expérimentaux sur colonnes de sol

Si dans la littérature, le lessivage est plus souvent décrit comme le résultat de la migration de particules fines, i.e. inférieures à 2 µm, voire très fines, i.e. inférieures à 0,2 µm (Mercier et al., 2000), certains auteurs ont observé la migration de particules dont la taille peut atteindre 10 µm (De Jonge et al., 2004). Pour trancher sur ce point, nous avons quantifié la concentration des particules collectées à la base de nos expérimentations sur colonnes de sol non perturbé L1 et L1/L2 selon trois fractions granulométriques :

- la fraction totale, c'est-à-dire ici la fraction inférieure à 100 µm, du fait de la présence d'un filtre de nylon de granulométrie 110 µm placé à la base des colonnes ;
- les fractions 0-10 µm et 0-2 µm obtenues par sédimentation de la suspension initiale selon la loi de Stockes.

Nous avons utilisé les données des pluies 13 à 19 pour l'intensité 20 mm/h et 14 à 19 pour l'intensité 6 mm/h car, pour les pluies antérieures, seule la fraction 0-100 µm a été mesurée. Les mesures ont été réalisées par turbidimétrie (voir chapitre 2).

Quelles que soient la colonne et l'intensité de la pluie, nous observons une forte corrélation entre les concentrations en particules 0-100 µm collectées à la base des colonnes et les concentrations en particules 0-10 µm: le coefficient de détermination des relations linéaires définies est supérieur à 0,95 pour les colonnes L1 et L1/L2 et les intensités 20 mm/h et 6 mm/h (figures 3.1a et b haut ; 3.2a et b haut).

Ces résultats montrent que la concentration en particules de taille supérieure à 10 µm n'est pas nulle. Différentes hypothèses peuvent être proposées pour expliquer ce phénomène, en contradiction apparente avec la littérature :

- soit il y a une migration effective de particules supérieures à 10 µm dans les sols avec néanmoins une mobilisation préférentielle des fractions inférieures à 10 µm surreprésentées dans les particules mobilisées par rapport à leur abondance totale dans le sol qui est de 43 % ;
- soit les particules supérieures à 10 µm résultent d'un soutirage artificiel lié à la discontinuité présente à la base du cylindre ;
- soit, enfin, les particules de taille supérieure à 10 µm résultent d'une réagrégation de particules plus fines dans la suspension de drainage.

De plus, les résultats montrent que, pour les colonnes L1, toutes les particules inférieures à 10 µm ayant percolé sont inférieures à 2 µm. Pour les colonnes L1/L2, environ 70 % des particules inférieures à 10 µm sont des particules inférieures à 2 µm (figures 3.1a et b milieu ; 3.2a et b milieu). Ainsi, l'absence quasi totale de mobilisation de la fraction 2-10 µm renforce l'hypothèse que les fractions supérieures à 10 µm mobilisées dans nos expérimentations résulteraient plutôt d'un artefact expérimental. Pour cette raison, dans la suite de ce travail, seuls les résultats obtenus sur la fraction 0-2 µm seront analysés[1].

Ainsi, pour les sols analysés, les particules qui migrent sont majoritairement de taille inférieure à 2 µm. Ce résultat est cohérent avec les résultats rencontrés le plus fréquemment dans la littérature (Jamagne et Pédro, 1981). La proportion des particules inférieures à 2 µm par rapport aux particules totales (< 100 µm) recueillies à la base des colonnes ne dépend pas des colonnes pour une expérimentation donnée. Pour les colonnes L1, elle ne dépend pas non plus de l'intensité de pluie, et pour les colonnes L1/L2, elle diffère légèrement (26 % à 20 mm/h et 22 % à 6 mm/h), mais cette variation n'est probablement pas significative.

[1] Pour les pluies 1 à 12 pour l'intensité 20 mm/h et 1 à 13 pour l'intensité 6 mm/h, les concentrations en particules 0-2 µm seront estimées à partir des concentrations en 0-100 µm à l'aide des modèles définis sur les figures 3.1a et b bas ; 3.2a et b bas. Ces modèles ont été validés par le calcul des erreurs quadratiques moyennes sur les dernières pluies : pour les colonnes L1, elles sont de 0,007 g/L pour l'intensité 20 mm/h et 0,009 g/L pour l'intensité 6 mm/h ; pour les colonnes L1/L2, elles sont de 0,006 g/L et 0,009 g/L pour les intensités 20 mm/h et 6 mm/h respectivement.

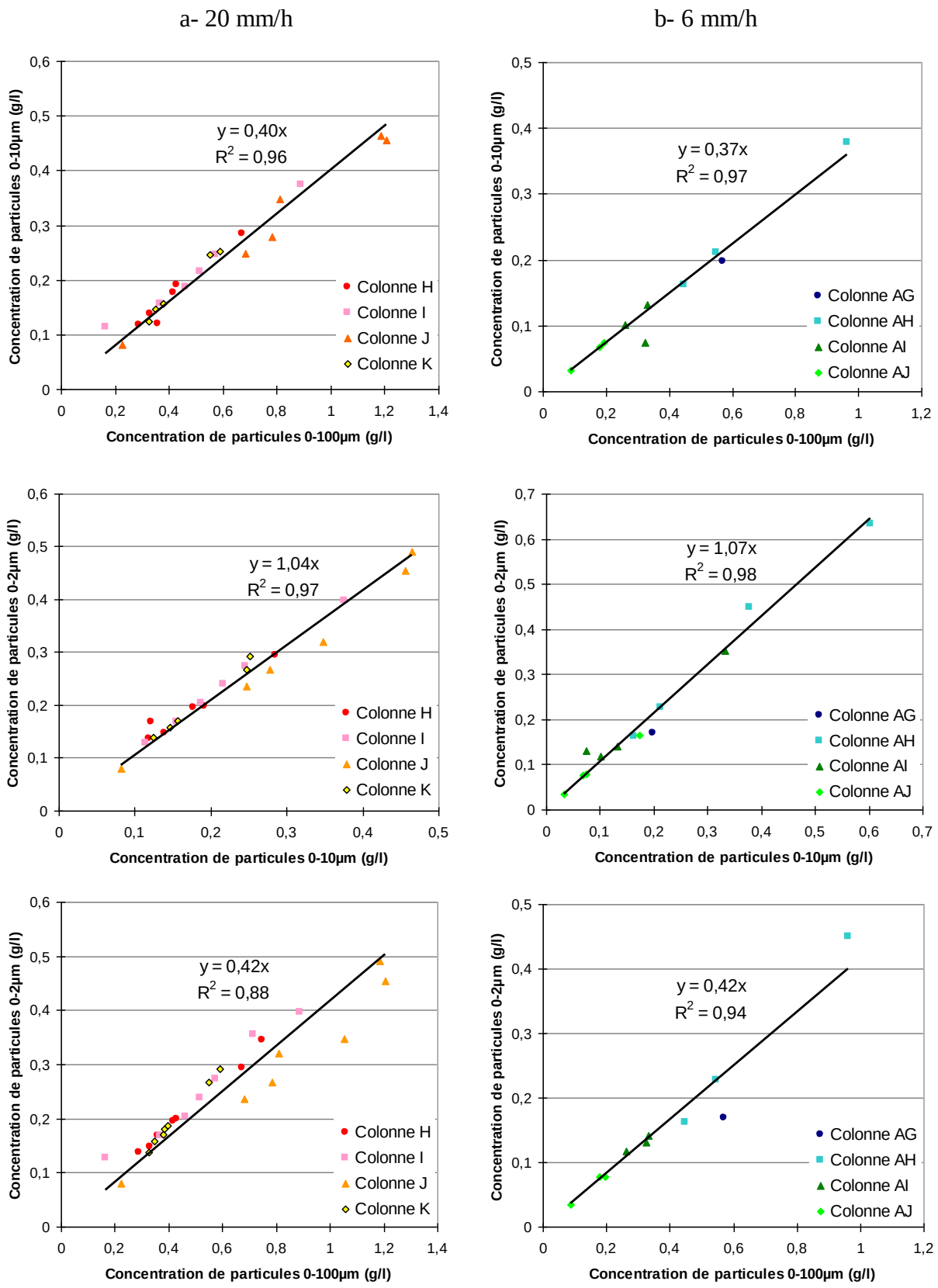


Figure 3.1 : Concentration en particules dans l'eau percolée des expérimentations sur les colonnes L1. De haut en bas 0-10 µm en fonction de 0-100 µm ; 0-2 µm en fonction de 0-10 µm et 0-2 µm en fonction de 0-100 µm pour a) l'intensité 20 mm/h et b) l'intensité 6 mm/h

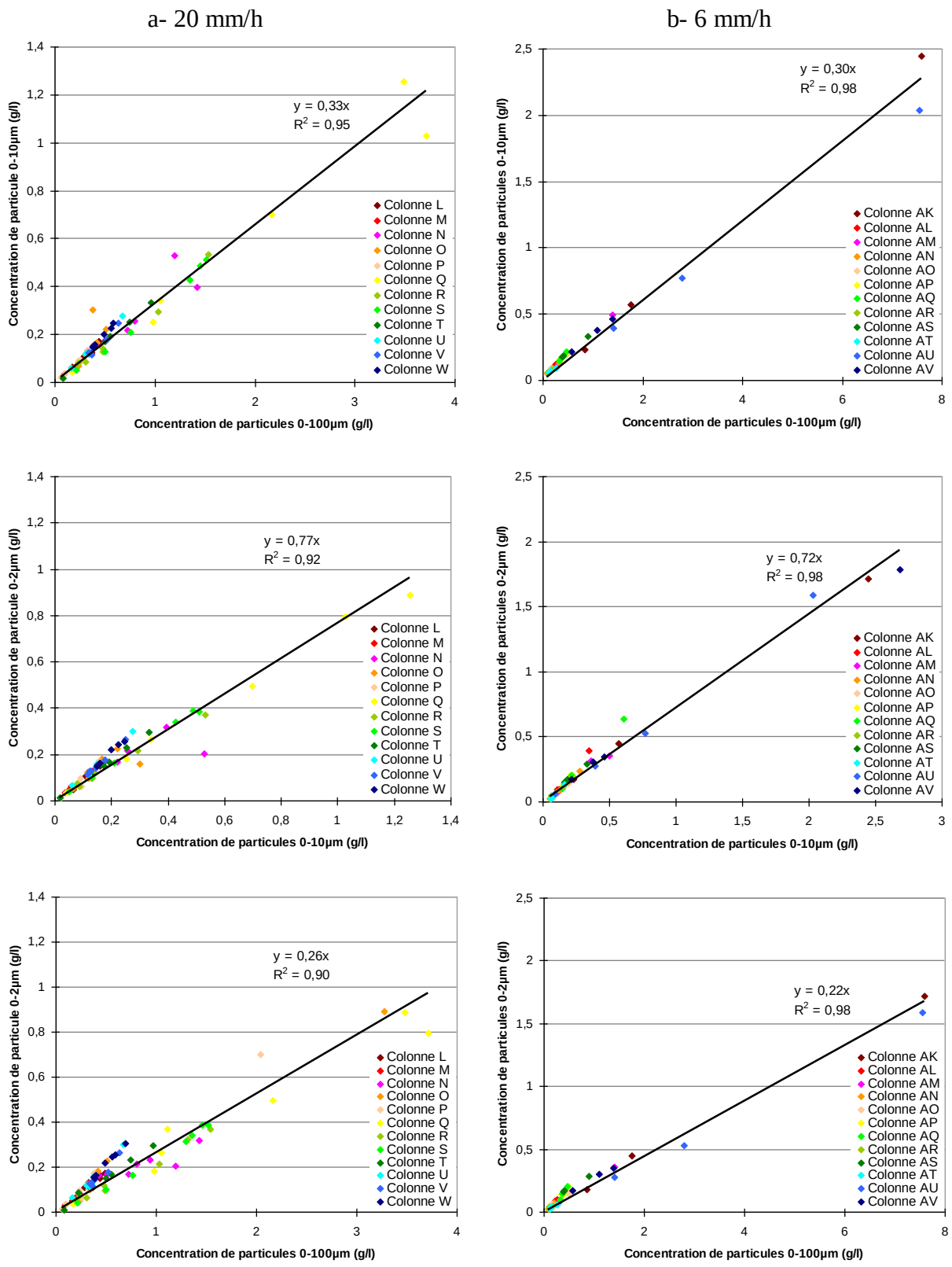


Figure 3.2 : Concentration en particules dans l'eau percolée des expérimentations sur les colonnes L1/L2. De haut en bas 0-10 µm en fonction de 0-100 µm ; 0-2 µm en fonction de 0-10 µm et 0-2 µm en fonction de 0-100 µm pour a) l'intensité 20 mm/h et b) l'intensité 6 mm/h

III. Analyse des données de la littérature et proposition d'un nouveau protocole pour caractériser les particules mobilisées lors du lessivage

3.1- Les tests de dispersion : analyse de la littérature

La structure du sol, c'est-à-dire l'arrangement des particules du sol entre elles (Dexter, 1988), peut être fortement altérée par l'eau, que ce soit sous l'impact des gouttes de pluie qui arrivent à la surface du sol, ou sous l'effet de l'eau qui circule à la surface ou dans le sol. De nombreux tests de laboratoire (tests de stabilité structurale) ont été développés pour tenter de qualifier la fragilité, ou la stabilité de cette structure. La diversité des tests de stabilité structurale s'explique par des objectifs différents. Certains sont utilisés pour prédire le transfert latéral des particules lié aux processus d'érosion (Yoder, 1936 ; Emerson, 1967; Pojasok et Kay, 1990 ; Brubaker et al., 1992 ; Le Bissonnais, 1996) tandis que les autres sont associés à la dispersion des argiles et au transfert vertical des particules (Rasiah et al., 1992 ; Kjaergaard et al., 2004c ; Seta et Karathanasis, 1996 ; Dexter et al., 2011). Les tests en relation avec les processus d'érosion se focalisent sur les processus de désagrégation des agrégats par éclatement et gonflement différentiel qui sont à l'origine de la création de micro-agrégats. Les tests de dispersion des argiles s'appuient sur des processus liés à la réduction de forces d'attraction entre particules. Cela dit, il a été reconnu que les tests liés à la dispersion des argiles dans l'eau sont de bons indicateurs de l'érodibilité des sols, et sont souvent utilisés comme paramètre dans les modèles d'érosion (Brubaker et al., 1992), ou bien dans les modèles de transfert de particules dans la zone non saturée (Jarvis et al., 1999 ; Villholth et al., 2000).

Au plan méthodologique, ces tests reposent tous sur la mise en contact plus ou moins brutale d'un échantillon de sol avec de l'eau, puis sur l'analyse des fractions ainsi dispersées. Ils diffèrent par trois principaux aspects :

- i) le prétraitement des échantillons,
- ii) la façon de mettre en contact l'échantillon de sol avec la solution,
- iii) la taille des fractions mises en suspension étudiées : soit la fraction inférieure à 2 µm, soit des fractions plus grossières, supérieures à 50 µm ou même supérieures à 250 µm (tableau 3.1).

Tableau 3.1 : Différents tests de stabilité existant dans la littérature : objectifs et mise en œuvre

References	objectif	nom du test	conditionnement des échantillons	pretraitement de l'échantillon	mode d'humectation	méthode	rapport solide/eau	nature chimique de l'eau	fraction analysée
Le Bissonnais, 1996	erodibilité	humectation rapide	agrégats secs de 3-5 mm (40°C pendant 24h)	néant	rapide	immersion	1/10	eau permutée	>50µm
Le Bissonnais, 1996	erodibilité	humectation lente	agrégats secs de 3-5 mm (40°C pendant 24h)	néant	lent	-	-	eau permutée	>50µm
Le Bissonnais, 1996	erodibilité	Agitation mécanique	agrégats secs de 3-5 mm (40°C pendant 24h)	néant	rapide	10 retournements manuels	1/50	eau permutée	>50µm
Pojasok et Kay, 1990	erodibilité	stabilité structurale	agrégats humides de 1-2 mm	néant	lent	agitation mécanique 25rpm	-	eau déionisée	<250µm
Emerson, 1967	erodibilité	stabilité structurale	agrégats secs de 3-5 mm	néant	rapide	immersion	-	eau déionisée	qualitatif
Yoder, 1936	erodibiité	stabilité structurale	agrégats secs de 3-5 mm	néant	rapide	immersion	-	eau déionisée	<250µm
Burbaker et al., 1992	erodibilité	stabilité structurale	agrégats secs de 3-5 mm	néant	-	agitation mécanique pendant une nuit	-	-	<2µm
Rasiah et al., 1992	stabilité structurale - dispersion	stabilité structurale	agrégats humides de 1-2 mm	néant	lent	agitation mécanique 25rpm pendant 3min	1/24	-	<2µm
Kjaergaard et al., 2004	mobilisation in situ de colloides	HE-WDC	agrégats 2mm séché à l'aire	néant	rapide	agitation mécanique 29rpm pendant 16h	1/8	eau de pluie	<2µm
Kjaergaard et al., 2004	mobilisation in situ de colloides	LE-WDC	agrégats à pF2	3 potentiels différents (pF 0,4; pF2; pF4,2)	lent	10 retournements manuels	1/8	eau de pluie	<2µm
Seta et Karathanasis, 1996	mobilisation in situ de colloides	HE-WDC	sol humide	néant	rapide	agitation mécanique 750 rpm toute une nuit	1/20	eau déionisée	<2µm
Dexter et al., 2011	mobilisation in situ de colloides	in situ colloid mobilisation	agrégats à pF2	différents potentiels de pF 2 à pF6	rapide	4 retournements manuels	1/25	eau déionisée	<2µm
Cette étude	mobilisation in situ de colloides	in situ colloid mobilisation	agrégats à pF2,8	potentiel pF2,5 et pF6	rapide	10 retournements manuels	1/8	eau déionisée	<2µm

Les différents prétraitements des échantillons étant à l'origine de variations importantes dans les résultats des tests de stabilité, Le Bissonnais (1996), dans un souci de standardisation, préconise l'utilisation d'agrégats de 3 à 5 mm préalablement séchés à l'air et mis à l'étuve à 40 °C pendant 24 h juste avant de débuter les mesures, de façon à minimiser les variations d'humidités. Le potentiel matriciel des échantillons ainsi obtenu est probablement proche de pF6 d'après les travaux de Dexter et al. (2011). Néanmoins, en ce qui concerne la fraction inférieure à 2 µm, de nombreux travaux montrent qu'un tel séchage diminue considérablement la quantité de particules dispersées (Pojasok and Kay, 1990 ; Brubaker et al., 1992 ; Rasiah et al., 1992 ; Kjaergaard et al, 2004c ; Dexter et al., 2011) .

Pour autant, ces mêmes travaux montrent que de telles conditions de séchage sont possibles dans le milieu naturel, lors des étés chauds et secs ou sous certains climats et ce, au moins pour les premiers millimètres du sol (Dexter et al., 2011). Ils montrent aussi que, bien que difficilement réversible, une humectation d'au moins deux semaines permet au sol de récupérer sa dispersibilité initiale, l'idéal étant néanmoins de déterminer les quantités de particules dispersables sur des sols prélevés et stockés à une teneur en eau proche de la capacité au champ (pF2, Dexter et al., 2011).

Cependant, la question demeure de savoir si cette réduction quantitative est accompagnée d'un changement qualitatif des particules ainsi mises en suspension (taille, minéralogie).

Ainsi, dans la suite de ce chapitre, nous chercherons à déterminer si des tests de stabilité structurale réalisés sur des échantillons secs ou humides peuvent être utilisés comme des indicateurs de la nature de la fraction mobilisable par le lessivage. La variabilité des états hydriques entre échantillons devrait nous permettre de discuter de l'impact des conditions d'humidité initiale de l'échantillon de sol utilisé dans les tests sur le résultat des dits tests.

Dans le paragraphe précédent, nous avons montré que la fraction 0-10 µm collectée à la base des colonnes de sol dans nos expérimentations d'éluviation était essentiellement constituée de particules inférieures à 2 µm. Ainsi, notre protocole s'inspirera des tests développés par Kjaergaard et al. (2004c) et Dexter et al., (2011) qui qualifient cette classe granulométrique et semblent ainsi les plus adaptés à la problématique de l'éluviation.

3.2- Test de laboratoire permettant la caractérisation des particules mobilisées par le lessivage

Le test que nous proposons se déroule en trois phases : une phase de prétraitement des échantillons, une phase de test visant à créer des suspensions qui contiennent les particules mobilisables, et enfin une phase de qualification de ces suspensions. A la suite de Kjaergaard et al, 2004c, nous nommerons nos tests « LE-WDC » (Low Energy-Water Dispersible Colloid).

3.2.1. Prétraitement des échantillons pour le test LE-WDC

Deux potentiels matriciels initiaux ont été testés lors des expérimentations LE-WDC : un sol sec (pF6) et un sol humide (pF2,5) (figure 3.3). Le potentiel à pF2,5 correspond au potentiel matriciel initial des expérimentations en colonne (voir chapitre 2).
Pour le prétraitement à pF6, le sol a été séché à l'étuve à 35 °C pendant 5 jours puis tamisé à 2 mm. Pour le prétraitement à pF2,5, nous avons utilisé des blocs de sol prélevés sur le terrain et stocké hermétiquement en chambre froide à 4 °C jusqu'à utilisation. Ces blocs ont été découpés manuellement en petites mottes centimétriques d'environ 5 cm^3. Une fois séparées, les mottes ont été placées sur une mousse dans des bacs de réhumectation pendant 24 heures pour être saturées. Ces mottes ont ensuite été installées dans une enceinte pneumatique (presse à membrane de Richards ; Richards, 1956) où elles ont été soumises à une pression constante (pF2,5) pendant 7 jours.

3.2.2 Protocole du test LE-WDC

Le test de LE-WDC utilisé a été inspiré des tests de Kjaergaard et al (2004c) et de Dexter et al. (2011) (figure 3.3). La composition chimique de l'eau diffère du protocole de Kjaergaard et al (2004c). Nous utilisons de l'eau osmosée alors que les précédents auteurs utilisent une solution électrolytique proche de l'eau de pluie naturelle. L'eau osmosée est peu différente de l'eau de pluie en terme de pH et de conductivité (voir chapitre 2), cette variation de protocole est donc minime. La mise en contact du sol et de l'eau se fait suivant le protocole de Dexter et al. (2011), soit par immersion rapide des agrégats.
Cent grammes de sol ont été mis en contact avec de l'eau osmosée avec un rapport massique sol/eau de 1/8 dans une bouteille d'un litre et agités manuellement pendant 1 minute (10

retournements). La fraction 0-2 µm a ensuite été extraite par sédimentation sur 8 cm, selon la loi de Stockes.

Pour chaque prétraitement, 2 à 3 répétitions ont été réalisées. Les suspensions récupérées ont ensuite été séparées en trois sous échantillons.

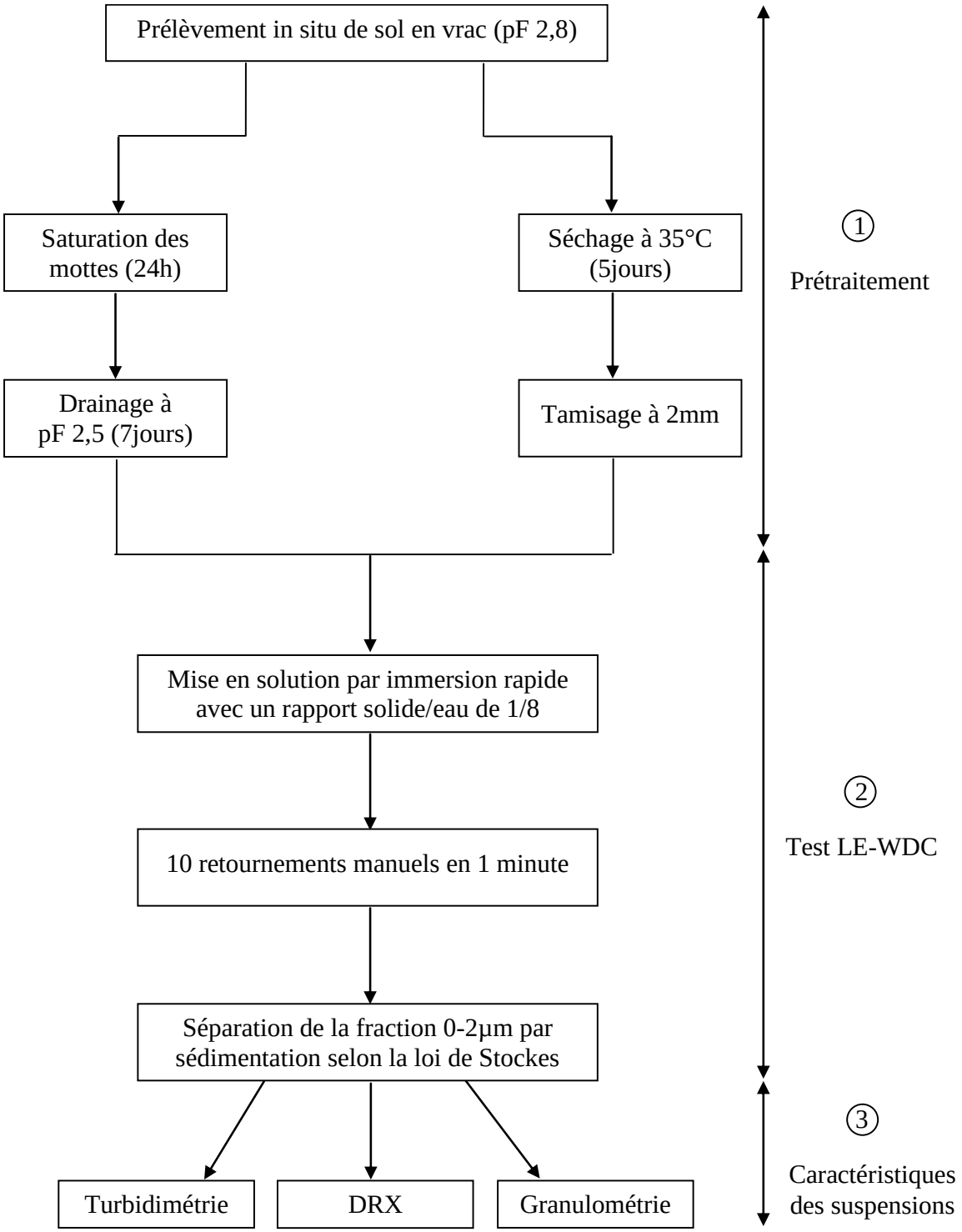


Figure 3.3 : Description synthétique du protocole du test LE-WDC utilisé dans cette étude

3.2.3 Analyse des suspensions obtenues

Chacune des suspensions obtenues a été analysée pour (1) sa teneur en particules par turbidimétrie à l'aide d'un appareil Hach 2100AN; (2) sa composition minéralogique par diffraction des rayons X sur lames orientées normales et glycolées selon le protocole de Robert et Tessier (1974) ; (3) la taille des particules mesurée après ajout de $NaPO_3$ et d'ultra-sons au granulomètre laser Malvern mastersizer 2000.

IV. Apport des tests de stabilité à l'identification de particules mobilisables par le lessivage

4.1- Matériel utilisé

Deux échantillons des sols L0 et L1 ont été utilisés dans cette expérimentation (tableau 3.2).

Pour chacun de ces échantillons, trois suspensions ont été analysées :

- la fraction 0-2 µm totale obtenue par sédimentation selon la loi de Stockes,
- les deux suspensions de fractions 0-2 µm obtenues par le protocole de LE-WDC pour les deux potentiels hydriques initiaux.

Pour l'échantillon L1, on analyse également la fraction 0-2 µm de particules collectées à la base des expérimentations sur colonnes pour les pluies 6 et 15[1].

Les résultats obtenus pour les tests LE-WDC sont comparés (1) entre eux pour déterminer l'effet du potentiel hydrique initial des agrégats sur les particules dispersées ; (2) à la fraction totale inférieure à 2 µm des sols étudiés pour mettre en évidence un éventuel fractionnement de ces tests et (3) aux particules collectées à la base des expérimentations de colonnes de sol de L1 non remaniées pour déterminer si ces tests sont représentatifs du processus d'éluviation.

[1] Pour la pluie 15, on distinguera éventuellement les colonnes dont la concentration en particules dans l'eau percolée est élevée (colonnes AG et AH pour l'intensité 6 mm/h et H et J pour l'intensité à 20 mm/h), et les colonnes dont la concentration est faible (colonnes AI et AJ pour l'intensité 6 mm/h et I et K pour l'intensité à 20 mm/h)

Tableau 3.2 : Caractéristiques pédologiques et minéralogiques des sols utilisés dans les tests LE-WDC. Pour la minéralogie la correspondance est la suivante : - absente ; (+) trace ; + un peu ; ++ présente ; +++ abondante ; ++++ dominante

Sols	Texture du sol (triangle de Jamagne)	Granulomètrie (%)			carbone organique (g kg^{-1})	pH	CEC (mmol.k g^{-1})	Minéralogie en abondance relative					
		0-2µm	2-20 µm	20-2000µm				illite	smectite	vermiculite	kaolinite	quartz	chlorite
L0	limoneux argileux	25,9	33,8	40,3	1,33	5,82	114	+++	++++	(+)	++	+	-
L1	limoneux argileux	30,7	28,5	40,8	3,54	6,19	178	+++	++++	(+)	++	+	-

4.2- Résultats

4.2.1 Quantité de particules libérées par le test LE-WDC

Les quantités de particules dispersées par un test donné sont variables pour un sol donné et un état initial donné. Cette variabilité est plus importante pour L1 que pour L0 et pour les échantillons prétraités à pF6 que pour ceux prétraités à pF2,5 (tableau 3.3).
En condition humide (pF2,5), pour L1, la concentration en 0-2 µm de l'ordre de 37 g/kg est 6 fois plus importante qu'en condition sèche de l'ordre de 6 g/kg. Pour L0, ce ratio est de 2 avec environ 28 g/kg pour la condition humide et 16 g/kg pour la condition séche. Ces différences entre les deux prétraitements sont significatives (ANOVA, test de Fisher au seuil de confiance de 5 % ; tableau 3.3). Néanmoins, quel que soit le prétraitement considéré, seule une faible partie de la fraction 0-2 µm est extraite (tableau 3.3), autour de 12 % pour le prétraitement à pF2,5 et inférieure à 6 % pour le prétraitement à pF6. Les différences entre les deux sols ne sont pas significatives pour les prétraitements à pF2,5 ce qui n'est pas le cas pour les prétraitements à pF6 (tableau 3.3).

Tableau 3.3 : Quantités de particules libérées par les tests LE-WDC pour les deux sols L0 et L1. Un test de comparaison des moyennes au seuil de 5 % (test de Fisher) a été réalisé. Les résultats sont indiqués par des lettres en exposant dans le tableau

Sol	Rapport solide/solution	Mode d'humectation	pF	Particules dispersées (mg/kg)	Fraction <2µm extraite (%)
L0	1/8	imédiate	2,5	27680^{a} ± 3760	11 ± 1
L0	1/8	imédiate	6	15760^{b} ± 1840	6 ± 1
L1	1/8	imédiate	2,5	37200^{a} ± 5280	12 ± 2
L1	1/8	imédiate	6	5760^{c} ± 1440	2 ± 1

4.2.2 Minéralogie des particules dispersées par le test LE-WDC. Comparaison avec la minéralogie de la fraction totale 0-2 µm et des particules lessivées lors des expérimentations sur colonnes de sol

Les figures 3.4 et 3.5 présentent, pour le sol L0 et le sol L1, les diffractogrammes obtenus pour le traitement normal (i.e. échangé Na dans notre cas) et glycolé sur la fraction 0-2 µm totale du sol et les suspensions obtenues par le test LE-WDC aux deux états hydriques

initiaux pF6 et pF2,5. La figure 3.6 présente également, pour le sol L1, les diffractogrammes des particules lessivées lors des expérimentations sur colonnes de sol.

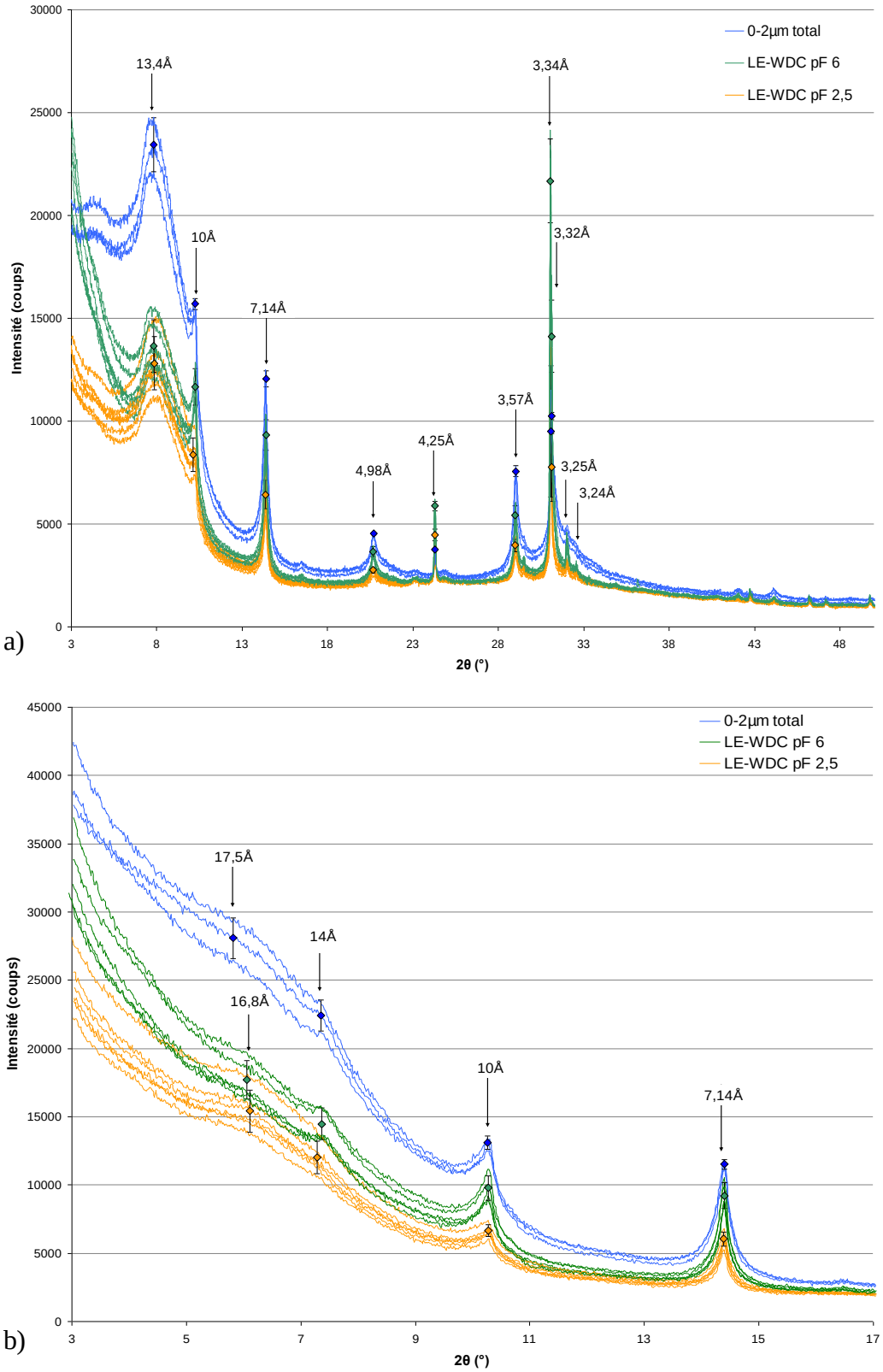


Figure 3.4 : Diffractogrammes obtenus sur la fraction 0-2 µm totale du sol, et la fraction 0-2 µm des suspensions issues du test LE-WDC après un prétraitement à pF6 ou à pF2,5 pour le sol L0. a) Traitement N et b) Traitement EG

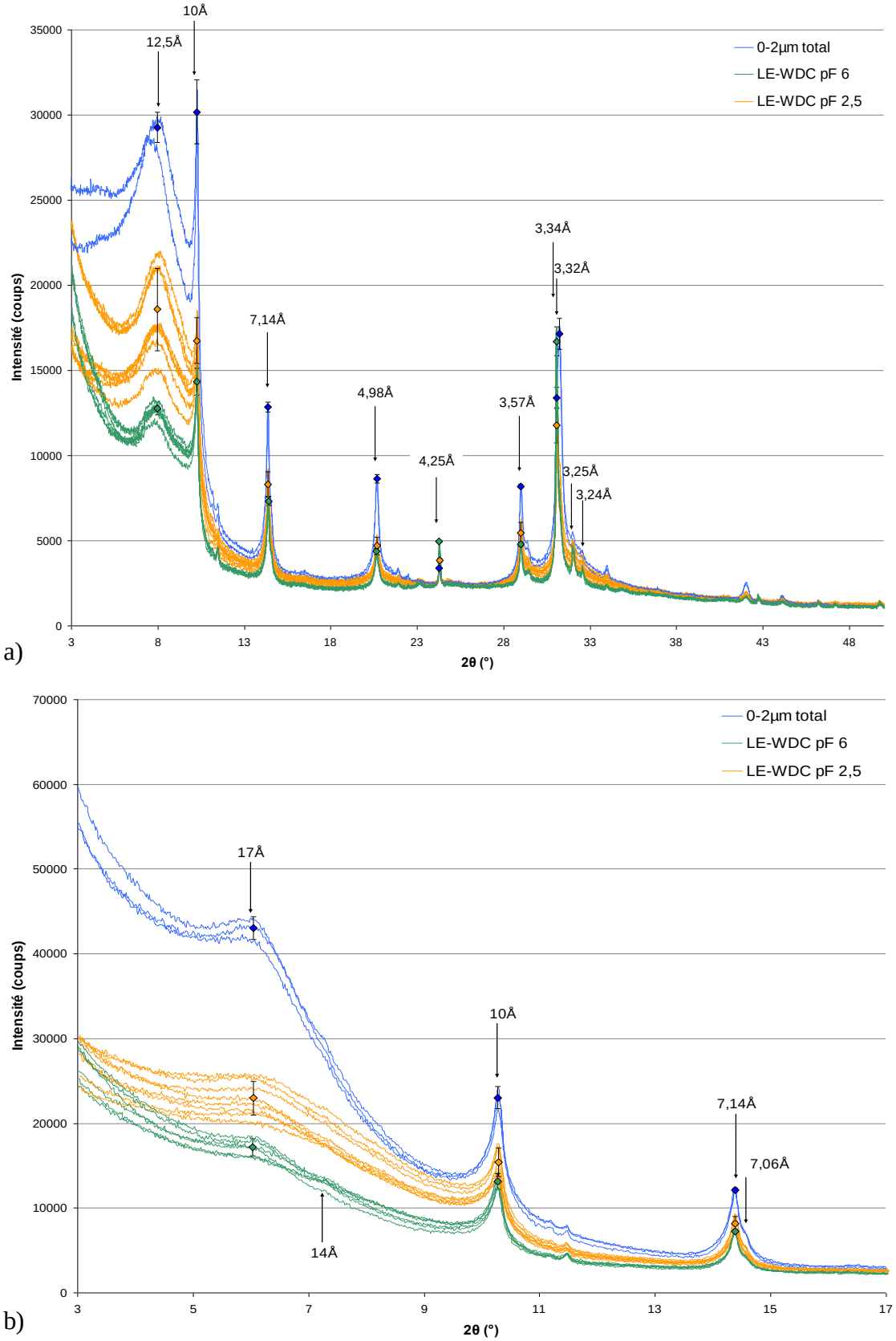


Figure 3.5 : Diffractogrammes obtenus sur la fraction 0-2 µm totale du sol,et la fraction 0-2 µm des suspensions issues du test LE-WDC après un prétraitement à pF6 ou à pF2,5 pour le sol L1.
a) Traitement N et b) Traitement EG

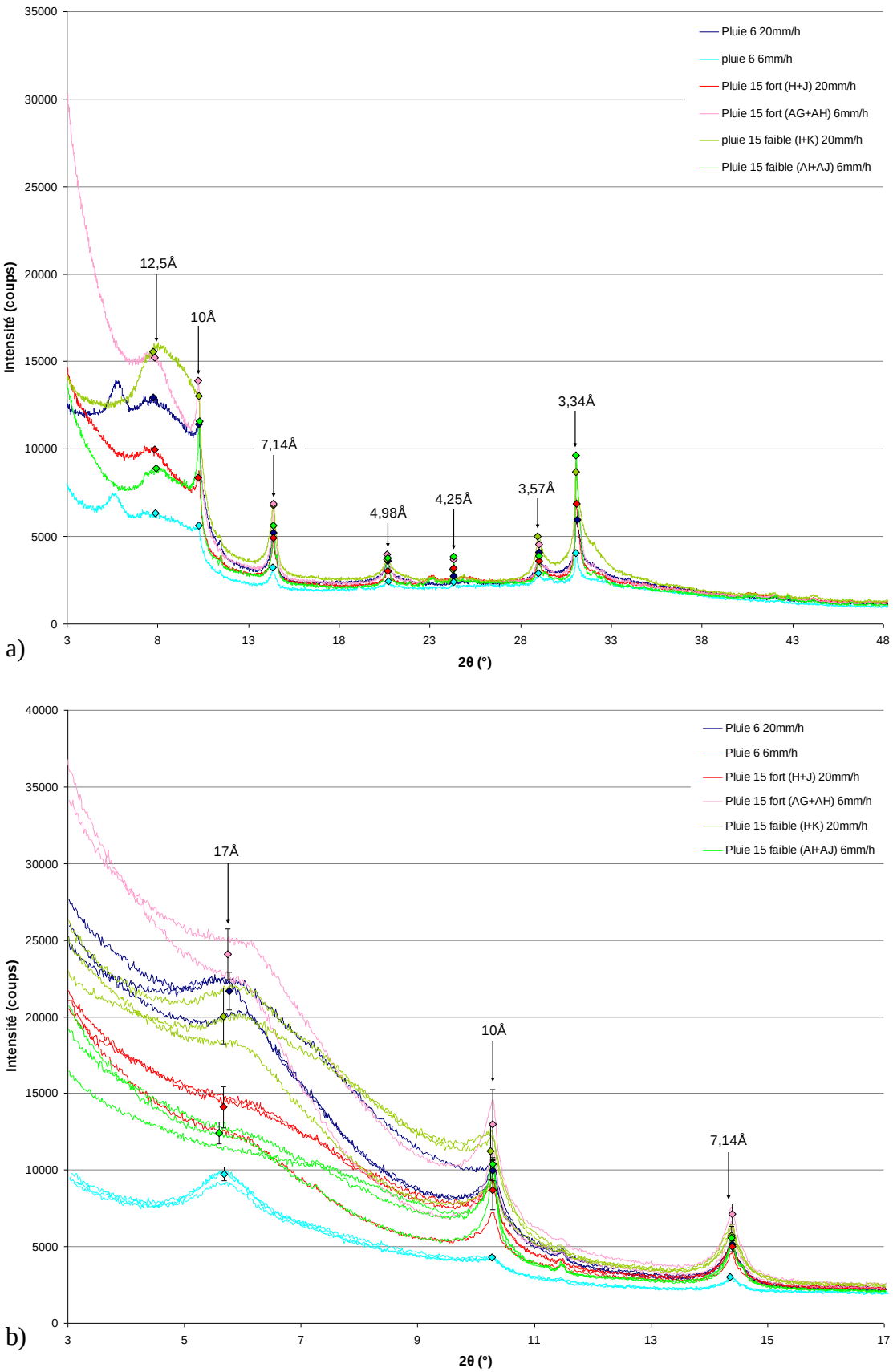


Figure 3.6 : Diffractogrammes obtenus la fraction 0-2 µm des suspensions issues du test LE-WDC après un prétraitement à pF6 ou à pF2,5 pour le sol L1 et pour les particules 0-2 µm lessivées lors des expérimentations sur colonnes de sol L1 . a) Traitement N et b) Traitement EG

Dans tous les cas, les mêmes minéraux sont présents : smectite à domaine de cohérence variable ou interstratifié contenant un peu d'illite (pic à 13,4 Å en normal qui se déplace à 17 Å en glycolé pour L0 et pic à 12,5 Å en normal qui se déplace entre 16,8 et 17 Å en glycolé selon le spectre considéré pour le L1), illite (pics à 10 Å, 4,98 Å et 3,32 Å en normal), kaolinite (pics à 7,14 Å et 3,57 Å en normal), vermiculite (pic à 14 Å en normal et glycolé et à 10 Å en chauffé ainsi qu'un épaulement à 7,06 Å) et quartz (pics à 4,25 Å et 3,34 Å en normal).

Dans le cas des suspensions issues des tests LE-WDC, on observe un moindre gonflement du pic 100 de la smectite, qui traduit un plus faible domaine de cohérence et donc une taille de particule plus faible. Pour les tests, le doublet des pics des feldspaths à 3,24 Å et 3,25 Å est plus visible que pour la fraction 0-2 µm totale du sol.

De façon à comparer quantitativement les différents prétraitements du test LE-WDC, des facteurs d'enrichissements des différents minéraux ont été calculés en normant les hauteurs des pics obtenus par DRX pour les tests de LE-WDC à ceux obtenus pour la fraction 0-2 µm totale du sol[1].

Pour les deux sols L0 et L1, les suspensions issues du test LE-WDC présentent plus de quartz que dans la fraction 0-2 µm totale du sol et moins de smectites (figures 3.7 et 3.8). Ces tendances sont plus marquées pour le test après prétraitement à pF6 qu'après prétraitement à pF2,5. Pour le sol L0, illite et kaolinite sont fractionnées par le test LE-WDC avec un prétraitement à pF2,5, mais pas par un prétraitement à pF6. Pour le sol L1, illite et kaolinite sont moins abondantes à l'issue du test LE-WDC que dans la fraction 0-2 µm totale du sol, sans effet du prétraitement (figures 3.7 et 8).

[1] Pour certains minéraux (quartz ou illite par exemple), les calculs de taux d'enrichissement ont été réalisés pour différents pics de diffraction. La comparaison des taux d'enrichissements obtenus pour les différents pics permet de s'assurer de la robustesse de l'approche. Néanmoins, dans le cas de la fraction 0-2 µm totale du sol, le rapport d'abondance entre l'illite et le quartz est tel que le pic de l'illite à 3,32 Å englobe pour partie le pic du quartz. Il en découle que les taux d'enrichissement calculés pour le quartz sont très variables selon le pic considéré. Ainsi seul le pic à 4,25 Å a finalement été utilisé dans l'analyse des taux d'enrichissement en quartz

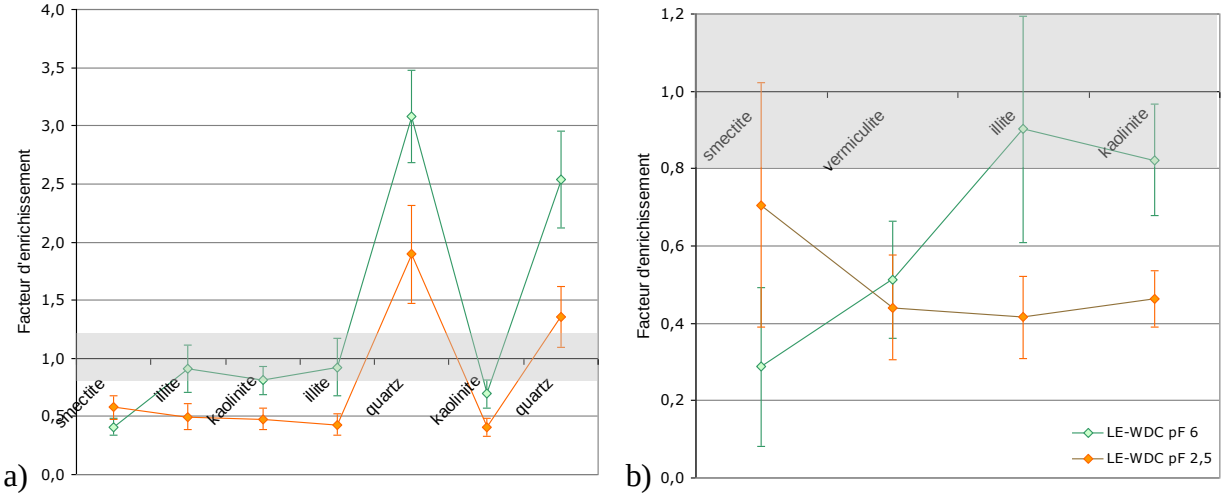


Figure 3.7 : Facteurs d'enrichissement obtenus pour différentes espèces minéralogiques du sol L0 déterminées sur lames orientées par DRX pour les suspensions issues du test LE-WDC par rapport à la fraction 0-2 µm totale du sol. a) Traitement N et b) Traitement EG. La zone grise représente la zone pour laquelle il n'y a pas de fractionnement

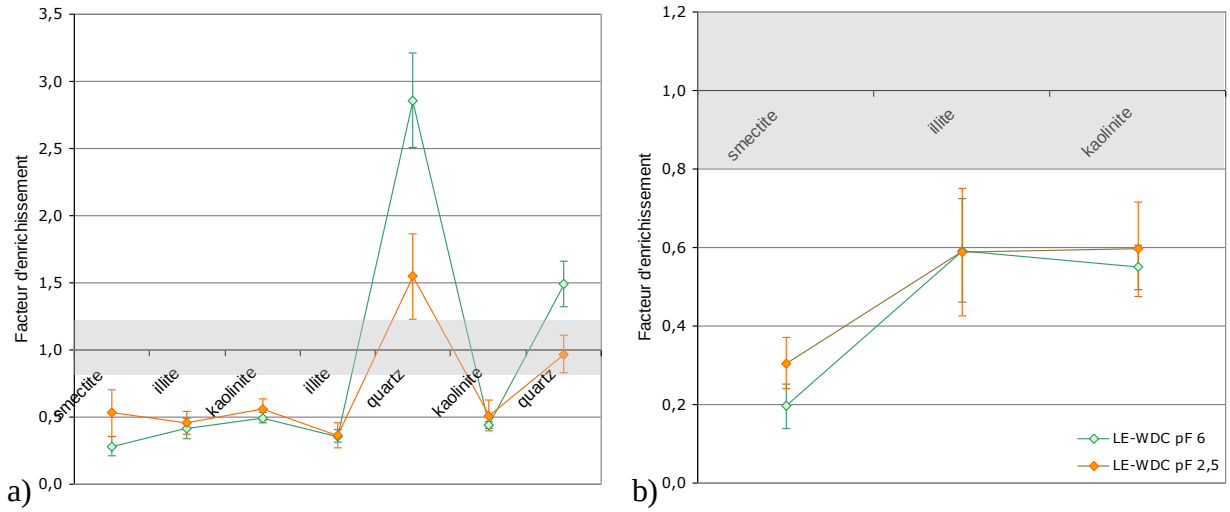


Figure 3.8 : Facteurs d'enrichissement obtenus pour différentes espèces minéralogiques du sol L1 déterminées sur lames orientées par DRX pour les suspensions issues du test LE-WDC par rapport à la fraction 0-2 µm totale du sol. a) Traitement N et b) Traitement EG. La zone grise représente la zone pour laquelle il n'y a pas de fractionnement

Nous comparons ensuite la minéralogie de la fraction 0-2 µm totale du sol et des suspensions obtenues par les deux traitements du test LE-WDC réalisés sur le sol L1 avec la minéralogie des suspensions obtenues après les expérimentations de simulation de pluie à la base des colonnes du même sol. Pour cela nous utilisons la même méthode de calcul de facteur d'enrichissement que précédemment[1]. On observe que le test LE-WDC après prétraitement à pF6 surestime les quantités de quartz et sous-estime les quantités d'argiles libérées au cours

[1] On norme les valeurs obtenues sur les suspensions recueillies lors des expérimentations de pluie, soit par rapport aux suspensions issues des tests LE-WDC, soit par rapport à la fraction 0-2 µm totale du sol.

des pluies (figure 3.9a), alors que le test après prétraitement à pF2,5 représente assez bien ce qui est obtenu à la sortie des colonnes (figure 3.9b). On constate également que les argiles sont moins abondantes dans les suspensions issues des expérimentations de simulation de pluie que dans la fraction 0-2 µm totale du sol (au contraire, ces suspensions sont enrichies en quartz) (figure 3.9c).

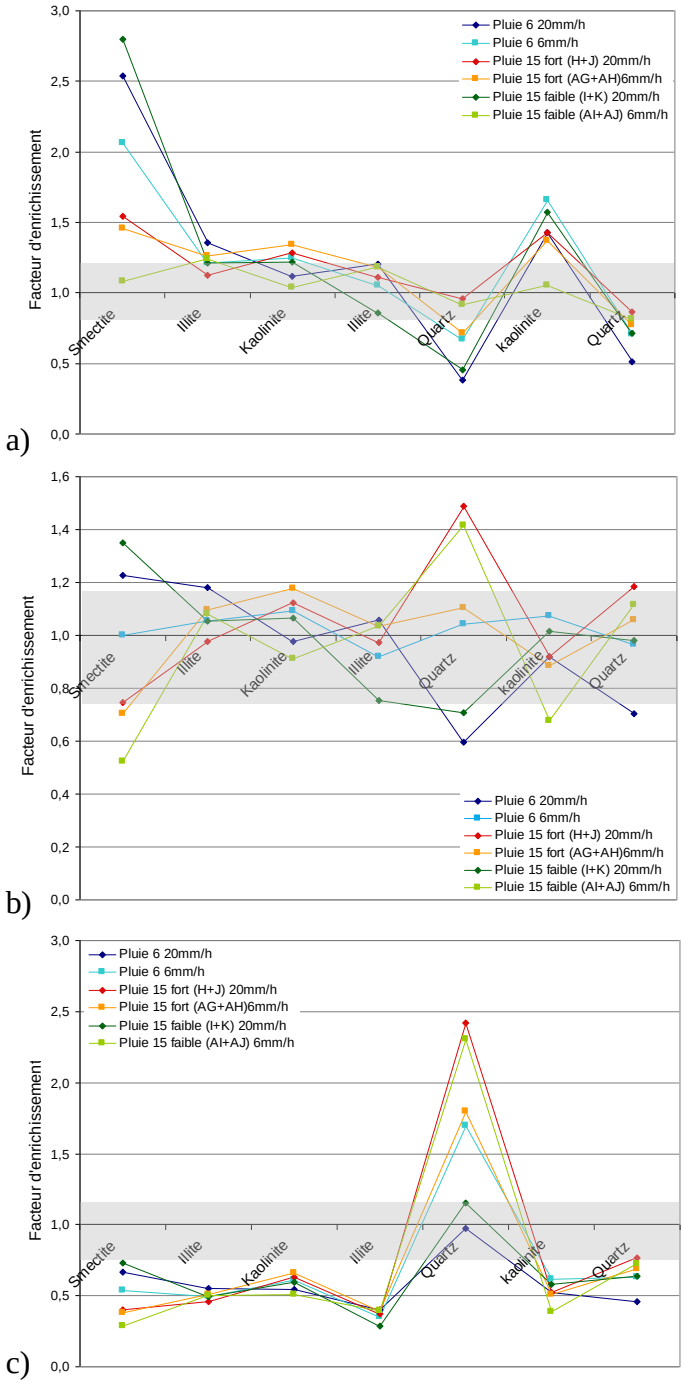


Figure 3.9 : Facteur d'enrichissement des différentes espèces minéralogiques pour les suspensions obtenues après différentes pluies à la base des colonnes de L1 par rapport a) aux suspensions obtenues par le test LE-WDC après un prétraitement à pF6 b) aux suspensions obtenues par le test LE-WDC après un prétraitement à pF2,5 et c) à la fraction 0-2 µm totale du sol. Résultats obtenus par DRX sur lames orientées normales. (voir note n°2 p127 pour la légende)

4.2.3. Distribution granulométrie des particules dispersées par le test LE-WDC

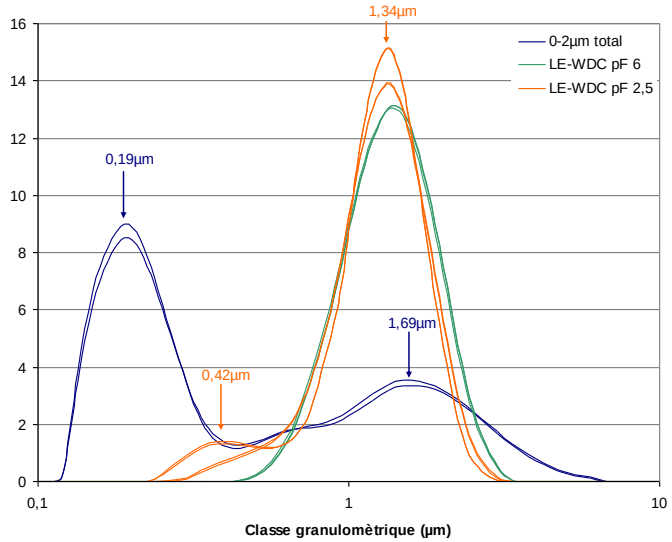
Pour les deux sols considérés, la fraction 0-2 µm totale du sol présente une distribution bimodale classique dans les sols, avec un mode à 2 µm et un mode à 0,2 µm constitué très probablement par les smectites (figure 3.10a et b).

Pour le test LE-WDC sur le sol L0, la distribution granulométrique des particules est unimodale pour le prétraitement à pF6 et légèrement bimodale pour le prétraitement à pF2,5 (figure 3.10a). Le mode du prétraitement à pF6 est centré autour de 1,34 µm. Pour le prétraitement à pF2,5, la majorité des particules sont également centrée autour de 1,34 µm, mais on trouve également quelques particules plus fines centrées sur 0,42 µm. Ce qui signifie que pour les tests LE-WDC aucune particule fine autour de 0,2 µm n'est libérée.

Les tests LE-WDC sur le sol L1 libèrent des particules ayant une distribution granulométrique également bimodale mais avec des modes décalés et centrés autour de 0,24 µm et 1,7 µm pour le prétraitement à pF2,5 et 0,32 µm et 1,5 µm pour le prétraitement à pF6 (figure 3.10b). Pour le prétraitement à pF6, le mode centré sur 1,5 µm est plus abondant que pour le prétraitement à pF2,5 lui-même plus abondant que pour la fraction 0-2 µm total du sol. Pour les tests LE-WDC, il y a donc un enrichissement relatif de ce mode par rapport à la fraction 0-2 µm totale du sol ce qui est cohérent avec une diminution, pour les tests LE-WDC, de l'abondance en smectites observée en DRX.

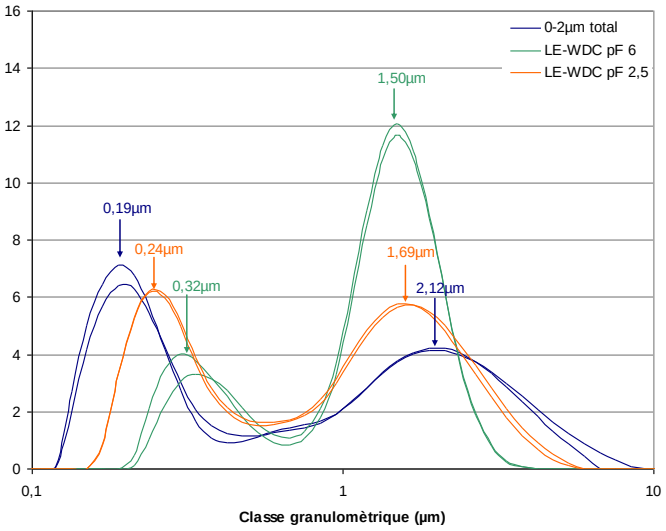
Pour le sol L1, si l'on compare la granulométrie des suspensions obtenues par le test LE-WDC avec la granulométrie des suspensions obtenues après différentes pluies à la base des colonnes du même sol, de fortes différences apparaissent (figure 3.10c) : les particules collectées à la base des expérimentations de pluie sur colonnes présentent une distribution granulométrique tri-modale, avec les deux modes observés pour la fraction 0-2 µm totale et un mode autour de 6 µm (figure 3.10c). Ainsi, les tests LE-WDC, quel que soit le prétraitement considéré, libèrent des particules dont la distribution granulométrique n'est pas identique à celle des particules libérées par des expérimentations de pluies sur colonne de sol non remanié. Au contraire, les particules libérées par les pluies ont une distribution plus proche de celle de la fraction 0-2 µm totale du sol, avec cependant un enrichissement relatif en particules fines autour de 0,2 µm par rapport aux particules à 2 µm.

a)



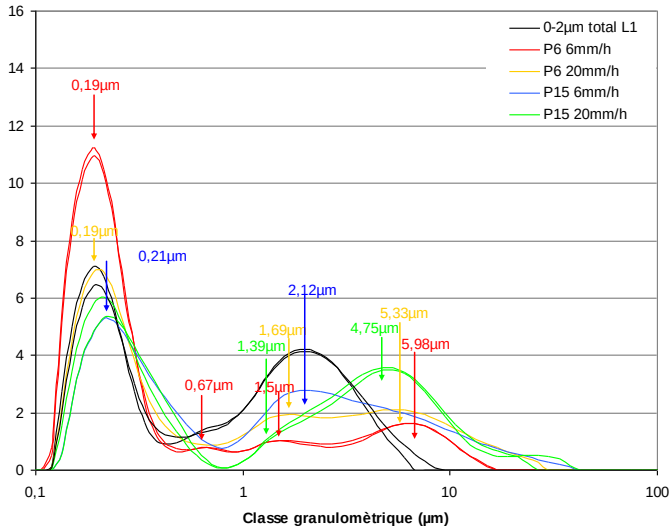
Echantillon	Mode	Tailles min et max en µm	Taille du mode en µm	Quantité de particules dans le mode (%)
0-2 µm total	1	0,11-0,45	0,19	55,6 ± 1,5
	2	0,45-6,32	1,69	44,4 ± 1,5
LE-WDC pF 2,5	1	0,45-3,56	1,34	100
LE-WDC pF 6	1	0,25-0,56	0,42	6,0 ± 2,1
	2	0,56-3,56	1,34	94,0 ± 2,1

b)



Echantillon	Mode	Tailles min et max en µm	Taille du mode en µm	Quantité de particules dans le mode (%)
0-2 µm total	1	0,11-0,45	0,19	43,3 ± 1,5
	2	0,45-8,93	2,12	56,7 ± 1,5
LE-WDC pF 2,5	1	0,16-0,63	0,24	40,2 ± 0,8
	2	0,63-5,64	1,69	59,8 ± 0,8
LE-WDC pF 6	1	0,18-0,71	0,32	23,1 ± 2,1
	2	0,71-3,99	1,5	76,9 ± 2,1

c)



Echantillon	Mode	Tailles min et max en µm	Taille du mode en µm	Quantité de particules dans le mode (%)
0-2 µm total	1	0,11-0,45	0,19	43,3 ± 1,5
	2	0,45-8,93	2,12	56,7 ± 1,5
P6 6mmh	1	0,10-0,50	0,19	71,1 ± 0,8
	2	0,50-1,00	0,67	4,2 ± 0,04
	3	1,00-2,83	1,5	8,2 ± 0,4
	4	2,83-15,89	5,98	16,4 ± 0,5
P6 20mmh	1	0,11-0,71	0,19	52,2
	2	0,71-2,67	1,69	19,0
	3	2,67-31,70	5,33	28,8
P15 6mmh	1	0,11-0,80	0,21	46,7
	2	0,80-3,56	2,12	28,2
	3	3,56-39,91	5,98	25,1
P15 20mmh	1	0,11-0,89	0,21	26,3 ± 1,6
	2	0,89-2,24	1,34	9,2 ± 0,7
	3	2,24-39,9	4,75	44,2 ± 0,9

Figure 3.10 : Distribution granulométrique de la fraction 0-2 µm totale du sol et des particules dispersées par les tests LEWDC pour a) L0, b) L1 et c) des particules collectées à la base d'expérimentations sur les colonnes L1

4.3 -Discussion et comparaison avec les données de la littérature

4.3.1 Impact du prétraitement sur le test LEWDC

Le prétraitement du sol (sol à pF6 versus sol à pF2,5) pour le test de LE-WDC a un fort impact tant quantitatif que qualitatif sur les résultats du test. Si un tel résultat avait déjà été démontré dans la littérature sur le plan quantitatif (Kjaergaard et al., 2004c, Dexter et al., 2011), il n'existait pas, à notre connaissance, de travaux sur la nature des particules libérées selon le prétraitement des échantillons.

D'un point de vue quantitatif on retrouve bien les conclusions obtenues précédemment dans la littérature dans la mesure où le séchage préalable du sol diminue la dispersion des particules, c'est-à-dire la quantité de particules présentes dans les suspensions analysées. Néanmoins, l'amplitude de cette diminution est très variable : dans notre étude, nous observons un facteur 6 entre la quantité de particules libérées par le test LE-WDC après un prétraitement à pF6, et celle après un prétraitement à pF2,5, pour le sol L1. Ce facteur est de 2 pour le sol L0. Les facteurs enregistrés par Kjaergaard et al (2004c) varient de 1 à 4 et ceux obtenus par Dexter et al., 2011 varient de 9 à 20. Ces différences s'expliquent pour partie par des différences de protocoles entre les différentes études et pour partie par la variabilité des sols analysés (tableau 3 .4). Nous reviendrons sur ces points ultérieurement.

D'un point de vue qualitatif, on observe que le séchage favorise la libération des quartz au détriment de celle des argiles. De même, le séchage favorise la libération de particules de la fraction 1-2 µm au détriment des fractions plus fines. Ces deux résultats sont cohérents dans la mesure où les quartz ont une taille supérieure à celle des argiles.

4.3.2 Impact respectif de la nature du sol et des conditions expérimentales sur les résultats de tests LE-WDC rapportés dans la littérature

Selon l'étude considérée, la proportion de particules dispersibles déterminée varie entre moins de 1 % (Kjaergaard et al., 2004c ; tableau 3.5) et 72 % (Dexter et al., 2011 ; tableau 3.5), pour des proportions de particules 0-2 µm comprises entre de 11 et 43 % (tableau 3.4). Les sols L0 et L1 étudiés dans nos tests et ceux étudiés par Dexter et al. (2011) présentent des teneurs de particules 0-2 µm comprises dans la gamme de celles étudiées par Kjaergaard et al. (2004c).

Tableau 3.4 : Caractéristiques pédologiques et minéralogiques des sols utilisés dans les tests LE-WDC. Pour la minéralogie la correspondance est la suivante : - absente ; (+) trace ; + un peu ; ++ présente ; +++ abondante ; ++++ dominante

Référence	Sol	Texture du sol (triangle de Jamagne)	Granulomètrie (%)			Carbone organique	pH		CEC	Minéralogie en abondance relative					
			0-2µm	2-20 µm	20-2000µm	(g kg^{-1})	H_2O	$CaCl_2$	(mmol.kg^{-1})	illite	smectite	vermiculite	kaolinite	quartz	chlorite
Dexter et al. (2011)	Villamblain	argileux limoneux	33,1	32,6	34,3	13	7,9	ND	201	+	++	++	++	+	+++
	Boigneville A	limoneux argileux	26	28,5	45,5	13,3	6,33	ND	147	++++	+	++	+++	+	+
	Boigneville B	limoneux argileux	23,6	29,9	46,5	28,9	4,86	ND	99	++++	+	++	+++	+	+
	Faux Perche	limon moyen	11,8	34,2	54	12,1	7,91	ND	93	++	-	++	+++	+	++
Kjaergaard et al. (2004c) et SchjØnning et al. (1999)	S1	sable limoneux	11,5	6,5	82	10,9	ND	6,6	114	+++	+++	++	+	+	(+)
	S2	sable argileux	18	8,5	73,5	16,7	ND	6,7	150	+++	++	++	+	+	(+)
	S3	sable argileux	24,3	11,3	64,4	15,5	ND	7,2	181	+++	++	++	+	(+)	+
	S4	Argile sableuse	27,5	12,5	60	17,1	ND	7,4	229	+++	+++	++	+	(+)	-
	S5	Argile sableuse	36,6	9,9	53,5	15,5	ND	7,5	264	+++	++	++	+	(+)	-
	S6	Argile lourde	42,8	10,8	46,4	17,4	ND	7,5	325	+++	+++	++	+	(+)	+
Cette étude	L0	limoneux argileux	25,9	33,8	40,3	1,33	5,82	ND	114	+++	++++	(+)	++	+	-
	L1	limoneux argileux	30,7	28,5	40,8	3,54	6,19	ND	178	+++	++++	(+)	++	+	-

Pour autant, les concentrations en particules libérées par le test LE-WDC sont plus élevées de plusieurs ordres de grandeur dans notre étude que dans celle de Kjaergaard et al. (2004c). Nos résultats ne corroborent pas non ceux de Kjaergaard et al. (2004c) qui montre que le test LE-WDC libère d'autant plus de particules que la fraction 0-2 µm est importante.

Tableau 3.5 : Quantités de particules libérées par les tests LE-WDC pour différents sols

Référence	Sol	Rapport solide/solution	Mode d'humectation	pF	Particules dispersées (mg/kg)	Fraction <2µm extraite (%)
Dexter et al. (2011)	Villamblain	1/25	imédiate	2	101833 ± 14896	31 ± 5
		1/25	imédiate	6	6767 ± 584	2 ± 0,2
	Boigneville A	1/25	imédiate	2	91317 ± 13354	35 ± 5
		1/25	imédiate	6	7608 ± 785	3 ± 0,3
	Boigneville B	1/25	imédiate	2	21308 ± 3388	9 ± 1
		1/25	imédiate	6	2342 ± 232	1 ± 0,1
	Faux Perche	1/25	imédiate	2	85583 ± 7666	73 ± 2
		1/25	imédiate	6	4175 ± 389	4 ± 0,1
Kjaergaard et al. (2004c)	S1	1/8	lente	2,5	1974 ± 87	2 ± 0,1
	S2	1/8	lente	2,5	1500 ± 35	1 ± 0,04
	S3	1/8	lente	2,5	1260 ± 44	1 ± 0,04
	S4	1/8	lente	2,5	700	0,3
	S5	1/8	lente	2,5	1050 ± 44	0,3 ± 0,04
	S6	1/8	lente	2,5	1024	0,2
Cette étude	L0	1/8	imédiate	2,5	27680 ± 3760	11 ± 1
	L0	1/8	imédiate	6	15760 ± 1840	6 ± 0,5
	L1	1/8	imédiate	2,5	37200 ± 5280	12 ± 2
	L1	1/8	imédiate	6	5760 ± 1440	2 ± 0,5

Cette différence peut s'expliquer par deux aspects : des différences de protocole (tableau 3.1) et des différences de nature des sols analysés (tableau 3.5). Contrairement aux sols de notre étude, les sols étudiés par Kjaergaard et al. (2004c) sont pauvres en limons, connus pour être sensibles à la dispersion (Duchaufour, 1983). Cette différence de texture peut expliquer pourquoi les tests LE-WDC libèrent plus de particules pour les sols de notre étude que pour ceux de Kjaergaard et al. (2004c). De plus, les sols que nous avons analysés sont plus pauvres en matières organiques que ceux de Kjaergaard et al. (2004c) (tableau 3.5) ; la matière organique étant aussi connue pour être un facteur de cohésion de la structure des sols (Duchaufour, 1983 ; Le Bissonnais et Arrouays, 1997), il est cohérent que des particules plus nombreuses soient libérées dans notre étude que dans celle de Kjaergaard et al. (2004c),

malgré des différences de protocole mineures, qui portent essentiellement sur la vitesse d'humectation de l'échantillon.

Si l'on compare nos sols à ceux étudiés par Dexter et al. (2011), on constate que leurs textures sont proches. Par contre, les sols de notre étude sont plus pauvres en matières organiques et ont un pH proche de 6 ; autant de critères a priori favorables à la dispersion et donc au lessivage (Duchaufour, 1983 ; Le Bissonnais et Arrouays, 1997 ; Soil Survey Staff, 1999 ; Duchaufour, 1956). A contrario, les sols étudiés par Dexter et al. (2011) sont plus riches en matières organiques et ont des pH, pour certains d'entre eux, inférieurs à 5,5 ou supérieurs à 6,5 et donc seraient a priori plus stables que ceux de notre étude (Duchaufour, 1956 ; Duchaufour, 1983 ; Le Bissonnais et Arrouays, 1997 ; Chenu et al., 2000). Pour autant, la comparaison des résultats des tests LE-WDC semblerait indiquer le contraire (tableau 3.4). Cette contradiction apparente est probablement liée à la différence de rapports solide-solution utilisés dans les deux études. Aucune étude n'existe à notre connaissance dans la littérature sur l'influence de ce paramètre sur les résultats dans ce type de test.

Enfin, les résultats de Dexter et al. (2011) semblent confirmer l'importance de la teneur en matières organiques et du pH sur la dispersibilité des sols. Effectivement les quantités de particules dispersées par le test LE-WDC pour le sol de Boigneville B sont d'un ordre de grandeur inférieur à celles obtenues pour les autres sols dont la texture est comparable, mais qui présentent des teneurs en matières organiques beaucoup plus faibles et des pH plus élevés. Néanmoins, la gamme de teneur explorée pour ces deux paramètres est trop restreinte et en outre trop liée (le même sol est à la fois riche en matières organiques et acide) pour que l'on puisse conclure de façon ferme sur ce point.

4.3.3 Représentativité du test LE-WDC en ce qui concerne le lessivage

Les particules libérées par le test LE-WDC après prétraitement à pF2,5 présentent une composition minéralogique plus proche de celle des particules qui migrent dans le sol lors des expérimentations de simulation de pluie que les particules libérées par le test LE-WDC après prétraitement à pF6 (figure 3.9). Cependant, on n'observe pas de mobilisation préférentielle des particules les plus fines lors des tests LE-WDC, alors qu'il est classiquement admis dans la littérature que le lessivage mobilise préférentiellement les particules les plus fines, et notamment les smectites (Mercier et al., 2000). Bien au contraire, les résultats du test LE-WDC après prétraitement à pF2,5 montrent une sous-représentation de la fraction < 0,2 µm de la suspension issue du test par rapport à la fraction 0-2 µm totale du sol.

Par ailleurs, nous avons montré précédemment que les tests LE-WDC conduits sur les sols analysés dans notre étude sont plus sensibles à la dispersion que les sols étudiés par Kjaergaard et al. (2004c). Ceci est cohérent avec l'hypothèse que les Luvisols, de par leurs propriétés, sont plus sensibles au lessivage que les autres types de sol (Jamagne, 1978 ; Duchaufour, 1983).

Néanmoins, ces tests, dans la mesure où ils donnent une information sur l'ensemble de la fraction mobilisable à un instant t, et non sur celle réellement mobilisée au cours d'un événement pluvieux, ne sont pas des indicateurs des quantités de particules qui migrent dans les eaux des sols. La comparaison de ces tests pour différents types de sols doit cependant permettre de les classer en ordre de sensibilité croissante à la dispersion et de comparer cet ordre aux concentrations en particules enregistrées à la base des expérimentations de colonnes de sol. Si l'on compare les résultats obtenus par ces deux approches (test LE-WDC et expérimentation sur colonne) dans les travaux de Kjaergaard et al. (2004b et 2004c) et dans notre étude, l'interprétation des tests LE-WDC en terme de sensibilité au lessivage semble complexe. En effet, les taux de mobilisation obtenus par les tests LE-WDC sur les sols L0 et L1 sont un ordre de grandeur supérieur à ceux obtenus par Kjaergaard et al. (2004b et 2004c) (tableau 3.4). Cependant, si l'on met en relation les quantités de particules libérées par le test LE-WDC et les concentrations observées à la base des colonnes ayant subi des simulations de pluie telles que 3 volumes poraux d'eau ont drainé en bas des colonnes, on constate que les résultats sur le sol L0 sont cohérents avec ceux de Kjaergaard et al. (2004b), ce qui n'est pas du tout le cas du sol L1 (tableau 3.6 et figure 3.11). Ce résultat est sans doute lié à des différences, entre les expérimentations, de surface de contact entre l'eau percolante et le solide au sein de la colonne. En effet, dans les expérimentations de Kjaergaard et al. (2004b), de faibles succions sont appliquées à la base des colonnes (-5 hPa) et le transfert hydrique s'effectue en régime permanent ; on peut raisonnablement penser que les transferts sont lents, probablement de type matriciel, et qu'ainsi les surfaces de contact entre l'eau et le sol sont importantes. Pour nos expérimentations sur le sol L0, le sol est remanié et a priori homogène : le transfert est également probablement de type matriciel, avec des surfaces de contact importantes entre l'eau et le sol. Pour nos expérimentations sur le sol L1 en revanche, le sol n'est pas remanié et certaines colonnes présentent même des conduits de ver de terre percolants (voir chapitre 4). On peut ici faire l'hypothèse de transferts d'eau préférentiels, au cours desquels les surfaces de contact entre l'eau et le sol seraient moins importantes que dans le cas d'un transfert de type matriciel (tableau 3. 6).

Tableau 3.6 : Quantités de particules libérées à la base de colonnes des différents sols après 3 volumes poraux drainés

Référence	Sol	Nature des colonnes	Taille des colonnes (cm)		Intensité de la pluie (mm/h)	Modalité de la pluie	Condition à la base de la colonne lhPal	Concentration moyenne sur l'ensemble du drainage (g/L)
			Diamètre	Hauteur				
Kjaergaard et al. (2004b)	S1	Non pertubé	10	8	1	un événement pluvieux continu	5	0,62 ± 0,43
	S2	Non pertubé	10	8	1	un événement pluvieux continu	5	0,51 ± 0,21
	S3	Non pertubé	10	8	1	un événement pluvieux continu	5	0,19 ± 0,04
	S4	Non pertubé	10	8	1	un événement pluvieux continu	5	0,17 ± 0,04
	S5	Non pertubé	10	8	1	un événement pluvieux continu	5	0,13 ± 0,01
	S6	Non pertubé	10	8	1	un événement pluvieux continu	5	0,15 ± 0,04
Cette étude	L0	Remanié	13,5	15	6	Succession de pluies de 30 mm	0 pendant la pluie, jusqu'à 100 après	2,16 ± 0,65
	L1	Non pertubé	15	15	6	Succession de pluies de 30 mm	0 pendant la pluie, 30 après	0,28 ± 0,16

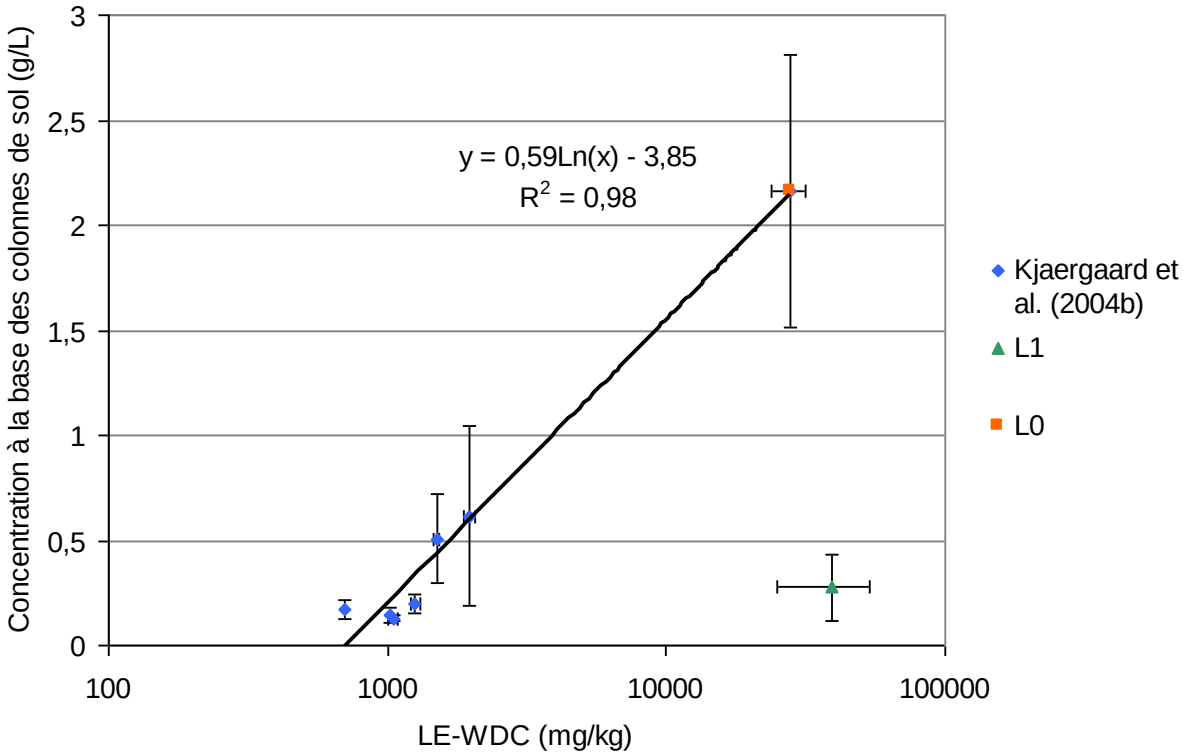


Figure 3.11 : Comparaison entre les concentrations en particules résultant des tests LE-WDC et les concentrations en particules mesurées à la base d'expérimentations sur colonne de sol après 3 volumes poraux drainés

V. Conclusion

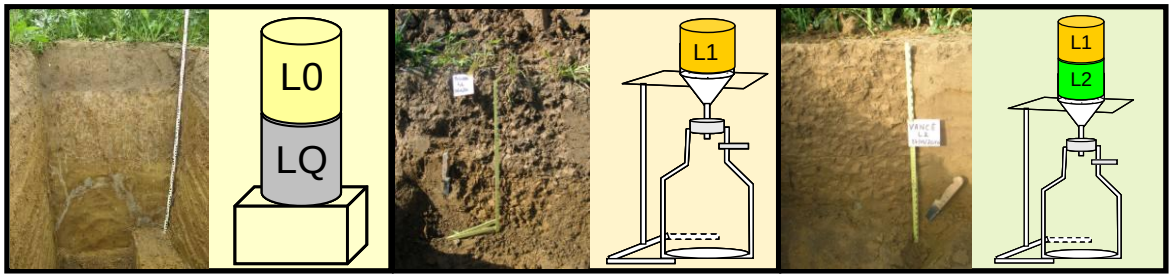
Les expérimentations sur colonnes que nous avons conduites sur les sols L0 et L1 montrent que les particules qui migrent appartiennent majoritairement à la fraction 0-2 µm avec une forte proportion de particules inférieures à 0,2 µm. On observe également une mobilisation préférentielle des quartz par rapport aux argiles minéralogiques. Si le premier résultat est cohérent avec ce qui est classiquement observé dans la littérature, le dernier résultat est surprenant. De ce fait, les tests LE-WDC réalisés sur un sol « humide » (ayant subi un prétraitement à pF2,5) sont un bon indicateur de la nature minéralogique des particules qui migrent par lessivage dans les sols. Ceci est moins vrai pour le même test réalisé sur un sol « sec » (ayant subi un prétraitement à pF6) qui exacerbe le départ de quartz. Par contre, ces tests ne sont pas réellement de bons indicateurs de la granulométrie des particules qui migrent. Enfin, les expérimentations réalisées dans cette étude l'ont été pour deux sols très comparables. Afin d'extrapoler ces résultats à un grand nombre de types de sol, des tests complémentaires seraient nécessaires car les différences de protocole de test de LE-WDC existant dans la littérature rendent les comparaisons inter-études délicates.

En termes de quantité, les tests ne permettent pas de prédire les concentrations en particules migrantes au cours d'une pluie mais seulement une fraction potentiellement mobilisable sur la base des caractéristiques minéralogiques et physico-chimique des sols.

Néanmoins la confrontation avec les résultats d'expérimentations sur colonne montre l'importance de la surface de contact entre l'eau percolante et le sol sur la mobilisation effective des particules.

Chapitre 4

Eluviation expérimentale



I. Introduction

Comme l'a montré la synthèse des études expérimentales sur le transfert des particules dans les sols (Chapitre 1 ; Quénard et al., 2011), il n'existe pas dans la littérature d'études permettant de conclure clairement sur l'importance du phénomène d'éluviation dans les sols, et ce, pour les raisons suivantes :

- les sols utilisés dans ces expérimentations ne présentent généralement pas des caractéristiques favorables à la mobilisation des particules (Zhuang et al., 2007 ; Shang et al., 2008 et Sharma et al., 2008);
- les expérimentations sont de courte durée (un événement pluvieux continu ou quelques événements tout au plus ; Jacobsen et al., 1997 ; Schelde et al., 2002 ; Kjaergaard et al., 2004a et b ; Laegdsmand et al., 2005).

Ces limitations ont motivé les expérimentations réalisées dans cette étude.

Par contre les travaux existants ont permis de mettre en évidence un certain nombre de mécanismes responsables de la migration des particules, notamment dans la phase de mobilisation :

- le rôle défloculant de la chimie de la solution et de la saturation du complexe d'échange (Kaplan et al., 1993 ; Seta et Karathanasis, 1997 ; Ryan et al., 1998 ; Gamerdinger et Kaplan, 2001 ; Saiers et Lenhart, 2003);
- l'importance de la mobilisation de particules dans les macropores (300 µm) (Jacobsen et al., 1997 ; Ryan et al., 1998 ; Laegdsmand et al., 1999 ; Schelde et al., 2002 ; Michel et al., 2010).

L'importance respective de ces deux ensembles de mécanismes n'est pour autant pas bien connue.

Enfin, l'analyse des données existantes n'a pas permis d'étudier l'impact de la structure sur ce processus (Quénard et al., 2011). Or l'éluviation a lieu en surface et/ou subsurface des sols, là où se développe l'horizon E. Dans les situations agricoles, cet horizon peut être labouré et donc remanié. Cette pratique peut avoir une influence sur les quantités de particules éluviées dans le sol. Nous avons ainsi réalisé des expérimentations sur des sols dont la structure était soit conservée (expérimentations sur le sol L1), soit remaniée (expérimentations sur le sol L0).

Dans ce chapitre, nous avons, dans un premier temps, analysé les concentrations de particules migrantes dans les sols sur la base de nos expérimentations et de celles existant dans la

littérature ; puis sur la base de nos expérimentations, nous avons tenté de conclure sur les mécanismes à l'origine de la mise en suspension des particules dans ce type de sol ; enfin, en extrapolant les quantités migrantes dans ces expérimentations à l'échelle des temps pédologiques, nous avons conclu sur la vitesse potentielle de l'éluviation dans les Luvisols.

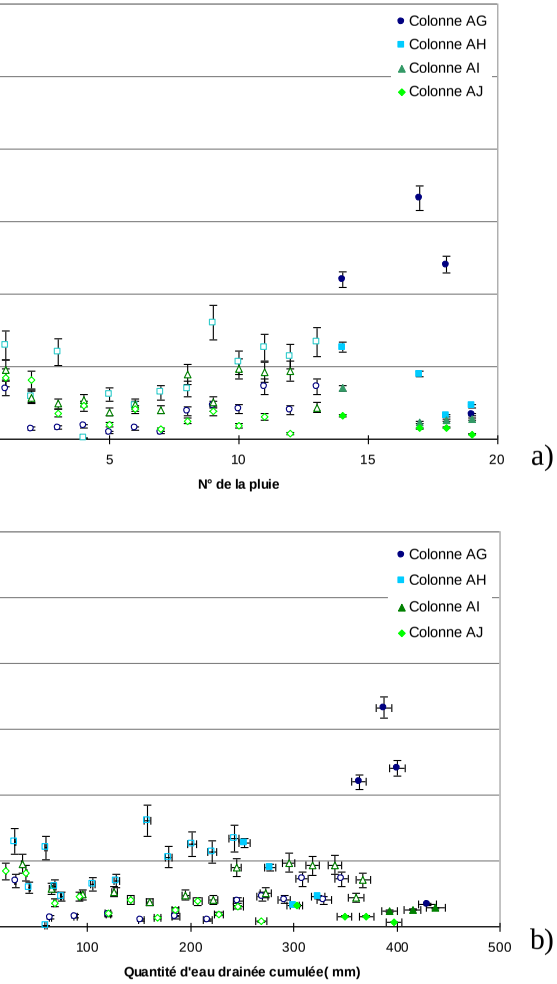
II. Concentrations de particules migrantes dans un Luvisol au cours d'expérimentations de pluies par rapport à celles migrantes dans d'autres types de sol

Nous rappelons ici que les conditions à la limite inférieure et la structure du sol sont différentes dans les deux expérimentations d'éluviation que nous avons conduites : pour les colonnes L0/LQ, la structure du sol est remaniée et la condition à la limite inférieure est une succion imposée par un cylindre de quartz ; pour les colonnes L1, la structure du sol est non perturbée et la condition à la limite inférieure est un drainage libre ou forcé au-dessus d'un erlenmeyer. La dynamique temporelle des concentrations de particules migrantes au pas de temps de l'événement pluvieux est analysée uniquement sur les colonnes L1. L'évolution à long terme des concentrations peut être analysée sur les deux types de colonnes.
Nous rappelons ici que, dans la suite de ce paragraphe, nous nous intéresserons uniquement aux concentrations de particules de taille 0-2 µm, ce que nous ne préciserons pas systématiquement dans le texte pour ne pas l'alourdir.

2.1- Evolution temporelle et inter-colonnes des concentrations de particules migrantes dans les colonnes L1

Dans les expérimentations sur sol non perturbé (L1), les concentrations de particules collectées à la base des colonnes à la fin des événements pluvieux sont significativement plus élevées lors de la pluie 1[1] que lors des autres pluies (figure 4.1a). Cette différence est particulièrement marquée dans le cas de l'intensité 20 mm/h pour laquelle une concentration moyenne en particules de 1,5 ± 1,0 g/L est enregistrée, pour les quatre colonnes, lors de la première pluie, contre une concentration moyenne de 0,30g ± 0,14 g/L lors des pluies suivantes. Dans le cas de l'intensité 6 mm/h (figure 4.1c), la concentration moyenne en particules est de 0,47 ± 0,13 g/L, pour la première pluie, alors que pour les pluies suivantes elle est comparable à celle obtenue pour l'intensité 20 mm/h[2], soit de l'ordre de 0,30 g/L. Ainsi, lors de la première pluie, il y a un « lavage » de la colonne.

[1] voire lors des pluies 1 et 2 pour les colonnes I et K
[2] Les pluies 14, 17 et 18 génèrent des concentrations extrêmes sur le cylindre AG avec une moyenne de 1,32 g/L +/- 0,30 g/L, soit 5 fois plus que la moyenne des autres pluies. Ces données ne sont pas prises en compte dans le calcul de cette moyenne.



c)

d)

Figure 4.1 : Evolution temporelle de la concentration de particules de taille 0-2 µm mesurée à la base des colonnes de sol pour l'expérimentation L1.Intensité 20 mm/h : a) en fonction du numéro de la pluie, b) en fonction du volume drainé en mm. Intensité 6 mm/h c) en fonction du numéro de la pluie, d) en fonction du volume drainé en mm. Les figurés vides représentent les concentrations estimées (voir chapitre 3) et les figurés pleins les concentrations mesurées

Si l'on omet ces premières pluies, les concentrations sont inférieures à 0,65 g/L (à quelques exceptions près). Les concentrations de particules sont variables selon les colonnes (tableau 4.1) avec AJ < H, J, K, AG, AI < I et AH. La différence entre les concentrations en particules les plus faibles et les fortes est d'un facteur 3.

Tableau 4.1 : Valeurs moyenne, minimum, maximum et modale des concentrations en particules collectées à la base des colonnes de l'expérimentation L1 pour les deux intensités de pluie

Colonne	Concentration (g/l)				
	1ère pluie	Moyenne[1]	Minimum	Maximum[1]	Modale
H	0,94	0,24 ± 0,12	0,11	0,55	0,20
I	1,78	0,40 ± 0,18	0,13	0,86	0,40
J	0,48	0,26 ± 0,11	0,08	0,49	0,26
K	2,70	0,28 ± 0,10	0,14	0,49	0,29
AG	0,35	0,38 ± 0,49	0,05	1,66	0,20
AH	0,65	0,42 ± 0,22	0,01	0,80	0,45
AI	0,48	0,28 ± 0,12	0,12	0,48	0,26
AJ	0,42	0,14 ± 0,10	0,03	0,41	0,16

1. Calculé sans la première pluie

2.2- Evolution temporelle de la nature de ces particules

Les particules en suspension collectées à la base des colonnes de sol L1 se composent de smectite (pic en DRX à 12,5 Å en N[1] qui passe à 17 Å à l'EG[2]), illite (pics à 10 Å et à 4,98 Å), kaolinite (pics à 7,14 Å et à 3,57 Å) et de quartz (pics à 4,25 Å et à 3,34 Å) (figure 4.2). Elles ont une distribution granulométrique tri-modale avec un mode autour de 0,2 µm, un autour de 2 µm et un autour de 5 µm (figure 4.3). Le premier peut être attribué aux smectites alors que le dernier serait plutôt composé de quartz.

Si on compare les diffractogrammes des rayons X des particules récupérées à la base des colonnes avec celui de la fraction 0-2 µm totale, en première analyse, ces diffractogrames sont relativement semblables (figure 4.2[3]). Or la littérature montre que les smectites migrent préférentiellement (Mercier et al., 2000). Ces minéraux de petites tailles sont enrichis dans la fraction inférieure à 0,2 µm.

[1] N correspond au traitement normal saturé Na dans notre cas.
[2] EG correspond au traitement éthylène glycol.
[3] Les eaux de drainage des pluies 2-3-4-5 ont été rassemblées et la minéralogie a été réalisée sur les particules de ce mélange. Pour la pluie 15, les suspensions des deux colonnes avec les concentrations de particules les plus fortes (H et J pour 20 mm/h et AH et AG pour 6 mm/h) ont été rassemblées ainsi que les deux colonnes avec les concentrations les plus faibles (I et K pour 20 mm/h et AI et AJ pour 6 mm/h).

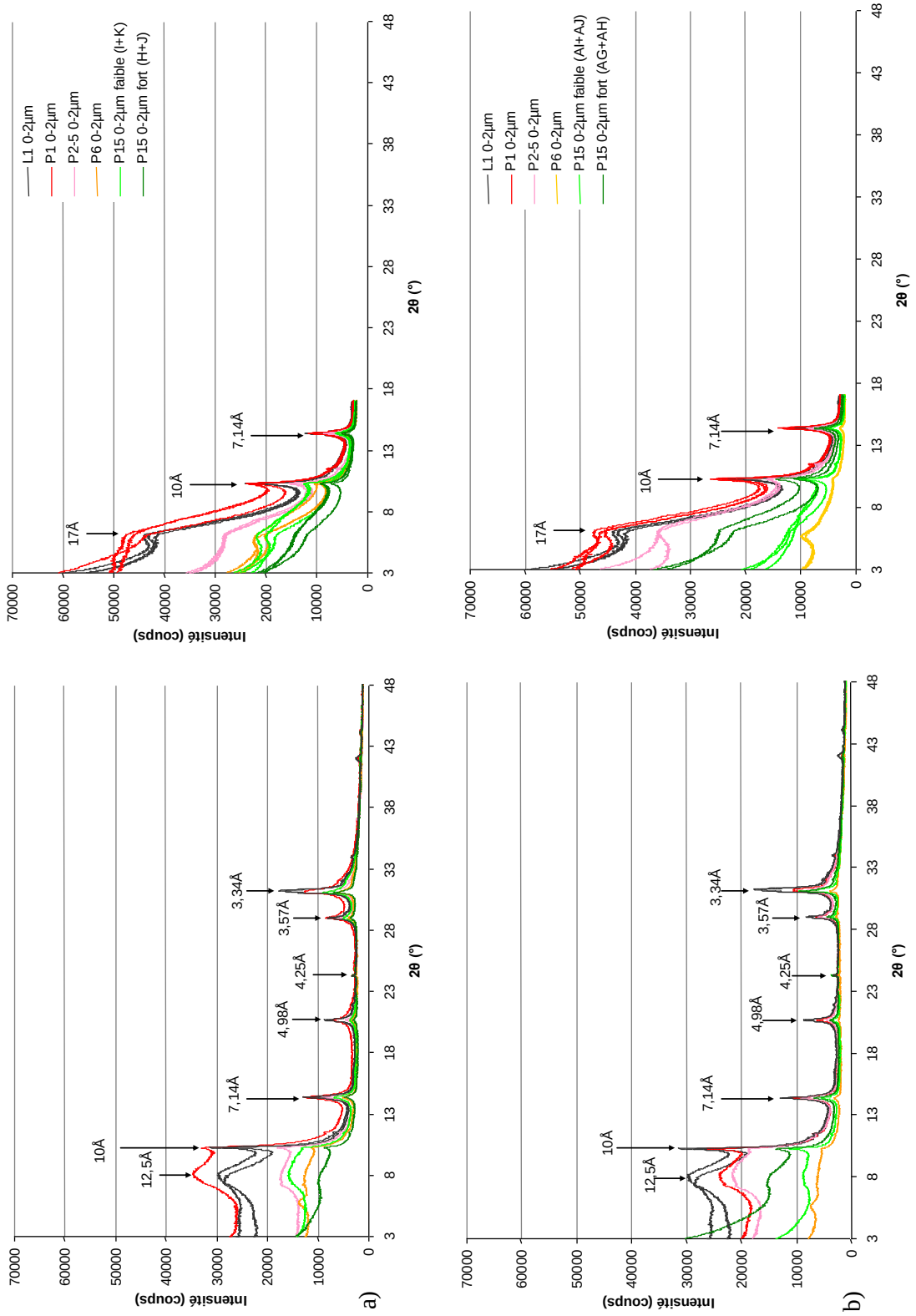
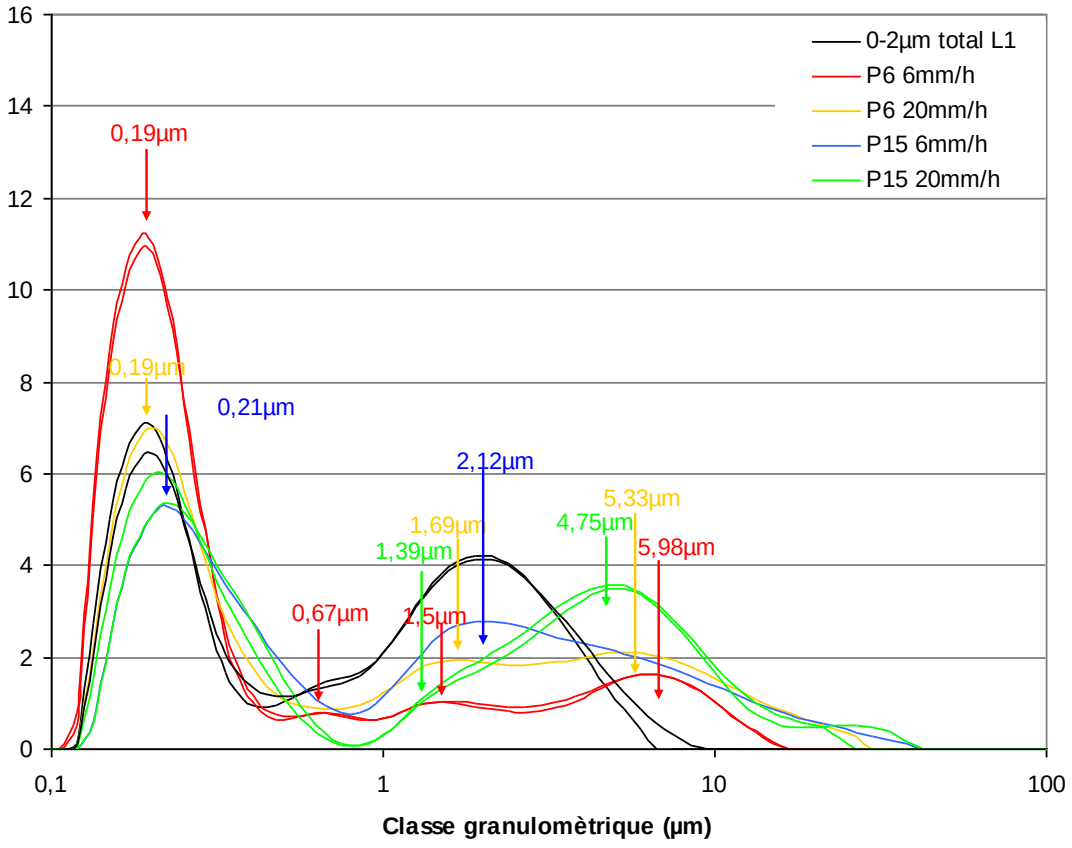


Figure 4.2 : Cortège minéralogique de la fraction 0-2 µm brute du sol L1 et des particules collectées pour les pluies 1, 2-5, 6 et 15. a) Intensité 20 mm/h et b) Intensité 6 mm/h. Traitement N (à gauche) et traitement EG (à droite)



Echantillon	Mode	Tailles min et max en µm	Taille du mode en µm	Quantité de particules dans le mode (%)
0-2 µm total	1	0,11-0,45	0,19	43,3 ± 1,5
	2	0,45-8,93	2,12	56,7 ± 1,5
P6 6mmh	1	0,10-0,50	0,19	71,1 ± 0,8
	2	0,50-1,00	0,67	4,2 ± 0,04
	3	1,00-2,83	1,5	8,2 ± 0,4
	4	2,83-15,89	5,98	16,4 ± 0,5
P6 20mmh	1	0,11-0,71	0,19	52,2
	2	0,71-2,67	1,69	19,0
	3	2,67-31,70	5,33	28,8
P15 6mmh	1	0,11-0,80	0,21	46,7
	2	0,80-3,56	2,12	28,2
	3	3,56-39,91	5,98	25,1
P15 20mmh	1	0,11-0,89	0,21	26,3 ± 1,6
	2	0,89-2,24	1,34	9,2 ± 0,7
	3	2,24-39,9	4,75	44,2 ± 0,9

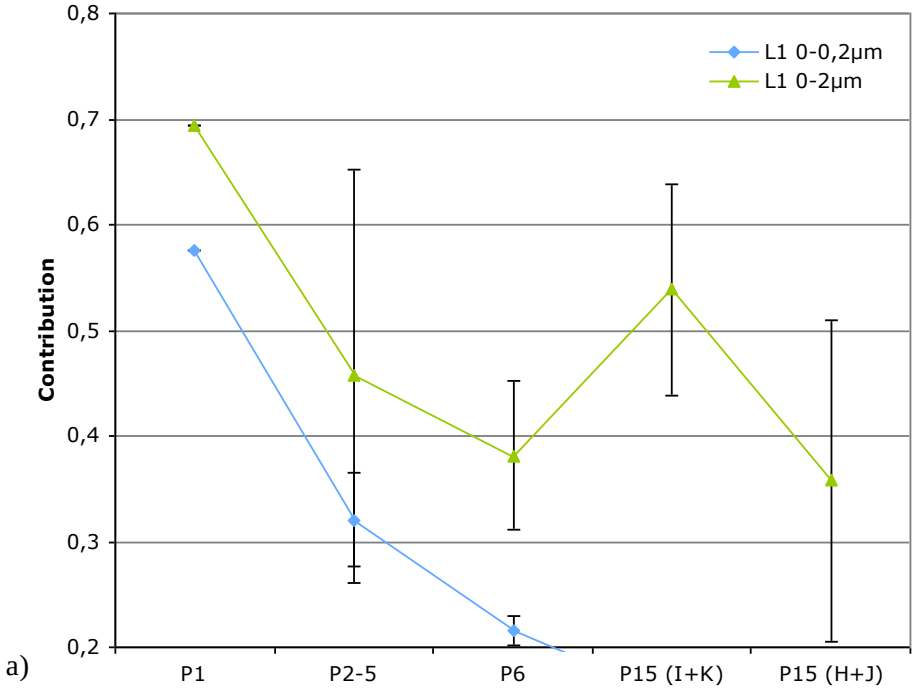
Figure 4.3 : Distribution granulométrique des particules collectées à la base d'expérimentations sur colonne de L1 non perturbée et de la fraction 0-2 µm totale du sol L1

De façon à mettre en évidence et à quantifier un éventuel fractionnement préférentiel des smectites dans les particules collectées à la base des colonnes, nous avons traité les

diffractogrammes obtenus sur les lames orientées glycolées par MCR-ALS, en considérant les fractions 0-2 µm et 0-0,2 µm du L1 comme des pôles purs et les particules collectées à la base des colonnes pour les différentes pluies comme résultant d'un mélange entre ces deux pôles purs (figure 4.4).

Il apparaît, quelle que soit l'intensité de pluie, que la contribution de la fraction de 0-2 µm du L1 est majoritaire au cours des différentes pluies, sauf pour les premières pluies pour lesquelles on observe aussi une quantité non négligeable de particules de taille 0-0,2 µm. A 6 mm/h, cette dernière contribution réapparaît pour les colonnes qui perdent beaucoup de particules (P15 AG+AH). Cette contribution est cependant assez faible. Il faudrait confirmer ce résultat sur les pluies ultérieures. Ainsi la sélectivité du processus d'éluviation en faveur des smectites ne semble exister qu'en début d'expérimentation ; par la suite, il n'y a pas sélection particulière des smectites vis-à-vis du reste de la fraction 0-2 µm du sol contrairement à ce qui est décrit dans la littérature (Mercier et al, 2000). Au contraire, une augmentation de la quantité de quartz est observée[1]. Les résultats obtenus par diffraction des rayons X et par granulométrie laser sont donc convergents puisque l'analyse de la distribution granulométrique des suspensions montre que l'importance des modes 0,2 µm et 2 µm diminue au profit du mode à 5 µm au cours du temps (figure 4.3).

[1] Celle-ci n'a pu être mise en évidence dans les résultats présentés ici car, pour employer l'approche utilisée ici, nous avons travaillé sur les lames glycolées sur lesquelles le quartz n'apparaît pas.



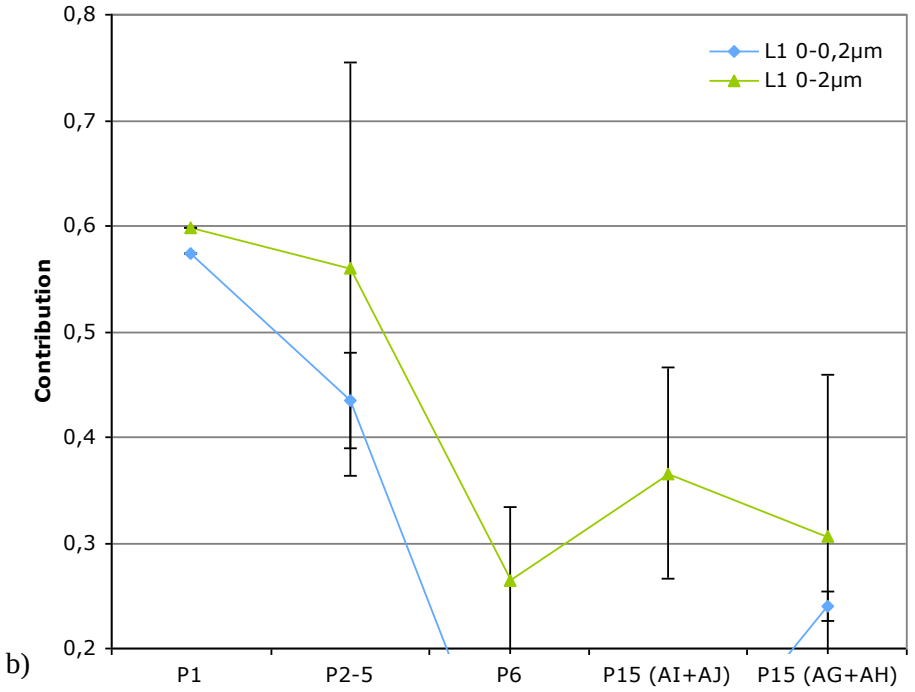


Figure 4.4 : Contribution de la fraction 0-2 µm et 0-0,2 µm du L1 au mélange de particules collectées à la base des colonnes de L1 au cours des différentes pluies estimée par analyse MCR-ALS des diffractogrammes des rayons X obtenus sur lames orientées glycolées. a) Intensité 20 mm/h b) Intensité 6 mm/h

2.3- Impact des conditions expérimentales sur les concentrations en particules migrantes dans les sols: confrontation des données expérimentales des expérimentations L1 et L0/LQ

Dans les expérimentations sur sol remanié (L0/LQ), on mesure des concentrations de particules collectées dans le LQ après 10 pluies significativement plus élevées que celles collectées après n pluies (n > 10) avec une différence plus marquée pour l'intensité 20 mm/h que pour l'intensité 6 mm/h (figure 4.5). Ainsi, lors des premières pluies, il y a un « lavage » des colonnes L0/LQ de sol remanié, comme nous l'avons observé dans le cas des colonnes L1 de sol non perturbé.

Contrairement aux expérimentations sur les colonnes L1, les concentrations présentées ici sont des concentrations moyennes sur les X pluies reçues par la colonne avant son arrêt, du fait même du protocole expérimental. Ainsi quel que soit l'arrêt, l'influence du départ massif de la première pluie est toujours présente. Cet impact est sans doute exacerbé par notre méthode d'analyse basée sur l'identification des smectites par IR et non de la totalité du 0-2 µm du L0. Effectivement, dans la mesure où les smectites sont préférentiellement exportées lors des premières pluies, la quantité de 0-2 µm du L0 estimée sur la base de la quantité de smectites est surestimée. Ce problème ne se retrouve pas pour les pluies suivantes pour lesquelles les smectites ne sont plus exportées préférentiellement comme nous l'avons montré dans le cas du L1 (figure 4.4).

Néanmoins, les concentrations obtenues au cours de ces différents arrêts sont plus élevées d'un ordre de grandeur par rapport à celles obtenues à la sorties des colonnes L1, bien que les deux sols utilisés pour les expérimentations soient presque identiques et présentent des dispersibilités identiques (chapitre 2 et 3). Ceci peut être du (1) à l'importance du départ de particules lors de la première pluie du fait de la structure remaniée des colonnes, (2) à la différence de structure à long terme entre les deux types de colonnes ou (3) à la différence de condition à la limite inférieure. Ces différents points seront discutés plus loin.

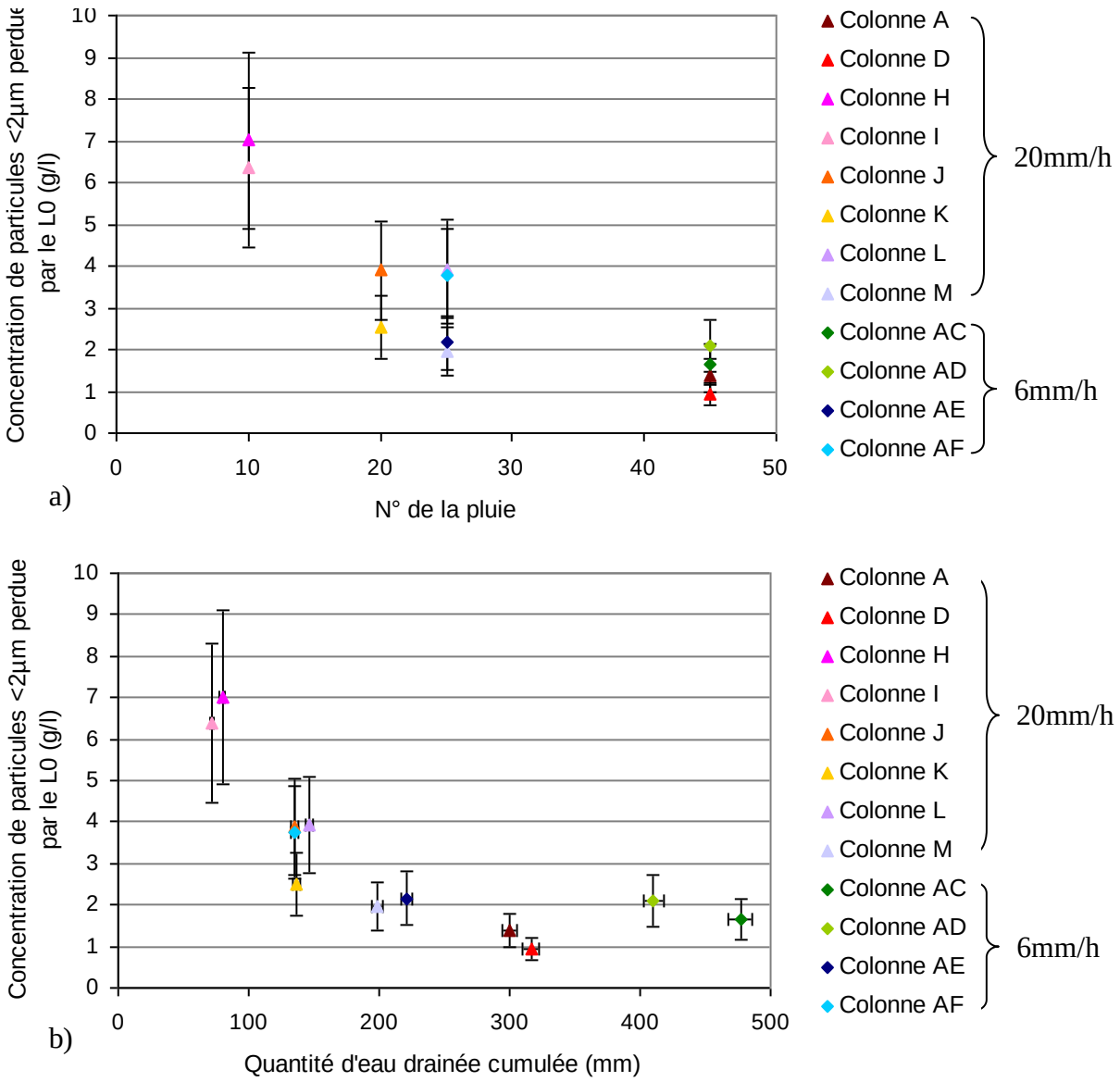


Figure 4.5 : Evolution temporelle de la concentration de particules de taille 0-2 µm mesurée à la base des colonnes de sol pour l'expérimentation L0. a) en fonction du numéro de la pluie, b) en fonction du drainage cumulé. Pour mémoire les concentrations de 0-2 µm de L0 dans LQ ont été mesurées par infra-rouge moyen sur différentes couches du LQ et sur les particules collectées dans le bac sous-jacent. Les concentrations présentées dans cette figure résultent d'un calcul de moyenne pondérée sur les différentes couches et le bac

2.4- Les Luvisols produisent-ils plus de particules que les autres types de sol ? Confrontation avec les données expérimentales disponibles pour d'autres types de sols dans la littérature

Comme discuté au chapitre 1, les expérimentations antérieures rapportées dans la littérature ont été réalisées pour des types de sol ne correspondant pas aux sols les plus favorables au lessivage (tableau 4.2). Ainsi, à priori, les expérimentations réalisées dans cette étude devraient libérer plus de particules que les sols utilisés dans la littérature (pH > 6,5 et texture non limoneuse le plus souvent). L'utilisation de tests de dispersion a effectivement confirmé, la plus grande sensibilité à la dispersion des sols choisis dans cette étude par rapport à ceux utilisés par Kjaergaard et al. (2004b) (voir chapitre 3).

Ainsi si l'on compare les résultats expérimentaux obtenus dans cette étude aux quelques résultats expérimentaux obtenus pour des colonnes de volume comparable dans la littérature (tableau 4.2), on voit que les concentrations en particules dans l'eau ayant percolé à la base des colonnes sont du même ordre de grandeur dans notre étude que celles mesurées par Kjaergaard et al. (2004b) et Jacobsen et al. (1997). Les concentrations que nous mesurons sont légèrement supérieures à celles observées par Kjaergaard et al. (2004b), qui réalisent des expérimentations sur des sols moins favorables au lessivage. Elles sont par contre légèrement inférieures à celles mesurées par à Jacobsen et al. (1997). Ces derniers réalisent des expérimentations avec une condition de drainage libre à la base.

Ces comparaisons avec la littérature ne peuvent guère être poussées beaucoup plus loin du fait de la variabilité des conditions expérimentales - nombre de pluies appliquées, différences de taille des colonnes - qui génèrent des variations fortes de comportement, notamment en termes de volume drainé et de présence ou non d'une phase de « lavage » en début d'expérimentation.

Tableau 4.2 : Concentrations en particules collectées à la base des colonnes de différentes expériences de la littérature et de cette étude, ainsi que les conditions expérimentales associées

Référence	Texture	Teneur en <2 µm (%)	pH	Structure de la colonne	Condition à la limite inférieure	Condition initiale	Intensité de pluie (mm/h)	Phase de lavage	Nombre de pluies	Taille de la colonne	Nbre de volumes poraux traversés	Concentration à la base de la colonne (g/L)
Jacobsen et al, 1997	limon sableux	15,7	6,17	non perturbée	drainage libre	- 20 hPa	30	Drainage après saturation	1	18,3*20cm	0,1	0,59
Jacobsen et al, 1997	limon sablo argileux	21,1	5,89	non perturbée	drainage libre	- 20 hPa	30	Drainage après saturation	1	18,3*20cm	0,2	0,77
Cette étude	limoneux argileux	30,7	6,19	non perturbée	30 hPa pendant 100h	- 300 hPa	20	Pluie 1	1	15*15 cm	0,2-0,5	0,48-2,70
Cette étude	limoneux argileux	30,7	6,19	non perturbée	30 hPa pendant 100h	- 300 hPa	20	Pluies 2 à 19	18	15*15 cm	2,9-7,2	0,21-0,37
Cette étude	limoneux argileux	25,9	5,82	perturbée	succion appliquée par un limon de quartz	- 300 hPa	20	Pluies 1 à 10	10	13,5*15 cm	1,1-1,2	6,37-7,01
Cette étude	limoneux argileux	25,9	5,82	perturbée	succion appliquée par un limon de quartz	- 300 hPa	20	Pluies 1 à 45	45	13,5*15 cm	4,4-4,7	0,94-1,37
Kjaergaard et al, 2004b	sable limoneux	11,5	6,6	non perturbée	- 5 hPa	- 100 hPa	1	Drainage après saturation	1	10*8cm	3,0	1,01
Kjaergaard et al, 2004b	sable argileux	18	6,7	non perturbée	- 5 hPa	- 100 hPa	1	Drainage après saturation	1	10*8cm	3,0	0,74
Kjaergaard et al, 2004b	sable argileux	24,3	7,2	non perturbée	- 5 hPa	- 100 hPa	1	Drainage après saturation	1	10*8cm	3,0	0,14
Kjaergaard et al, 2004b	argile sableuse	27,5	7,4	non perturbée	- 5 hPa	- 100 hPa	1	Drainage après saturation	1	10*8cm	3,0	0,15
Kjaergaard et al, 2004b	argile sableuse	36,6	7,5	non perturbée	- 5 hPa	- 100 hPa	1	Drainage après saturation	1	10*8cm	3,0	0,11
Kjaergaard et al, 2004b	argile lourde	42,8	7,5	non perturbée	- 5 hPa	- 100 hPa	1	Drainage après saturation	1	10*8cm	3,0	0,13
Cette étude	limoneux argileux	30,7	6,19	non perturbée	30 hPa pendant 100h	- 300 hPa	6	Pluie 1	1	15*15 cm	0,3-0,5	0,32-0,63
Cette étude	limoneux argileux	30,7	6,19	non perturbée	30 hPa pendant 100h	- 300 hPa	6	Pluies 2 à 19	18	15*15 cm	5,0-6,8	0,14-0,41
Cette étude	limoneux argileux	25,9	5,82	perturbée	succion appliquée par un limon de quartz	- 300 hPa	6	Pluies 1 à 20	20	13,5*15 cm	2,0-3,3	2,16-3,76
Cette étude	limoneux argileux	25,9	5,82	perturbée	succion appliquée par un limon de quartz	- 300 hPa	6	Pluies 1 à 45	45	13,5*15 cm	6,1-7,1	1,63-2,09

2.5- Conclusion : concentrations et nature des particules migrantes dans un Luvisol

Si l'on omet ces premières pluies pour lesquelles il y a un « lavage » des colonnes, les concentrations sont inférieures à 0,65 g/L (à quelques exceptions près). Ces concentrations sont du même ordre de grandeur que celles mesurées par Kjaergaard et al. (2004b) et Jacobsen et al. (1997), avec une tendance à des concentrations légèrement supérieures dans notre cas par rapport aux sols de Kjaergaard et al. (2004b) qui sont moins favorables au lessivage. Néanmoins, compte tenu des différences de protocoles entre la littérature et cette étude et la grande variabilité de concentrations enregistrées entre les colonnes (d'un facteur 3), il est difficile de conclure plus sur l'impact de la nature du sol influant sur les concentrations de particules libérées en suspension.

Les particules qui ont migré lors des expérimentations de simulation de pluie ont une signature minéralogique très proche de celle de la fraction 0-2 µm totale du sol, sauf pour les premières pluies pour lesquelles on observe aussi une contribution non négligeable de la fraction 0-0,2 µm riche en smectites. Ainsi la sélectivité du processus d'éluviation en faveur des smectites ne semble exister qu'en début d'expérimentation, contrairement à ce qui est décrit dans la littérature (Mercier et al., 2000).

III. Les mécanismes de l'éluviation

Comme nous l'avons déjà évoqué dans le chapitre 1, la mise en suspension des particules est gouvernée par deux grandes familles de mécanismes : des mécanismes physiques d'une part (cycle d'humectation/dessiccation, gel/dégel, cisaillement, splash en surface, Le Bissonnais, 1988 ; Kaplan et al., 1993 ; Ryan et al., 1998 ; Worrall et al., 1999 ; Shang et al., 2008) et des mécanismes physico-chimiques (charge de surface des colloïdes, nature des cations, pH, dominance du Na^+, Robert et Tessier, 1974 ; Duchaufour, 1983 ; Gal et al., 1984 ; Goldbergs et al., 1990 ; Le Bissonnais, 1996 ; Soil Survey Staff, 1999 ; WRB, 2006). L'impact de ces deux groupes de mécanismes sur les concentrations en particules à la base des colonnes peut être analysé d'une part au travers du fonctionnement hydrodynamique des colonnes et d'autre part sur la base de la composition géochimique des solutions traversant ces colonnes.

3.1- Rôle des écoulements préférentiels par rapports aux écoulements matriciels sur les concentrations en particules

3.1.1 Fonctionnement hydrodynamique des colonnes

3.1.1.1 Hypothèses sur le fonctionnement des colonnes

Les cylindres L0 des colonnes de L0/LQ sont constitués de sol remanié. La structure de ces colonnes est donc a priori homogène et l'on peut faire l'hypothèse, d'une part, que ces colonnes devraient avoir un comportement hydrodynamique assez proche les unes des autres et, d'autre part, que ces colonnes ne devraient pas présenter de chemins d'écoulement préférentiel, au moins lors des premiers cycles pluie/séchage.[1] A l'inverse, les colonnes L1, constituées de sol non perturbé, peuvent, pour certaines d'entre elles, présenter des chemins d'écoulement préférentiel. En effet, les images de tomographie en rayons X réalisées sur certaines colonnes avant le début des expérimentations, mettent en évidence des trous de vers de terre dont certains sont percolants (figure 4.6). On peut ainsi s'attendre a priori à une variabilité de comportement des colonnes L1, certaines présentant des chemins d'écoulement préférentiel, et d'autres un comportement hydrodynamique de type matriciel.

[1] On ne peut exclure qu'une structuration s'installe à moyen terme. Seule une analyse par tomographie de rayons X permettrait de trancher sur ce point. Nous ne disposons pas de telles images dans la thèse actuellement.

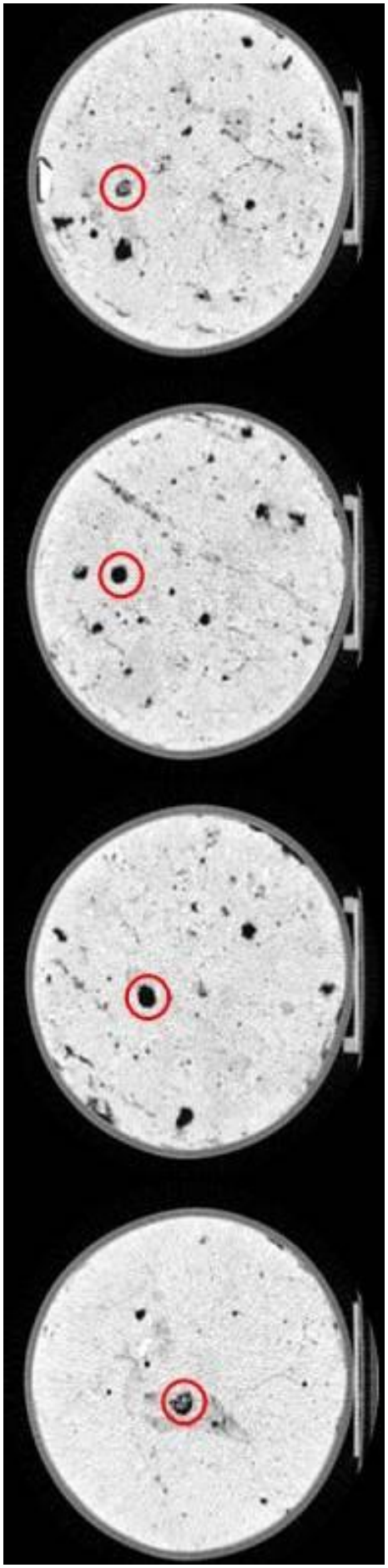


Figure 4.6 : Image de tomographie au rayon X de l'état initial de la colonne I de l'intensité 20mm/h. Suivi d'un macropore percolant sur toutes la hauteur de la colonne

3.1.1.2 Analyse des colonnes L0/LQ

Pour l'intensité 20 mm/h, les colonnes L0/LQ ont un fonctionnement assez homogène avec des variations de quantité d'eau drainée comprises entre 6 et 43 % et un drainage qui représente environ 19 % de la quantité d'eau reçue (figure 4.7a). Pour l'intensité 6 mm/h, les colonnes ont un comportement moins homogène que pour l'intensité 20 mm/h (figure 4.7b) avec des variations de quantité d'eau drainée comprises entre 1 et 92 %. Le drainage est plus important, il représente en moyenne 32 % de la quantité d'eau reçue. La colonne AF voit son drainage décroitre drastiquement après les 2 premières pluies pour lesquelles le drainage avait été très important. On peut se demander s'il s'agit d'un colmatage de la colonne lors de la phase de lavage.

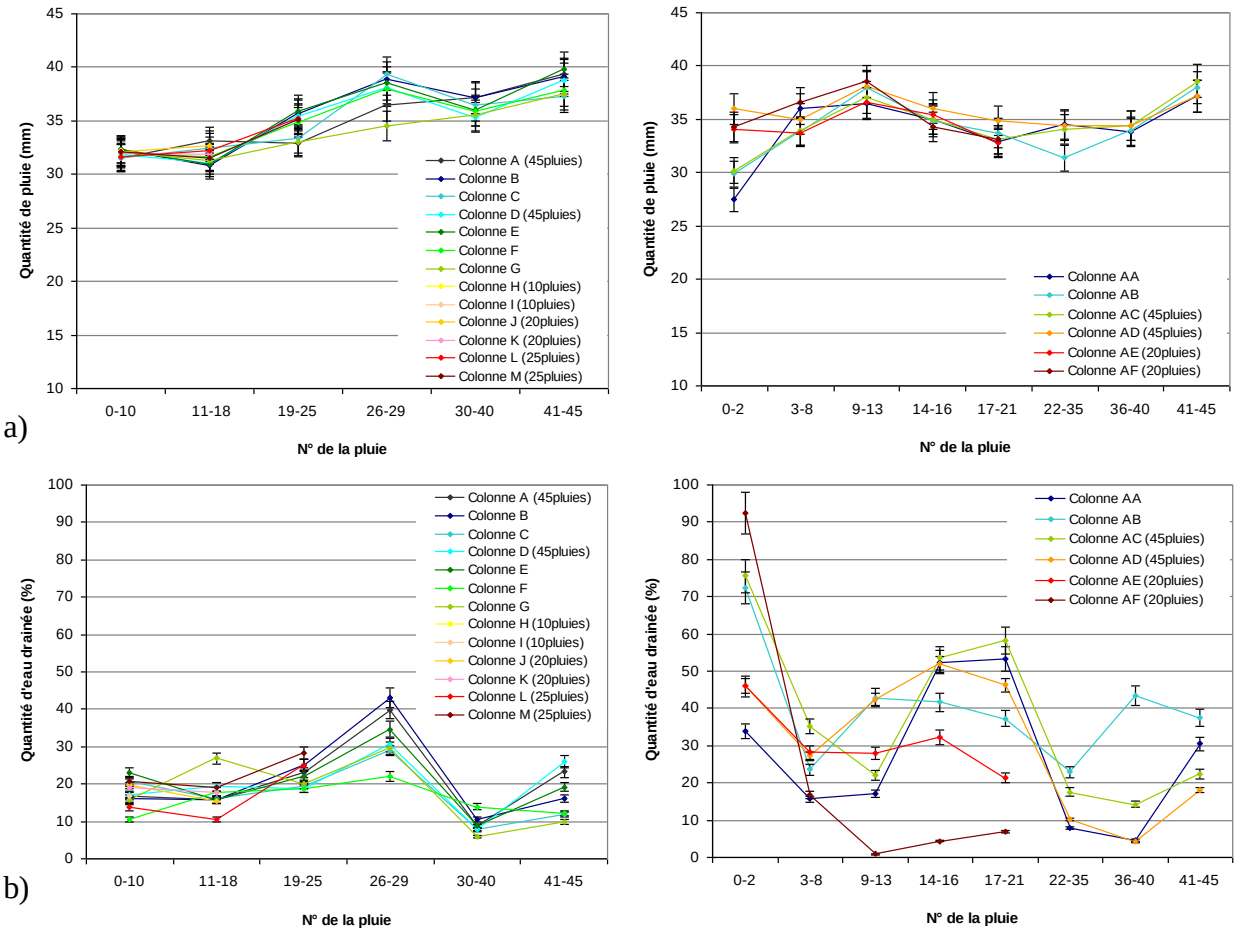


Figure 4.7 : Quantité de pluie reçue et quantité d'eau drainée par les différentes colonnes des expérimentations L0/LQ. a) Intensité 20 mm/h b) Intensité 6 mm/h

3.1.1.3 Analyse des colonnes L1

La figure 4.8 présente une synthèse de l'ensemble des résultats pour toutes les colonnes étudiées. Sur cette figure l'échantillon AH n'est pas coloré car nous verrons que son comportement est très atypique.

Figure 4.8 : Synthèse des résultats d'expérimentation sur toutes les colonnes L1

Dans le cas des colonnes L1 sur sol non perturbé, les colonnes se répartissent en deux familles pour l'intensité de pluie 20 mm/h : d'une part les colonnes H et J, pour lesquelles la quantité d'eau drainée moyenne (environ 13 mm / événement pluvieux) et la quantité d'eau drainée cumulée totale (environ 230 mm) sont les plus faibles ; d'autre part les colonnes I et K pour lesquelles la quantité d'eau drainée moyenne est de l'ordre de 22 mm et la quantité d'eau drainée cumulée est de l'ordre de 400 mm (figure 4.8 et figure 4.9).

Pour l'intensité de pluie 6 mm/h, les colonnes AG, AJ et AI ont des comportements proches (une quantité d'eau drainée moyenne de l'ordre de 25 mm et une quantité d'eau drainée cumulée en fin d'expérimentation supérieure à 400 mm) alors que les quantités d'eau drainées par la colonne AH sont significativement plus faibles lors des premières pluies (2 à 6) (figure 4.8 et figure 4.9).

a- 20 mm/h b- 6 mm/h

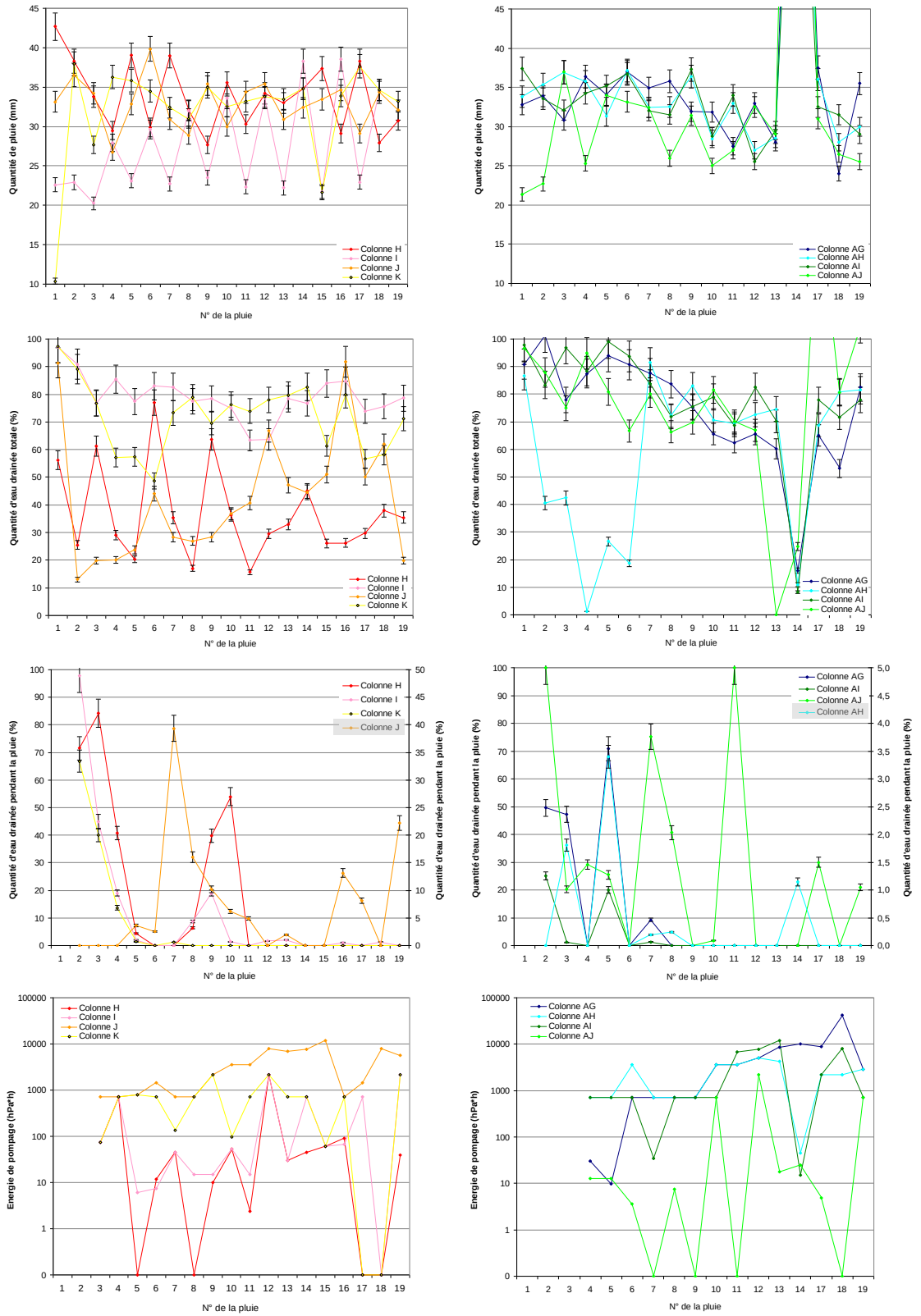


Figure 4.9 : Quantités de pluie, quantités d'eau drainée, pourcentage d'eau drainée pendant la pluie, énergie de pompage pour les différentes colonnes de l'expérimentation L1. a) Intensité 20 mm/h b) Intensité 6 mm/h. Les caractéristiques des colonnes surlignées en gris dans la légende sont sur l'axe secondaire

Différentes hypothèses peuvent expliquer cette variabilité des quantités d'eau drainées à la base des colonnes de sol non perturbé L1:

1- en premier lieu, l'évolution des conditions à la limite supérieure - c'est-à-dire la variabilité des quantités d'eau reçues par les différentes colonnes malgré nos efforts pour les maintenir constantes. Ainsi, à l'exception des colonnes H et J qui drainent peu, on observe une relation linéaire entre la quantité de pluie et la quantité d'eau drainée (figure 4.10).

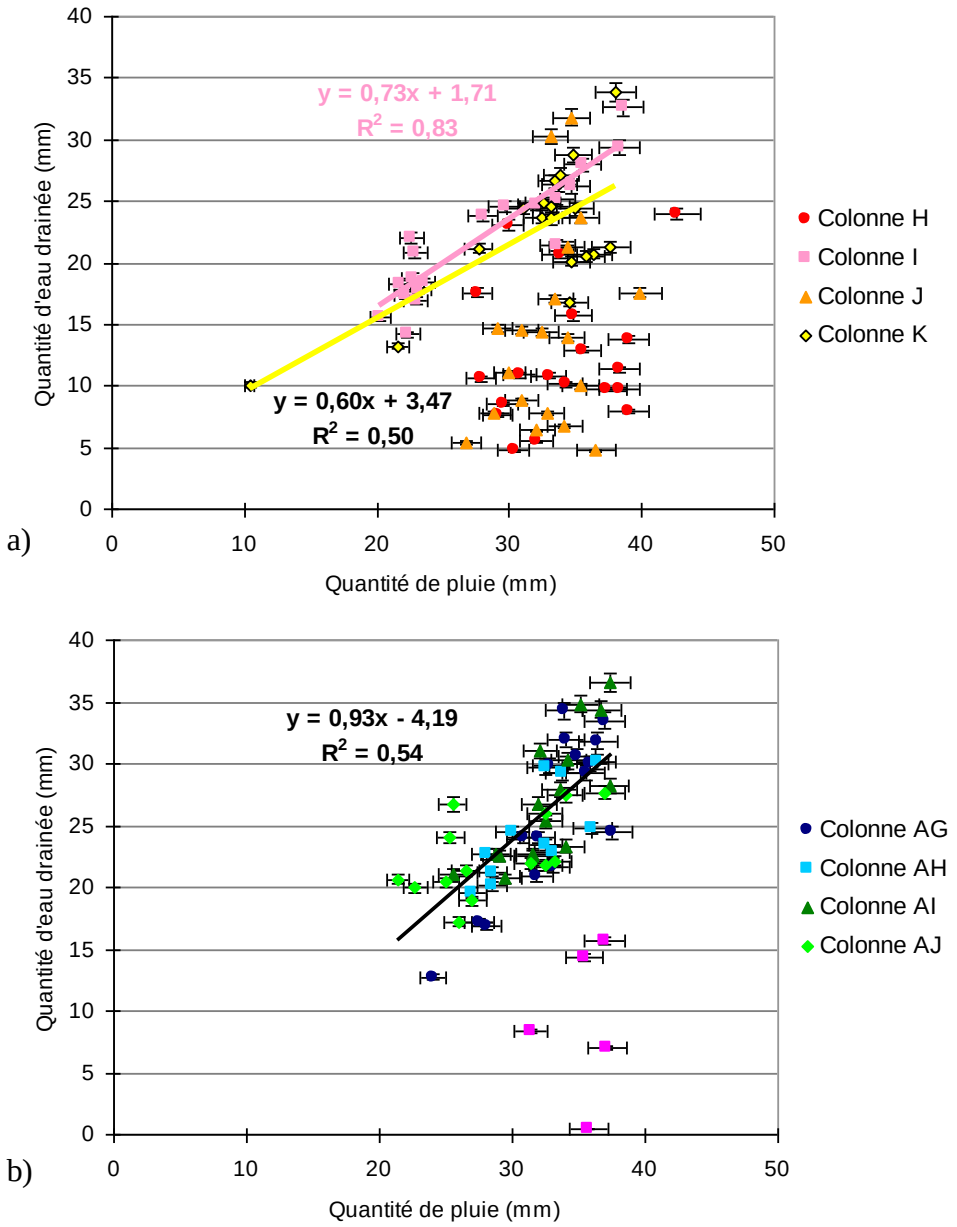


Figure 4.10 : Quantité d'eau drainée en fonction de la quantité d'eau de pluie reçue pour chaque colonne de l'expérimentation L1. a) Intensité 20 mm/h b) Intensité 6 mm/h. (Pour l'intensité 6 mm/h, la pluie 14 n'a pas été prise en compte et les points extrêmes en rose n'ont pas été pris pour réaliser la droite de régression)

2- la variabilité de la condition initiale (potentiel hydrique et état de surface avant chaque événement pluvieux). On n'observe néanmoins pas de lien entre la quantité d'eau drainée et le potentiel hydrique initial (avant la pluie) (ou même le potentiel hydrique maximum enregistré pendant la pluie). On observe également que la quantité d'eau drainée ne dépend pas de l'état de surface au début de la pluie, du fait sans doute du travail superficiel effectué entre chaque pluie (figure 4.11).

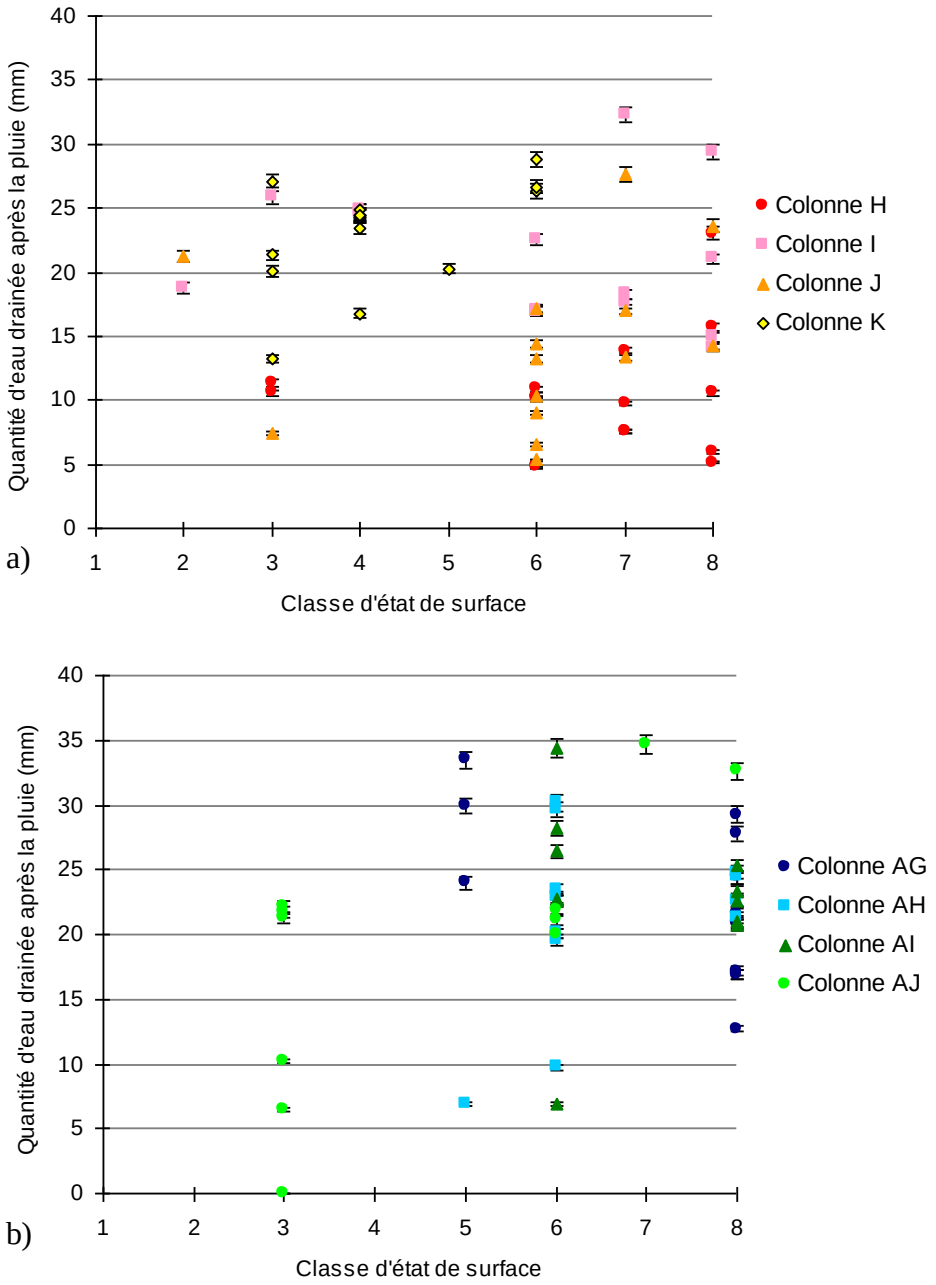


Figure 4.11 : Quantité d'eau drainée après la pluie en fonction de l'état de surface pour chaque colonne de l'expérimentation L1. a) Intensité 20 mm/h b) Intensité 6 mm/h

3- des différences de structure qui se traduisent par des capacités d'infiltration différentes pour les différentes colonnes et la nécessité d'appliquer des succions à la base des colonnes plus ou moins longues et intenses pour les drainer (figure 4.9). Pour l'intensité 20 mm/h, on n'observe pas de relation entre les quantités d'eau drainée après la pluie et l'énergie de pompage, à l'exception de la colonne J, qui draine peu. Pour l'intensité 6 mm/h, on observe une anti-corrélation entre les deux variables pour les colonnes AG et AH. On peut émettre l'hypothèse que le réseau poreux des colonnes a tendance à se boucher au cours des pluies successives, ce qui nécessite une énergie de pompage plus élevée. Cette absence de relation, pour certaines colonnes, entre la succion appliquée à la base des colonnes et la quantité d'eau drainée est remarquable.

Au final, il apparaît donc que les quantités d'eau drainées les plus faibles sont observées sur les colonnes H et J. La quantité d'eau drainée ne représente qu'environ 40 % de l'eau apportée par la pluie alors qu'elle représente 76 % pour les colonnes I et K (figure 4.9). On peut faire l'hypothèse que l'eau qui traverse les colonnes est transférée assez rapidement par des chemins préférentiels toujours identiques (majoritairement pour les colonnes H et I figure 4.9) ; la teneur en eau des colonnes évolue peu, excepté en surface, et la part de l'eau non drainée est très vraisemblablement éliminée des colonnes par évaporation. Les quantités d'eau drainées les plus élevées sont observées sur les colonnes AJ, AG et AI qui subissent une intensité de pluie de 6 mm/h. Les quantités d'eau drainées représentent environ 76 % de la quantité d'eau apportée par la pluie. Il est probable que le fonctionnement hydrique de ces colonnes est différent : l'humectation des colonnes est plus lente, le front d'humectation descend plus bas dans les colonnes et l'eau est transférée vers le bas des colonnes non pas par des chemins préférentiels, mais par un transfert de type matriciel.

Afin de valider ces hypothèses, il conviendrait de disposer des images de la structure des colonnes de sol sur lesquelles nous pourrions appliquer un modèle de transfert qui nous permettrait d'identifier le processus dominant (transfert préférentiel vs transfert matriciel). Nous ne disposons pas de telles données. En revanche, nous pouvons revenir sur l'analyse séquentielle des quantités d'eau drainées au cours de chaque événement pluvieux (figure 4.9).

Pour l'intensité 20 mm/h, on n'observe pas d'évolution temporelle des quantités d'eau drainées au cours de l'ensemble de l'expérimentation. Pour l'intensité 6 mm/h, en revanche, on observe que les quantités d'eau drainées ont tendance à diminuer jusqu'à la pluie 14. On peut penser qu'une partie du réseau poreux a été modifié (bouchage de pores actifs,

effondrement, par exemple), ce qui limite l'écoulement[1]. Ces observations sont cohérentes avec les deux types de processus proposés.

3.1.2 Mise en évidence de l'importance quantitative de ces écoulements par modélisation sur le L1

Pour discuter du mode de transfert au sein des colonnes de sols L1, nous avons simulé le transfert d'eau au cours de la pluie et pendant la phase de drainage avec la pompe. Pour cela nous avons utilisé le modèle Hydrus-1D (Simunek et al., 2005), qui résout l'équation de Richards (équation 4.1) au sein d'un réseau poreux variablement saturé:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[K(h)\left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1\right)\right] \qquad \text{(équation 4.1)}$$

avec *t*, le temps (s), *z*, la hauteur du profil (m), *K(h)* la conductivité hydraulique ($m.s^{-1}$), *h*, le potentiel matriciel (m).

Le domaine de simulation est constitué d'un milieu de 0,15m de hauteur, finement maillé (100 mailles espacées de 0,0015 m), et décrit par les propriétés hydrodynamiques du sol L1 (chapitre 2 partie II). Ces propriétés sont homogènes sur tout le domaine de simulation. Les écoulements d'eau modélisés par Hydrus 1D sont de type matriciel.

La mise en évidence du processus hydrodynamique dominant - transfert préférentiel ou transfert de type matriciel - est réalisée par comparaison des séquences temporelles de potentiel matriciel mesurées dans les colonnes lors des expérimentations, ou simulées par le modèle. On analyse les valeurs de potentiel aux profondeurs 5 et 10 cm. Les données expérimentales sont celles des colonnes K et AG, dont nous avons fait l'hypothèse au paragraphe précédent qu'ils avaient des comportements hydrodynamiques différents.

Pour l'intensité 20 mm/h, les résultats de la simulation montrent que l'évolution du potentiel à 5 cm de profondeur est assez bien reproduite par la simulation, avec une rapide remontée du potentiel au cours de la pluie (figure 4.12a). La simulation de l'évolution du potentiel à 10 cm de profondeur s'éloigne par contre assez fortement des données tensiométriques enregistrées. L'expérimentation enregistre une remontée du potentiel plus rapide que celle modélisée par la simulation. Cette différence est le signe d'un transfert plus rapide au sein de la colonne de sol expérimentale.

[1] L'événement exceptionnel de la pluie 14 modifie probablement significativement la structure des sols dans les colonnes ce qui expliquerait que les quantités d'eau drainée redeviennent plus élevées.

Pour l'intensité 6 mm/h, les données expérimentales montrent que les profils de potentiels aux deux profondeurs sont assez proches, et qu'après 2,5 h de pluie, un régime permanent est établi (figure 4.12b). Pour les résultats de la modélisation, ce régime permanent s'établit après 4 h de pluie. La dynamique du profil de potentiel issue de la simulation est donc cohérente avec les données expérimentales, même si les temps après lesquels s'installe le régime permanent sont légèrement différents.

L'ensemble de ces résultats nous amène à conclure que des transferts rapides (transferts préférentiels) existent dans les colonnes L1 lorsque celles-ci sont soumises à une intensité de 20 mm/h. Au contraire, pour l'intensité 6 mm/h, les transferts matriciels sont majoritaires.

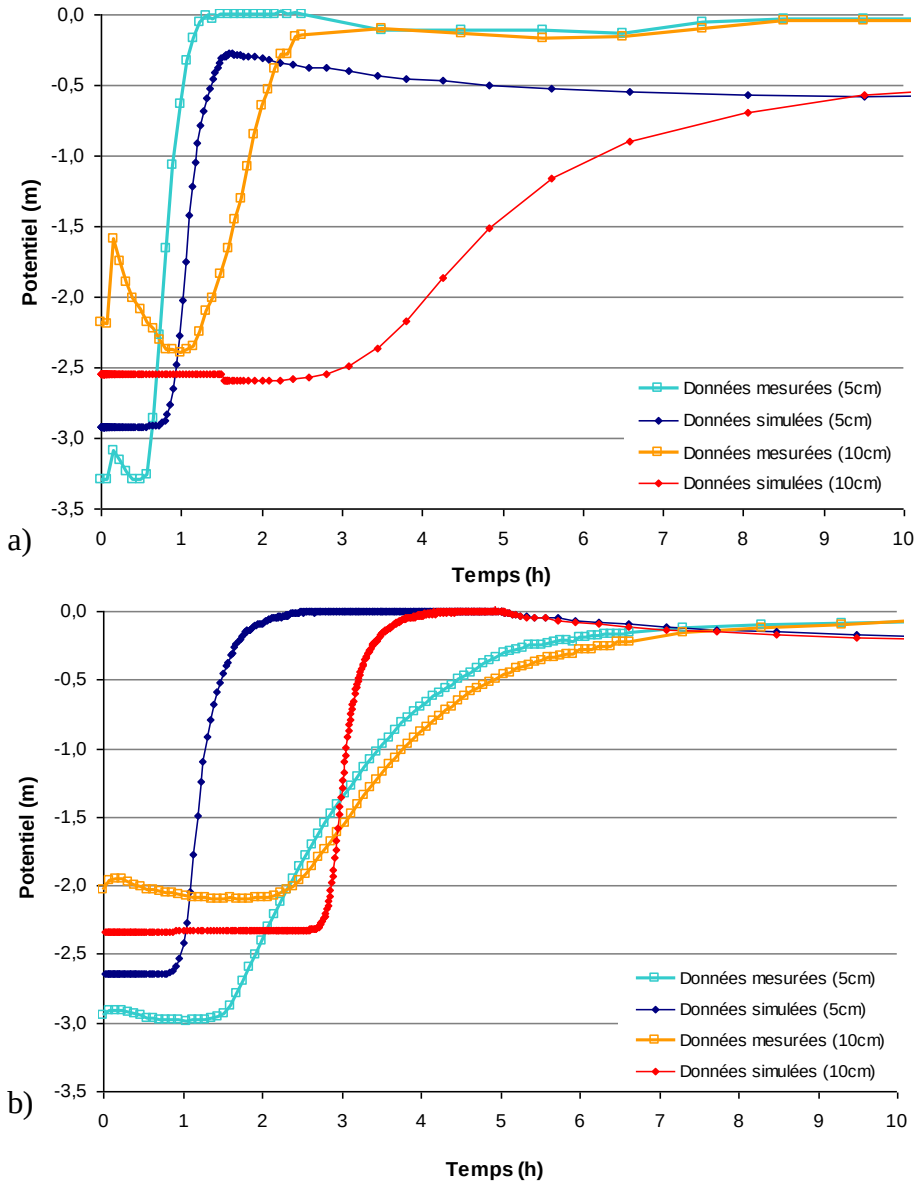


Figure 4.12 : Evolutions du potentiel matriciel à 5 et 10 cm de profondeur, mesurées sur les colonnes K et AG et simulées par modélisation. a) simulation de la pluie 11 pour 20 mm/h, b) simulation de la pluie 7 pour 6 mm/h

3.1.3. Impact sur les concentrations en particules

L'analyse précédente a permis de mettre en évidence deux grands types de fonctionnement hydrodynamique des colonnes : des flux préférentiels, non négligeables dans le cas de certaines des colonnes L1 pour l'intensité 20 mm/h, et des flux matriciels dans le cas des colonnes L1 à 6 mm/h et L0/LQ (tableau 4.3).

Tableau 4.3 : Récapitulatif des différents types de fonctionnements hydrodynamiques des colonnes pour les expérimentations L1 et L0/LQ

Colonne	Type de flux
H	Préférentiel
I	Préférentiel
J	Préférentiel
K	Préférentiel
AG	Matriciel
AH	Matriciel
AI	Matriciel
AJ	Matriciel
L0/LQ 20mm/h	Matriciel
L0/LQ 6mm/h	Matriciel

D'après la littérature, les transferts de particules se font essentiellement dans les macropores par les transferts préférentiels (Jarvis et al., 1999 ; Finke et Hutson, 2008 ; Michel et al., 2010). La confrontation entre les quantités d'eau drainées pendant les différentes pluies et les concentrations en particules obtenues pour ces mêmes pluies montrent que (figure 4.13) dans le cas des colonnes H et I (intensité 20 mm/h), qui présentent des flux préférentiels, les concentrations en particules les plus élevées sont enregistrées lors des épisodes de drainage rapides (pendant la pluie) les plus importants (figure 4.13a). Ceci est moins vrai pour les deux autres colonnes L1 à 20 mm/h et les colonnes L1 à 6 mm/h (figure 4.13b). Pour ces dernières et pour la colonne J, les plus fortes concentrations sont enregistrées pour les événements ayant nécessité les plus fortes énergies de pompage à la base (colonnes J, AG et AI notamment, les autres colonnes ayant un comportement hybride).

Ainsi, aux deux fonctionnements hydrodynamiques correspondent deux modes de transferts des particules. L'importance de l'un par rapport à l'autre n'a pu être déterminée dans le cadre de ce travail, les concentrations enregistrées étant à peu près équivalentes dans les deux cas.

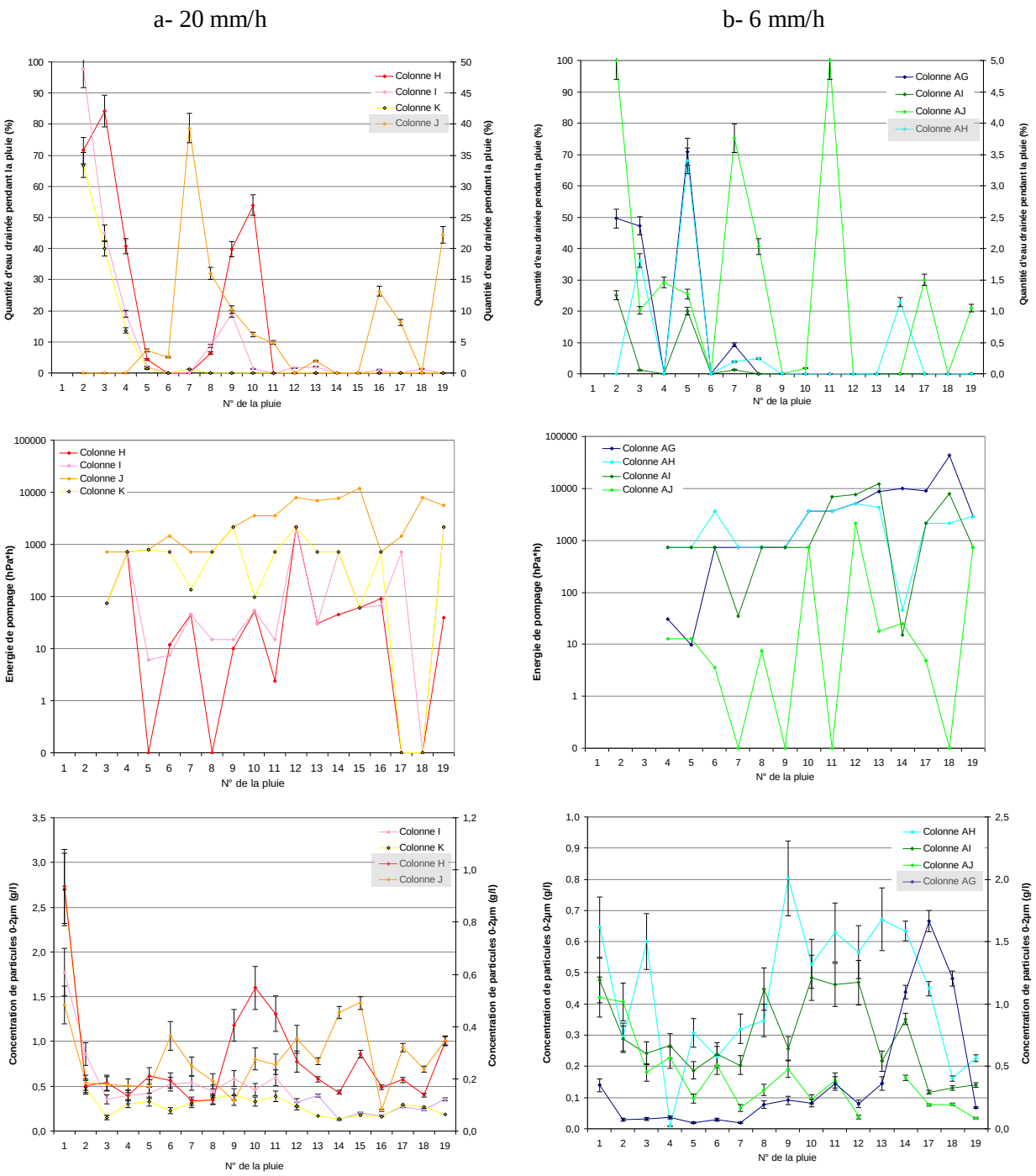


Figure 4.13 : Concentrations en particules, pourcentage d'eau drainée pendant la pluie et énergie de pompage pour les colonnes de l'expérimentation L1. a) Intensité 20 mm/h et b) Intensité 6 mm/h. Les colonnes surlignées en gris dans la légende sont représentées sur l'axe secondaire

3.2 Impact de la chimie de la solution du sol sur les concentrations en particules migrantes dans le sol

Quelle que soit l'expérimentation considérée, L1 ou L0/LQ, l'évolution de la composition chimique de l'eau du sol (prélevée par des bougies poreuses) au cours du temps est la même (figure 4.14). La concentration en cations majeurs et la conductivité décroissent jusqu'à atteindre un palier. Ce palier est de l'ordre de grandeur des concentrations enregistrées dans la pluie pour Cl^-, Mg^{2+} et K^+.

Le chlore est souvent considéré dans les sols comme un traceur parfait dans la mesure où il ne s'adsorbe pas sur les phases minérales (Schulin et al., 1987 ; Peters et Ratcliffe, 1998). Sa décroissance avec le nombre de pluies, très marquée jusqu'à environ 1,6 volumes poraux drainés, met en évidence qu'il faut environ 1,6 volumes poraux drainés avant d'éliminer complètement l'eau contenue dans le sol avant le début de l'expérimentation (figure 4.14). Ensuite, on peut considérer que toute augmentation en cation dans l'eau du sol par rapport à la pluie est le résultat d'un échange des ions H^+ de l'eau de pluie avec les cations échangeables du sol. Avant ce drainage, l'augmentation des concentrations en cations dans l'eau du sol est due à la fois à un échange mais aussi à un mélange avec l'eau présente dans le sol au début de l'expérimentation.

Entre les expérimentations L1 et L0/LQ, la seule différence observée concerne les concentrations en Ca^{2+} plus élevées dans les solutions du sol L1 que dans le L0. En effet, ce sol, très comparable à L0 par ailleurs, présente des quantités de Ca^{2+} échangeable nettement plus élevées que L0 (voir tableau 2.3 chapitre 2).

Au-delà de 1,6 volumes poraux drainés, une partie des cations échangeables présents à la surface des argiles est perdue. Ceci devrait avoir un rôle défloculant sur le complexe argileux (Gal et al., 1984 ; Le Bissonnais, 1996) qui devrait se traduire par une augmentation des particules en suspensions. Or aucune augmentation nette de particules en suspension collectée à la base des colonnes n'est observée au-delà des 1,6 volumes poraux drainés. Ce processus est donc limité, au moins sur la durée de l'expérimentation.

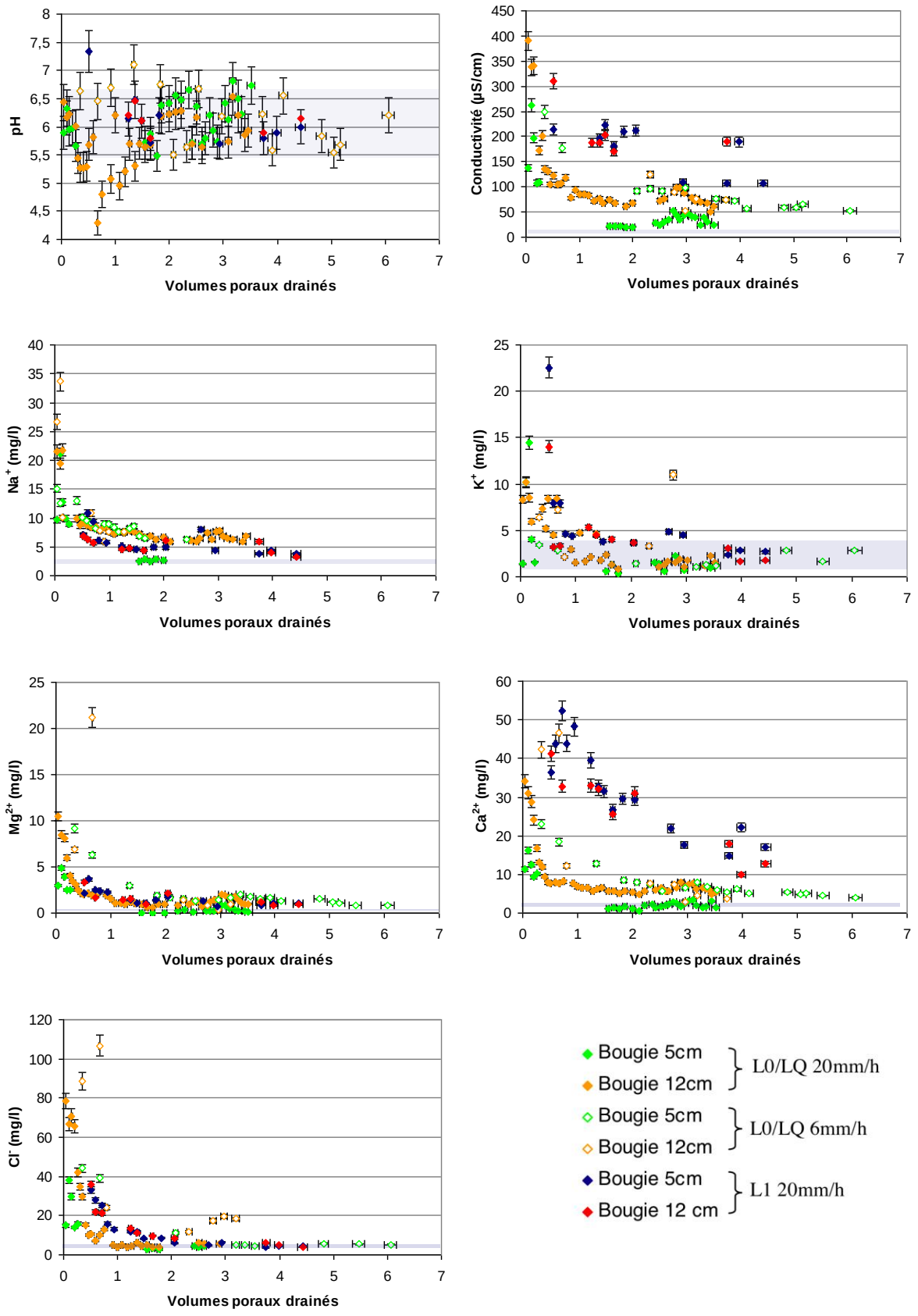


Figure 4.14 : Evolution des concentrations en cations majeurs et en Cl^-, du pH et de la conductivité électrique de la solution du sol collectée par bougie poreuse dans les colonnes des expérimentations L1 et L0/LQ. La zone grisée correspond aux propriétés de l'eau de pluie

3.3 Conclusion : impact respectif des processus de transfert et des processus physico-chimique sur l'éluviation

Deux fonctionnements hydrodynamiques ont été mis en évidence pour les colonnes L1 : un fonctionnement comprenant une part non négligeable d'écoulement préférentiel dans le cas de certaines colonnes à 20 mm/h et un écoulement majoritairement matriciel (comme pour les colonnes remaniées L0/LQ) dans le cas de la plupart des colonnes à 6 mm/h. A ces deux types de fonctionnement hydrodynamique correspondent deux modes de transferts des particules : une exportation liée au transfert préférentiel dans le premier cas contre une exportation en partie liée à la succion appliquée à la base des colonnes dans le second. L'importance de l'un par rapport à l'autre n'a pu être déterminée dans le cadre de ce travail, les concentrations enregistrées étant à peu près équivalentes dans les deux cas.

Par contre, aucune influence de la composition chimique de la solution du sol sur les concentrations de particules mises en suspension n'a pu être mise en évidence.

Ainsi le rôle de la composition chimique des solutions sur la mise en suspension des particules semble être moins important que les processus physiques de mise en suspension, au moins sur la durée des expérimentations réalisées ici et pour les colonnes analysées.

IV. Quantités de particules perdues à l'échelle des expérimentations et extrapolation sur les temps de la pédogenèse.

4.1 Quantités de particules perdues et évolution temporelle à l'échelle de l'expérimentation

Les quantités de particules exportées à la base des colonnes dans les différentes expérimentations sont calculées sur la base des concentrations en particules obtenues et des volumes d'eau drainés.

Dans le cas du sol non perturbé, L1, on observe trois classes de comportement selon les colonnes, pour les deux intensités de pluie : les colonnes H, J et AJ exportent de faibles quantités de particules (de l'ordre de 70 g/m²) ; les colonnes AG, AI et K exportent environ 130-140 g/m², et enfin les colonnes I et AH exportent des quantités de particules plus élevées (150 à 200 g/m²) (figure 4.8 et figure 4.15).

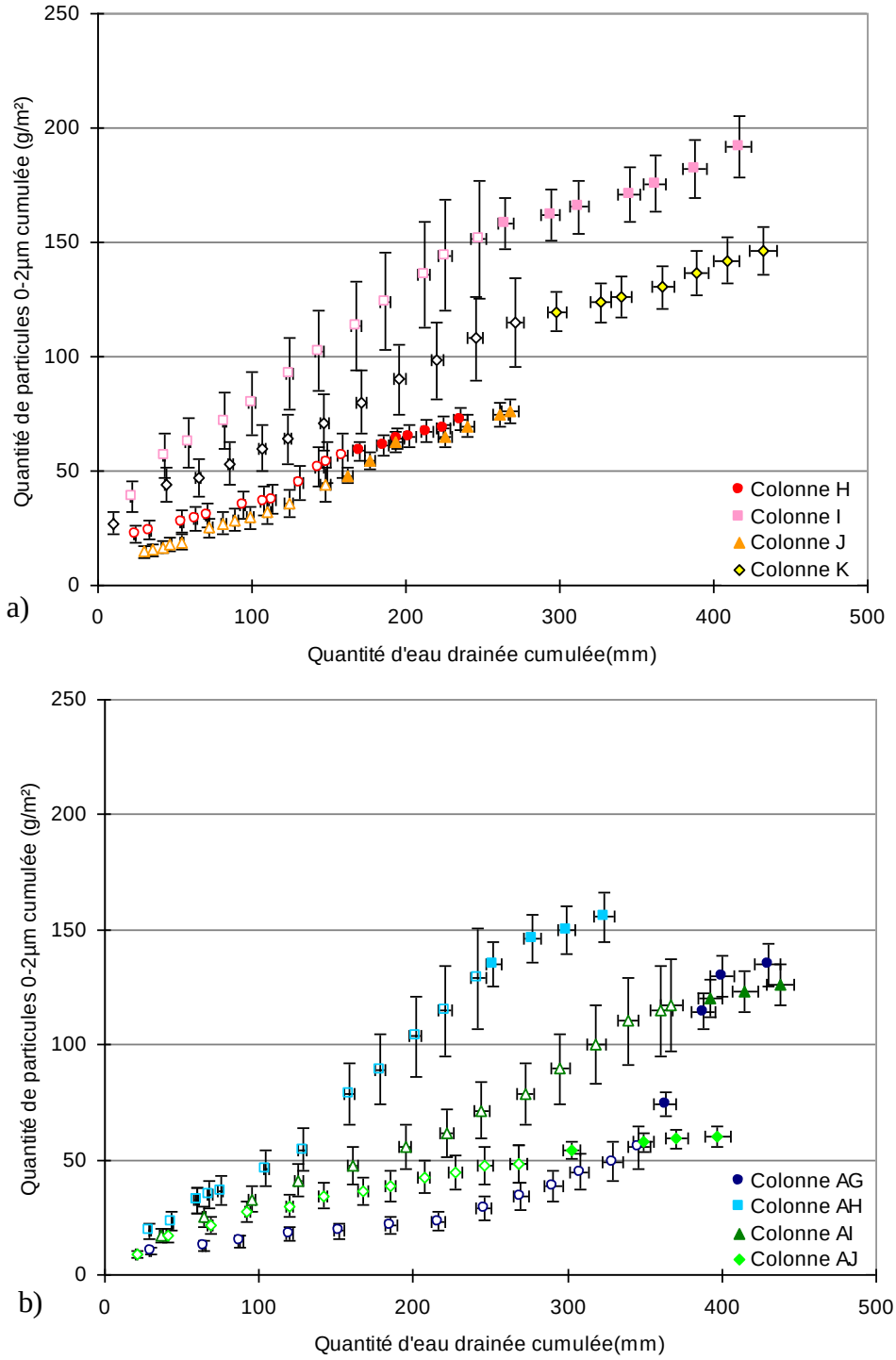


Figure 4.15 : Evolution des quantités cumulées de particules exportées en fonction des quantités d'eau drainée cumulée pour chaque colonne de l'expérimentation L1. a) Intensité 20 mm/h b) Intensité 6 mm/h. Les figurés vides représentent les concentrations estimées et les figurés pleins les concentrations mesurées

Dans le cas du sol remanié, L0/LQ, les quantités de particules exportées pour les deux intensités sont comprises entre 296 et 857 g/m² (figure 4.16).

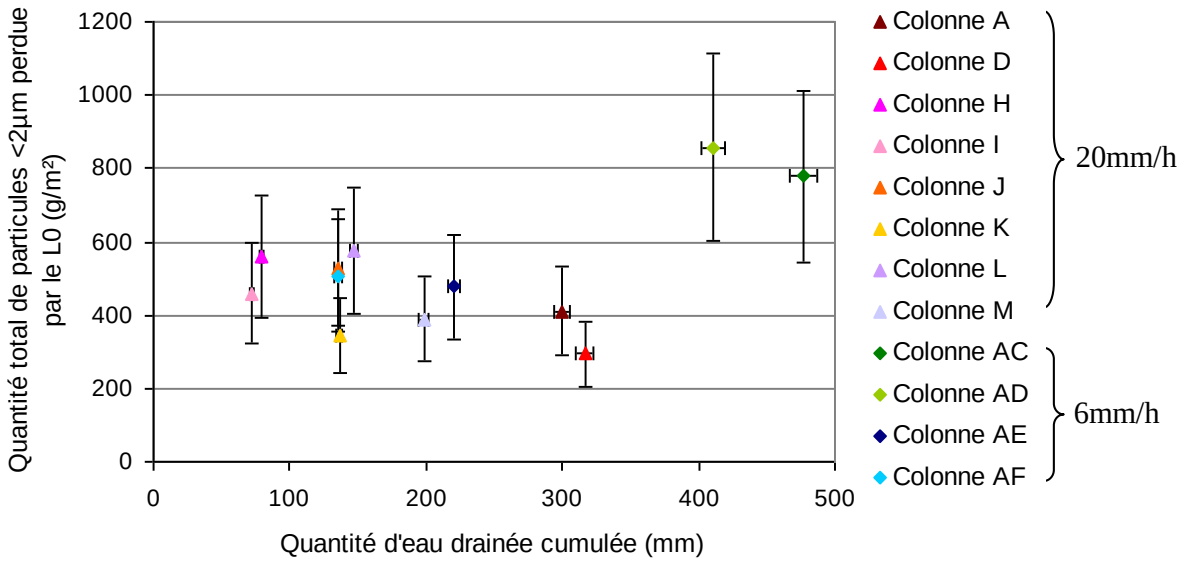


Figure 4.16 : Evolution des quantités de particules 0-2 µm exportées du L0 en fonction des quantités d'eau drainée cumulée pour les deux intensités

Du fait des incertitudes importantes sur la mesure des concentrations, il ne semble pas y avoir d'évolution temporelle des quantités de particules exportées pour l'intensité 20 mm/h, contrairement au cas de l'intensité 6 mm/h. Pour cette intensité les quantités d'eau drainées sont nettement plus importantes (figure 4.16). L'analyse des concentrations au cours du temps a montré l'existence d'un fort départ de particules lors de la première pluie, plus important à 20 mm/h qu'à 6 mm/h. L'absence d'évolution des quantités exportées au cours du temps à 20 mm/h semble montrer que les concentrations de particules perdues au cours des pluies suivantes sont sans doute faibles et du même ordre de grandeur que celles observées pour les expérimentations sur les colonnes de sol non perturbé.

Néanmoins, les quantités exportées dans l'expérimentation (L0/LQ) sont supérieures à celles exportées lors des expérimentations sur les colonnes de sol non perturbé, pour un même volume d'eau drainé.

4.2 Bilan de masse et extrapolation sur les temps de la pédogenèse

En utilisant des profils de Luvisols issus de la base de données Donesol pour lesquels le lessivage est potentiellement le processus majeur de différenciation du profil actuel (voir chapitre 1, tableau 1.7), nous avons calculé le temps nécessaire pour exporter les quantités perdues par l'horizon E, estimées par bilan de masse au chapitre 1 pour les 11 Luvisols

développés sur Loess identifiés au chapitre 1 (tableau 1.7). A partir de la figure 4.15 les taux d'exportation de particule 0-2 µm calculés ont été extrapolés dans le temps (tableau 4.4), ce qui nous a permis d'estimer la quantité d'eau drainée nécessaire, et donc le nombre d'années, pour exporter les quantités de particules perdues par les horizons E de ces 11 profils de sols, quantités estimées par bilan de masse au chapitre 1. Dans le tableau 4.4, nous présentons les résultats uniquement pour :

1. deux sols extrêmes, le sol 79320 dont les quantités estimées de particules perdues par l'horizon E sont faibles (3,1 à 4,0 g/cm²) et pour lequel la durée maximum du lessivage est de 8800 ans (chapitre 1 figure 1.10) et le sol 84745 pour lequel les quantités de particules perdues par l'horizon E sont les plus importantes (17,3 à 22,4 g/cm²), mais dont la durée de lessivage a été estimée à moins de 710 ans ;
2. les colonnes ayant un comportement extrême, c'est-à-dire celles qui exportent le plus (I pour 20 mm/h et AH pour 6 mm/h) et celles qui exportent le moins (H pour 20 mm/h et AJ pour 6 mm/h).

Le calcul a été effectué pour un drainage moyen annuel de 238 mm qui correspond à la pluie efficace annuelle moyenne sur les 3000 dernières années selon trois scenarii : i) la pluie est constituée uniquement par des orages (droites de régressions des colonnes H et I 20 mm/h), ii) la pluie est constituée par de la pluie fine (droite de régression des colonnes AH et AI 6 mm/h) et iii) la pluie est constituée de 4 orages par an (moyenne annuelle) puis de pluie fine, soit pour les colonnes H et AJ (colonnes qui exportent le moins) 4 orages de 12 mm par an (drainage moyen de la colonne H, figure 4.8) et 190 mm de pluie fine ; et pour les colonnes I et AH (colonnes qui exportent le plus) 4 orages de 22 mm par an (drainage moyen de la colonne I, figure 4.8) et 150 mm de pluie fine (tableau 4.4).

Nous faisons ici l'hypothèse que tous les autres paramètres restent inchangés, ce qui est peu réaliste, mais permet d'estimer un ordre de grandeur du temps nécessaire pour conduire à la création d'un horizon E de Luvisol par éluviation.

Sur la base des quantités de particules transitant dans les colonnes de sol non perturbées (expérimentation L1), les durées nécessaires pour perdre les quantités de particules éluviées par l'horizon E des différents profils de sol (quantités calculées par bilan de masse) sont compatibles avec les durées maximales possibles pour le lessivage pour ces différents profils (calculées sur la base des durées nécessaire pour la décarbonatation, voir chapitre 1) dans 64 à 91 % des cas selon le scénario climatique considéré (voir scenarii tableau 4.4). Les quantités de particules exportées dans les expérimentations sont donc compatibles avec un phénomène d'éluviation sur les temps pédologiques.

Néanmoins, selon le scenario climatique utilisé, les durées nécessaires pour perdre les quantités de particules estimées sur la base d'un bilan de masse dans les profils de sol de Donesol varient d'un facteur 1,5 à 4 (tableau 4.4). Pour autant, le scénario « tout orage » n'est pas réaliste. Par contre si l'on compare le scénario « tout pluie fine » avec un scénario comprenant 4 orages par an (ce qui correspond à peu près à ce qui se passe actuellement), on observe une diminution des temps nécessaires de 20 à 60 %. On voit ainsi que l'impact de ces événements extrêmes sur le processus d'éluviation n'est pas négligeable.

Tableau 4.4 : Nombre d'années climatiques nécessaire pour exporter la quantité de particules perdues par l'horizon E des sols 79320 et 84745 de la base de données DoneSol

Climat	Colonne	Doite de regression de la figure 4.15 (pour la 2ème phase de drainage)	Nombre d'années de drainage climatique necessaire pour exporter la quantité de particules (an)	
			Sol 79 320	Sol 84 745
Uniquement des orages	I	y = 0,29x + 70,98	443-571	2474-3204
	H	y = 0,22x + 20,82	592-764	3308-4283
Uniquement pluie fine	AH	y = 0,20x + 91,77	664-857	3714-4810
	AJ	y = 0,05x + 39,33	2474-3193	13819-17894
4 orages et le reste en pluie fine	I+AH	y = (0,29*22*4*n+70,98)+(0,20*150*n+91,77)	563-727	3153-4084
	H+AJ	y =(0,22*12*4*n+20,82)+(0,05*190*n+39,33)	1453-1876	8123-10519

4.3 Conclusion sur les quantités de particules perdues aux différentes échelles de temps

Dans le cas du sol non perturbé, L1, les quantités de particules perdues varient, selon les colonnes considérées, et pour un même volume d'eau drainé, d'un facteur 2 pour l'intensité 20 mm/h et d'un facteur 3 pour l'intensité 6 mm/h, les quantités exportées étant généralement plus importantes à 20 mm/h qu'à 6 mm/h.

Pour les expérimentations sur colonnes de sol remanié, L0/LQ, les quantités de particules exportées sont supérieures d'un facteur 2 à celles exportées lors des expérimentations sur les colonnes de sol non perturbé, toujours pour un même volume d'eau drainé.

Ainsi la structure et l'intensité de la pluie influencent notablement l'exportation de particules.

L'extrapolation sur les temps de la pédogenèse montre que les quantités de particules exportées dans les expérimentations sont compatibles avec un phénomène d'éluviation à cette échelle de temps, ainsi que l'impact non négligeable des événements extrêmes sur le processus d'éluviation.

V. Conclusion

Lors des premières pluies dans les deux expérimentations, on observe un « lavage » des colonnes, mis en évidence par de très fortes concentrations en particules éluviées. Suite à cela, les concentrations en particules sont inférieures à 0,65 g/L dans l'expérimentation sur sol non perturbé. Ces concentrations sont du même ordre de grandeur que celles obtenues par Kjaergaard et al. (2004b) et Jacobsen et al. (1997), avec une tendance à des concentrations légèrement supérieures dans notre cas par rapport aux sols de Kjaergaard et al. (2004b) qui sont moins favorables au lessivage. Néanmoins, compte tenu des différences de protocoles entre la littérature et cette étude et la grande variabilité de concentrations enregistrée entre les colonnes (d'un facteur 3), il est difficile de conclure plus sur l'impact de la nature du sol influant sur les concentrations de particules libérées en suspension.

Les particules libérées et transférées à la base des colonnes de sol ont une signature minéralogique très proche de celle de la fraction 0-2 µm du sol, sauf pour les premières pluies pour lesquelles on observe aussi une contribution non négligeable de la fraction 0-0,2 µm riche en smectites. Ainsi la sélectivité du processus d'éluviation en faveur des smectites ne semble exister qu'en début d'expérimentation, contrairement à ce qui est décrit dans la littérature (Mercier et al., 2000).

Deux fonctionnements hydrodynamiques ont été mis en évidence pour les colonnes de l'expérimentation L1 : un fonctionnement comprenant une part non négligeable d'écoulement préférentiel dans le cas de certaines colonnes à 20 mm/h et un écoulement majoritairement matriciel (comme pour les colonnes remaniées L0/LQ) dans le cas de la plupart des colonnes à 6 mm/h. A ces deux types de fonctionnement hydrodynamique correspondent deux modes de transferts des particules : une exportation liée au transfert préférentiel dans le premier cas, et une exportation en partie liée à la succion appliquée à la base des colonnes dans le second. L'importance de l'un par rapport à l'autre n'a pu être déterminée dans le cadre de ce travail, les concentrations enregistrées étant à peu près équivalentes dans les deux cas.

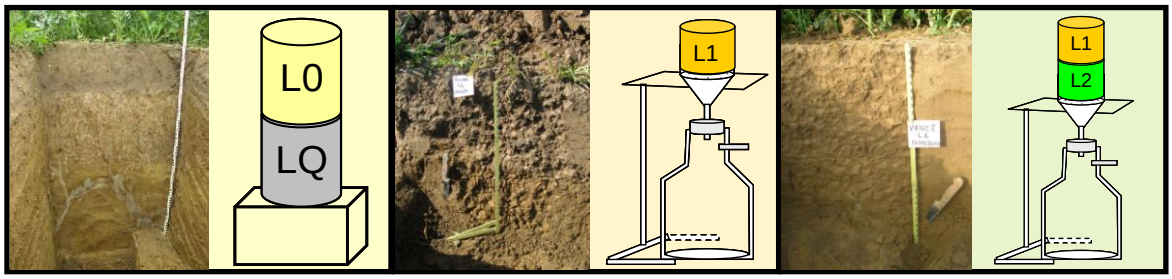
Par contre, aucune influence de la composition chimique de la solution du sol sur les concentrations de particules mises en suspension n'a pu être mise en évidence. Ainsi le rôle de la composition chimique des solutions sur la mise en suspension des particules semble être moins important que les processus physiques, au moins sur la durée des expérimentations réalisées ici et pour les colonnes considérées (nous reviendrons sur ce point au chapitre 5).

Par ailleurs, la structure influence notablement l'exportation de particules, notamment en ce qui concerne la structure perturbée. Or nous avons discuté en introduction de ce chapitre que les colonnes perturbées pouvaient être considérées comme un analogue des horizons labourés. Ainsi, le labour aurait tendance à augmenter le départ de particules par éluviation dans les sols. A notre connaissance, il n'y a pas de travaux dans la littérature permettant de confirmer cette hypothèse.

Nos travaux montrent aussi l'impact non négligeable des événements extrêmes sur le processus d'éluviation. Or dans le contexte de changement climatique actuel, les prédictions montrent que sous nos climats ces événements extrêmes devraient être de plus en plus nombreux à l'horizon 2100 (GIEC, 2007). Ainsi, le changement climatique devrait avoir tendance à augmenter la vitesse du processus de lessivage de même qu'il augmenterait le drainage (Montagne et Cornu, 2010).

Chapitre 5

Illuviation expérimentale



I. Introduction

Comme nous l'avons montré dans le chapitre 1, il n'existe pas à notre connaissance d'expérimentations permettant de mesurer le processus d'illuviation qui est principalement mis en évidence par l'existence, dans les sols, de revêtements d'argiles et de cutanes (Jamagne, 1973). Si quelques tentatives de quantification des revêtements d'argile existent dans la littérature (McKeague et al., 1980 ; Thompson et al., 1990 ; Gutiérrez-Castorena et al., 2007), leur origine multiple (lessivage, cycle d'humectations/dessications, néoformation) (Singh et al., 1998 ; Boixadera et al., 2003 ; Gutiérrez-Castorena et al., 2007) rend difficile leur attribution avec certitude au processus du lessivage et, de ce fait, la quantification de ce dernier sur cette base.

Par ailleurs l'étude du processus de fixation des particules dans les sols est généralement issue d'expérimentations où les particules sont apportées directement dispersées dans l'eau de pluie (Seta et Karathanasis, 1997 ; Saiers et Lenhart, 2003). Si ces expériences ont permis de mettre en évidence des processus physiques et physico-chimiques de fixation des particules (DeNovio et al., 2004), elles sont très éloignées de la réalité de terrain, à la fois par le mode d'apport mais également par les quantités de particules apportées au sol. Ces expérimentations ne permettent ainsi pas de conclure sur l'importance et la dynamique du processus d'illuviation.

Sur la base de cette analyse, nous avons conçu des expérimentations en colonnes non remaniées dans lesquelles deux horizons de sol sont superposés :

- un horizon supérieur pourvoyeur de particules, horizon d'éluviation,
- un horizon sous-jacent réceptacle, horizon d'illuviation.

Nous avons choisi comme horizon supérieur le même que celui utilisé dans les expérimentations d'éluviation (L1), afin de pouvoir éventuellement comparer les deux expérimentations sur l'hypothèse que les quantités de particules éluviées à la base de l'horizon L1 dans les expérimentations d'éluvation (L1 seul) pouvaient être considérées comme équivalentes aux quantités de particules issues de l'horizon L1 et entrant dans l'horizon L2 dans les expérimentations d'illuvation présentées ici (figure 5.1). Cette hypothèse repose sur le fait que le comportement hydrodynamique de l'horizon L1 des expérimentations d'éluviation est comparable au comportement hydrodynamique de ce même horizon L1 dans les expérimentations d'illuviation L1/L2. Nous vérifierons ce point au cours de ce chapitre.

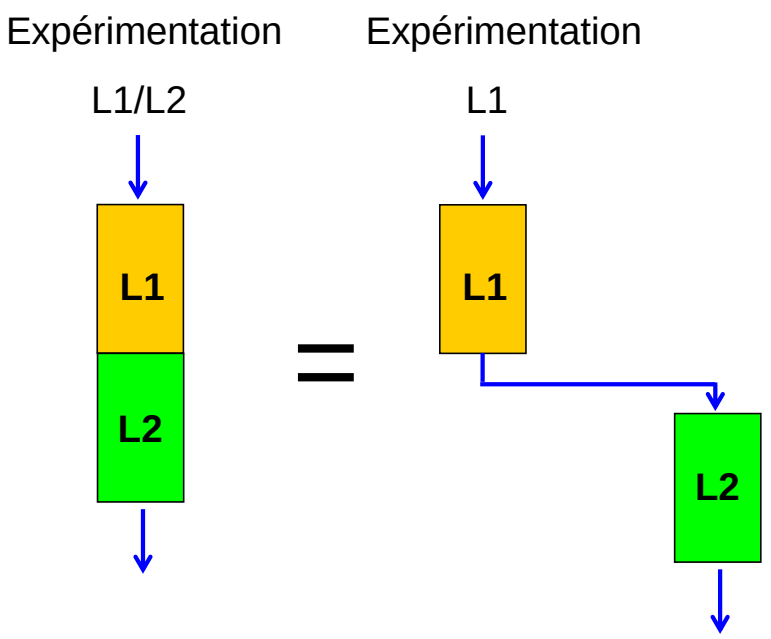


Figure 5.1 : Principe conceptuel du dispositif expérimental

Une fois cette hypothèse de comportement hydrodynamique équivalent validée, deux approches ont été conduites en parallèle pour estimer les quantités de particules ayant migrées :

1- une approche de bilan entrée-sortie à l'échelle des différents horizons des colonnes permettant de déterminer les quantités de particules accumulées et d'estimer l'importance relative des processus de filtration physique et physico-chimique dans cette accumulation ;

2- une analyse destructive des colonnes permettant de localiser les accumulations de particules au sein de l'horizon réceptacle.

Seule la première approche est présentée dans ce chapitre dans la mesure où aucune colonne n'a pu être arrêtée dans le temps imparti pour ce travail, au vu des faibles quantités de particules éluviées déterminées précédemment (chapitre 4).

Ce chapitre est donc organisé de la façon suivante :

- dans un premier temps, nous analyserons les quantités et les caractéristiques des particules qui arrivent à la base des colonnes expérimentales,
- puis, nous analyserons les particules qui migrent de l'horizon L1 vers l'horizon L2 et qui peuvent y être stockées,
- ensuite, nous extrapolerons ces résultats sur les temps de la pédogenèse,
- enfin, pour terminer, nous étudierons les mécanismes de l'illuviation.

II. Etude expérimentale de l'illuviation : caractérisation des particules qui migrent d'un horizon à l'autre

2.1- Concentration et nature des particules qui migrent à la base des colonnes L1/L2

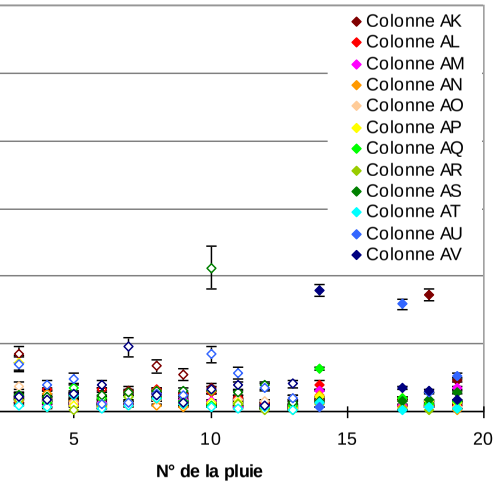
2.1.1 Concentration de particules qui migrent

Comme lors des expérimentations d'éluviation sur l'horizon L1 seul, chapitre 4, les concentrations en particules 0-2 µm sont plus importantes lors de la pluie 1 que lors des pluies suivantes pour les deux intensités de pluie (tableau 5.1 et figure 5.2). Ce phénomène est plus marqué pour l'intensité 20 mm/h comme nous l'avons déjà observé sur les expérimentations d'éluviation sur l'horizon L1 seul.

Tableau 5.1 : Valeurs moyenne, minium, maximum et modale des concentrations en particules collectées à la base des colonnes de l'expérimentation d'illuvation L1/L2 pour les deux intensités de pluie

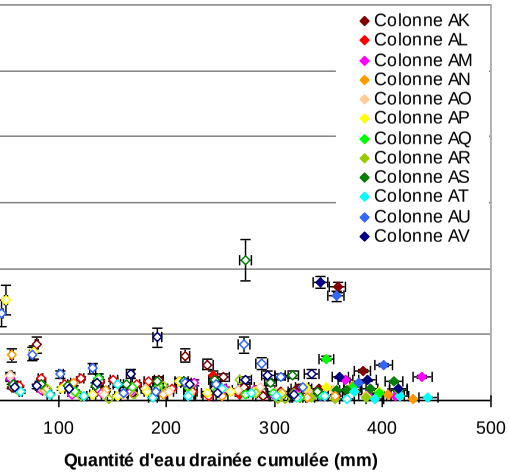
Colonne	Concentration (g/l)				
	1ère pluie	Moyenne[1]	Minimum	Maximum[1]	Modale
O	1,09	0,64 ± 0,57	0,05	1,99	0,49
AU	0,51	0,51 ± 0,43	0,06	1,58	0,39
AV	0,46	0,40 ± 0,42	0,09	1,78	0,30
AK	0,75	0,40 ± 0,41	0,08	1,72	0,21
AS	0,66	0,36 ± 0,47	0,14	2,12	0,25
W	4,62	0,28 ± 0,11	0,15	0,49	0,26
AP	2,64	0,26 ± 0,37	0,05	1,52	0,14
Q	0,19	0,25 ± 0,26	0,03	0,89	0,14
V	1,69	0,24 ± 0,21	0,06	0,96	0,18
T	0,96	0,24 ± 0,18	0,01	0,57	0,21
AL	1,13	0,23 ± 0,10	0,08	0,39	0,25
U	1,77	0,22 ± 0,18	0,07	0,80	0,17
N	2,05	0,22 ± 0,15	0,05	0,56	0,19
AQ	1,34	0,20 ± 0,14	0,04	0,63	0,20
S	0,52	0,17 ± 0,12	0,04	0,39	0,12
AN	0,77	0,16 ± 0,16	0,03	0,69	0,11
AO	0,93	0,16 ± 0,08	0,07	0,37	0,15
AM	1,15	0,16 ± 0,10	0,06	0,35	0,14
R	1,43	0,15 ± 0,10	0,03	0,37	0,12
P	4,67	0,14 ± 0,17	0,01	0,70	0,1
L	0,75	0,12 ± 0,05	0,03	0,21	0,11
AR	0,70	0,11 ± 0,09	0,02	0,31	0,10
AT	0,22	0,09 ± 0,06	0,02	0,24	0,07
M	0,34	0,07 ± 0,03	0,03	0,13	0,07

1- Calculé sans la première pluie



a)

c)



b)

d)

Figure 5.2 : Evolution temporelle de la concentration de particules de taille 0-2 µm mesurée à la base des colonnes de sol pour l'expérimentation L1/L2. Intensité 20 mm/h : a) en fonction du numéro de la pluie, b) en fonction du volume drainé en mm. Intensité 6 mm/h c) en fonction du numéro de la pluie, d) en fonction du volume drainé en mm. Les figurés vides représentent les concentrations estimées (voir chapitre 3) et les figurés pleins les concentrations mesurées

A part quelques points extrêmes, les concentrations en particules 0-2 µm pour les deux intensités sont inférieures à 1 g/L et, pour les pluies 2 à 19, ne sont pas significativement différentes entre les deux intensités.

Comme dans le cas des expérimentations d'éluvation sur l'horizon L1 seul, les concentrations sont assez différentes d'une colonne à l'autre (tableau 5.1 et figure 5.3). Sur la base des concentrations de particules , les colonnes peuvent être classées de la façon suivante (tableau 5.1):

- pour l'intensité 20 mm/h : M (concentration : 0,07 g/L) <L, P, R, S < N, U, T, V, Q, W < O (concentration 0,64 g/L).
- pour l'intensité 6 mm/h : AT (concentration : 0,09 g/L) < AR, AM, AO, AN < AQ, AL, AP, < AS, AK, AV < AU (concentration 0,51 g/L).

La différence entre les concentrations en particules les plus faibles et les plus fortes est d'un facteur 9 environ pour 20 mm/h et 6 pour 6 mm/h, soit une variabilité beaucoup plus importante que pour l'expérimentation d'éluvation sur l'horizon L1 seul. En effet, dans cette dernière expérimentation, les concentrations extrêmes étaient de 0,14 et 0,42 g/L, soit une gamme plus restreinte. Aucune colonne n'avait donné des concentrations aussi élevées, et respectivement aussi basses, que les deux groupes extrêmes de colonnes identifiés ici. Deux hypothèses peuvent être formulées pour expliquer cette plus grande variabilité dans les concentrations observées :

- soit on explore une plus grande partie de la variabilité naturelle de la structure de l'horizon L1, puisque les colonnes expérimentales sont plus nombreuses,
- soit cet effet est dû à la combinaison des deux horizons au sein des colonnes L1/L2.

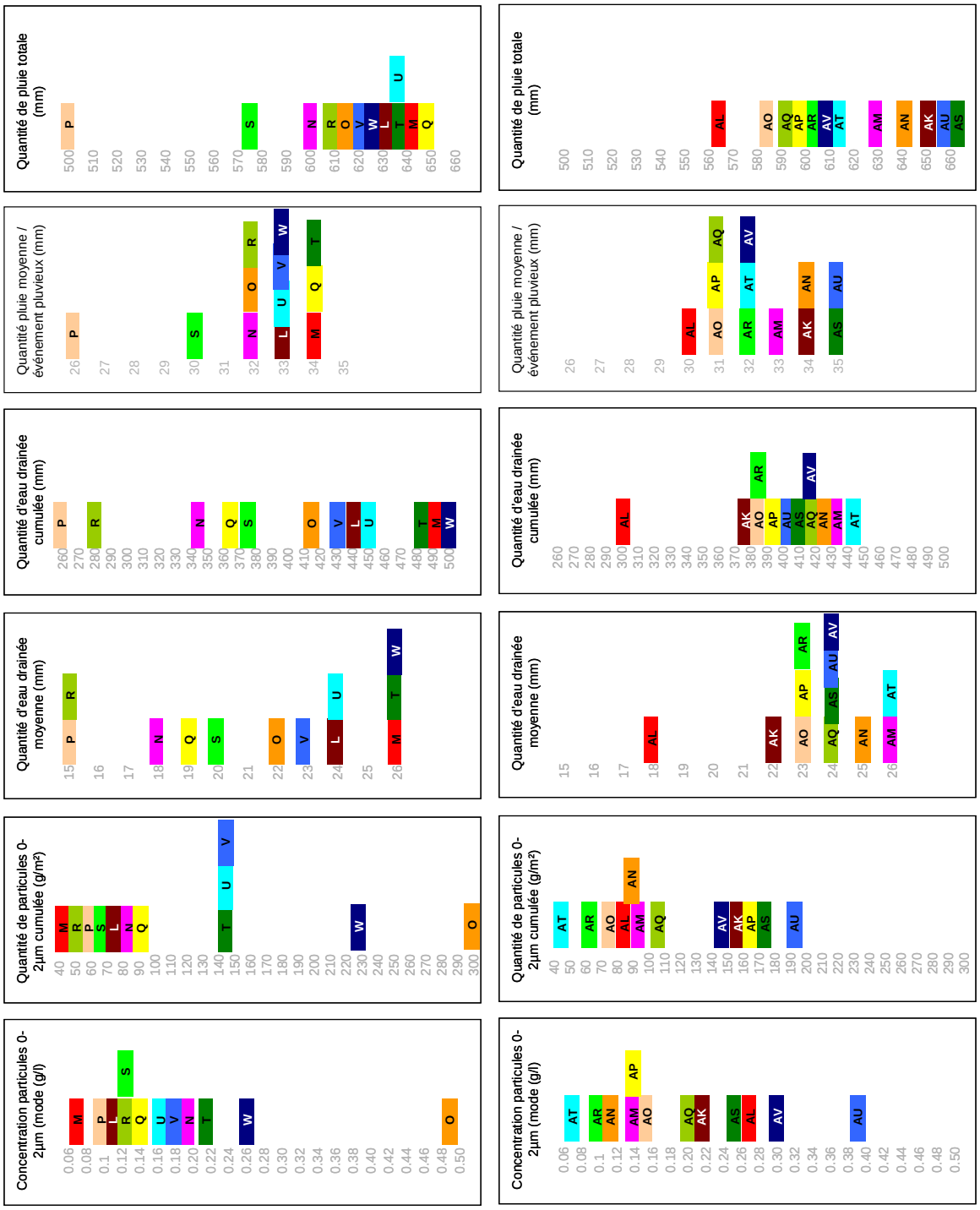


Figure 5.3 : Synthèse des résultats pour l'expérimentation sur les colonnes L1/L2

2.1.2 Nature minéralogique de particules migrées

Comme dans le cas de l'expérimentation d'éluvation sur l'horizon L1 seul, les particules en suspension collectées à la base des colonnes de L1/L2 se composent de smectite (pic en DRX à 12,5 Å en N[1] qui passe à 17 Å à l'EG[2]), illite (pics à 10 Å et à 4,98 Å), kaolinite (pics à 7,14 Å et à 3,57 Å) et quartz (pics à 4,25 Å et à 3,34 Å) (figure 5.4[3]). On observe, en outre, un pic à 14 Å en N et en EG sur les diffractogrammes des particules collectées à la base des colonnes L1/L2 pour certaines des pluies. Ce pic de chlorite est caractéristique de la fraction 0-2 µm du L2 (figure 5.4).

Ainsi, en première approximation, les particules collectées à la base du L1/L2 renferment des smectites originaires du L1. Celles-ci n'ont pas été fixées dans le L2 malgré les propriétés favorables de cet horizon à la fixation des particules en suspension (pH notamment, Duchaufour, 1956).

De façon à quantifier la contribution des smectites du L1 aux particules collectées à la base des colonnes au cours du temps, nous avons traité les diffractogrammes obtenus sur les lames orientées glycolées des particules collectées au cours des différentes pluies par MCR-ALS, en considérant les fractions 0-2 µm et 0-0,2 µm du L1 et 0-2 µm du L2 comme des pôles purs et les particules collectées à la base des colonnes pour les différentes pluies comme résultant d'un mélange entre ces trois pôles purs (figure 5.5[4]).

[1] N correspond au traitement normal saturé Na dans notre cas.
[2] EG correspond au traitement éthylène glycol.
[3] Pour les pluies 1, 2-5, 6 et 15 les cortèges minéralogiques des suspensions drainées à la base des colonnes ont été déterminés au DRX pour les traitements N et EG et comparés aux 0-2 µm du L1 et L2 bruts (figure 5.4). Pour la pluie 15, l'analyse a été réalisée sur les particules des deux colonnes ayant les concentrations les plus faibles (M+P pour 20 mm/h et AT+AL pour 6 mm/h) et celles ayant les concentrations les plus fortes (Q+T pour 20 mm/h et AU+AK pour 6 mm/h).
[4] En dessous d'une contribution inférieure à 0,2, les résultats sont de l'ordre du bruit de fond et ne sont donc pas représentés sur les graphiques.

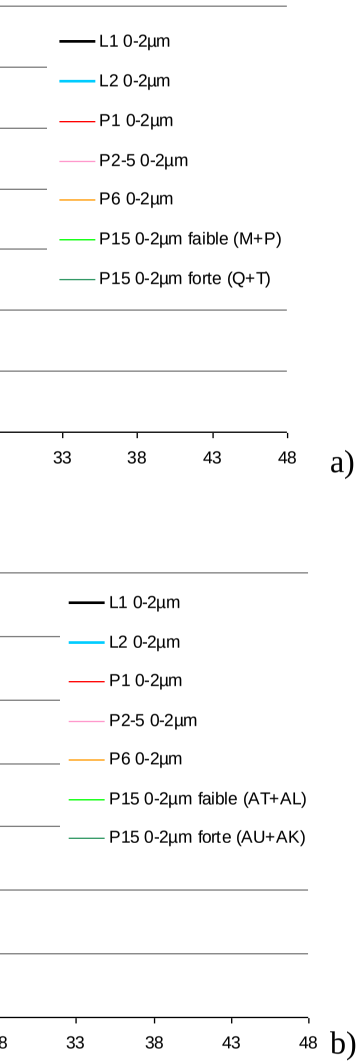


Figure 5.4 : Cortège minéralogique pour les traitements N (à gauche) et EG (à droite) de la fraction 0-2 µm des pluies 1, 2-5, 6 et 15 de a) l'intensité 20 mm/h et b) l'intensité 6 mm/h et de la fraction 0-2 µm du L1 et L2 bruts

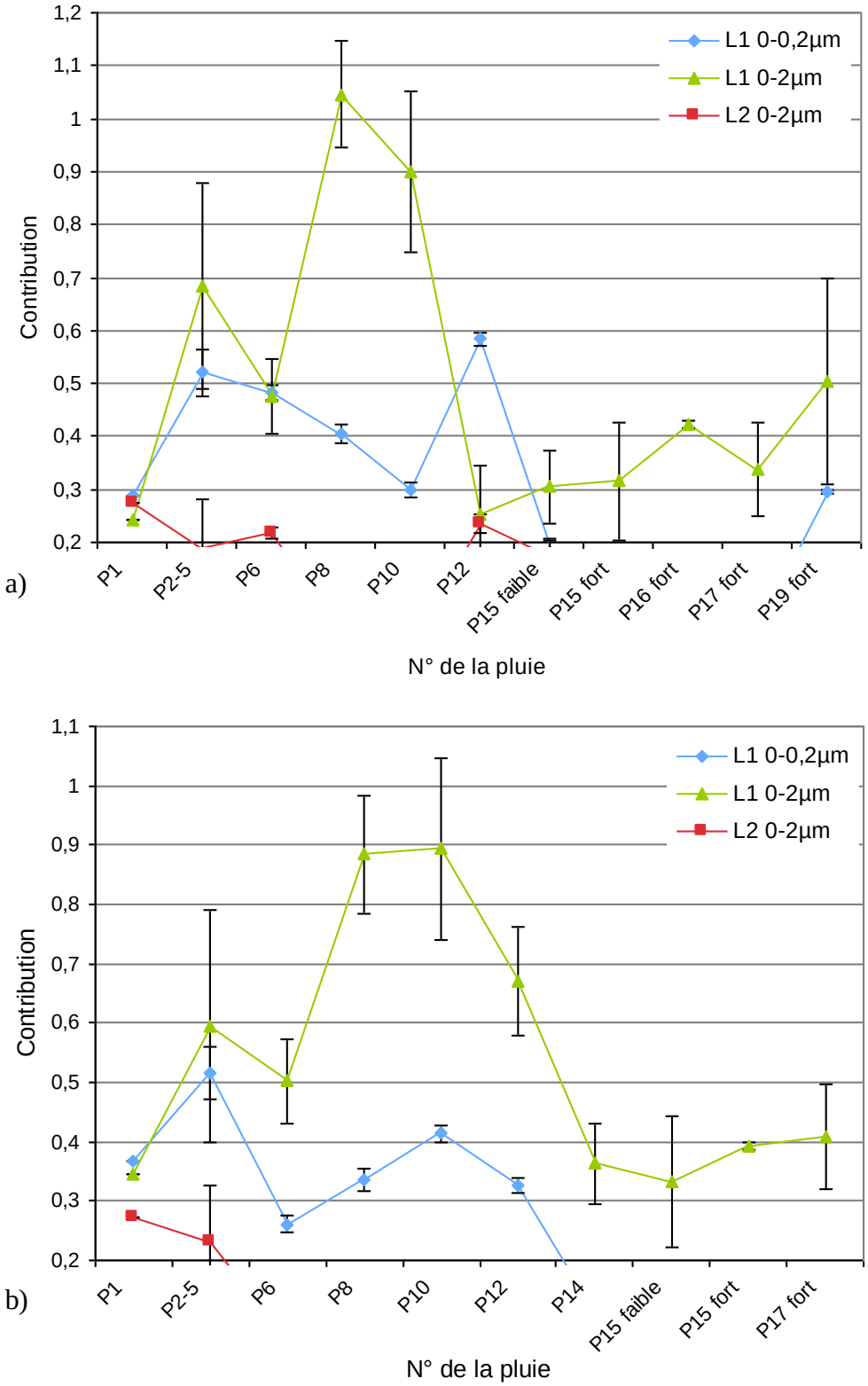


Figure 5.5 : Contribution des fractions 0-0,2 µm L1, 0-2 µm L1 et 0-2 µm L2 dans chaque suspension collectée à la base des colonnes L1/L2 pour les pluies de a) l'intensité 20 mm/h et b) l'intensité 6 mm/h. Ces contributions ont été obtenues par traitement MCR-ALS des diffractogrammes des rayons X des lames orientées glycolées

A part pour la première pluie, la fraction 0-2 µm de l'horizon L1 a la plus forte contribution aux mélanges de particules collectées à la base des colonnes L1/L2. La contribution de la fraction 0-2 µm de l'horizon L2 est relativement faible et n'est observée que pour les premières pluies (1 à 6). Enfin la fraction 0-0,2 µm de l'horizon L1 est présente en quantité non négligeable jusqu'à la pluie 12. Ainsi, la signature minéralogique des particules collectées à la base des colonnes L1/L2 lors de cette expérimentation d'illuvation est très proche de celle collectée à la base de l'horizon L1 lors de l'expérimentation d'éluviation, avec même une contribution de la fraction 0-0,2 µm de l'horizon L1 dans l'expérimentation d'illuviation légèrement supérieure à celle de l'expérimentation d'illuviation (disparition de cette contribution après la pluie 5 dans le cas du L1 6 mm/h par exemple figure 4.4). La contribution de la fraction 0-2 µm de l'horizon L2 reste assez limitée, ce qui est cohérent avec ses caractéristiques physico-chimiques qui le rendent effectivement peu propice à la dispersion. Il semble par contre qu'il ne soit pas complètement favorable au piégeage des particules issues de l'horizon L1, dont au moins une partie migre sur toute la hauteur de la colonne.

2.2- Quantité de particules fixées dans la colonne

Comme évoqué en introduction, les quantités de particules fixées dans l'horizon L2 ont été estimées sur la base d'une approche de bilan entrée-sortie pour chaque horizon des colonnes L1/L2 (figure 5.1). Celle-ci repose sur l'hypothèse que les quantités de particules sorties des expérimentations d'éluvation sur l'horizon L1 peuvent être considérées comme équivalentes à l'entrée de particules dans l'horizon L2 de l'expérimentation d'illuviation L1/L2. Ceci nécessite au préalable de vérifier que l'horizon L1 de l'expérimentation L1/L2 fonctionne de manière similaire à l'horizon L1 de l'expérimentation d'éluviation. Nous allons vérifier ce point en comparant le fonctionnement hydrodynamique des horizons L1 en analysant, d'une part, l'évolution de leurs potentiels matriciels au cours des pluies (condition à la limite inférieure) et, d'autre part, les conditions initiales et les quantités d'eau percolant dans les différentes colonnes.

2.2.1 Comparaison des comportements hydrodynamiques pour les expérimentations d'éluviation et d'illuviation

2.2.1.1 Comparaison des conditions à la limite inférieure

Pour comparer les fonctionnements hydrodynamiques de l'horizon L1 dans les expérimentations d'éluviation et d'illuviation, nous avons comparé les conditions à la limite inférieure. Pour cela nous avons utilisé la valeur du tensiomètre situé à 20 cm de profondeur dans l'horizon L2 de l'expérimentation d'illuviation (même si, rigoureusement, cette donnée n'est pas la valeur du potentiel à la base de l'horizon L1), et la valeur de la dépression appliquée artificiellement à la base de la colonne L1 dans l'expérimentation d'éluviation (respectivement colonnes N et K pour 20 mm/h et colonnes AK et AJ pour 6 mm/h). Dans l'expérimentation L1, on applique artificiellement à la base de la colonne une depression de 30 hPa pendant au maximum 80 h (toutes pluies confondues) (figure 5.6). Dans le cas de l'expérimentation L1/L2, la dépression est d'environ 15 hPa pendant 200 à 500 h, selon la pluie, puis augmente jusqu'à 30 hPa vers la fin de la période de séchage. La principale différence est due à la conception de l'expérimentation qui est à l'origine de temps de pompage relativement court et qui s'arrêtent brusquement quand il n'y a plus d'eau en surface, pour la colonne L1, tandis que l'horizon L2 applique un potentiel pendant toute la durée de l'expérimentation dans les colonnes L1/L2. Néanmoins, les différences de potentiel restent très faibles, de l'ordre de 10 à 15 hPa. On peut simplement rappeler les travaux de Sharma et al. (2008), qui montrent qu'une quantité de particules plus importante est libérée en condition de drainage libre. Notre hypothèse sur un fonctionnement similaire des deux horizons L1 dans les deux expérimentations est probablement un peu discutable. En l'absence d'autres éléments, nous considérerons cependant qu'elle est valide, tout en gardant à l'esprit que la quantité de particules qui arrivent au sommet de l'horizon L2 est vraisemblablement légèrement surestimée.

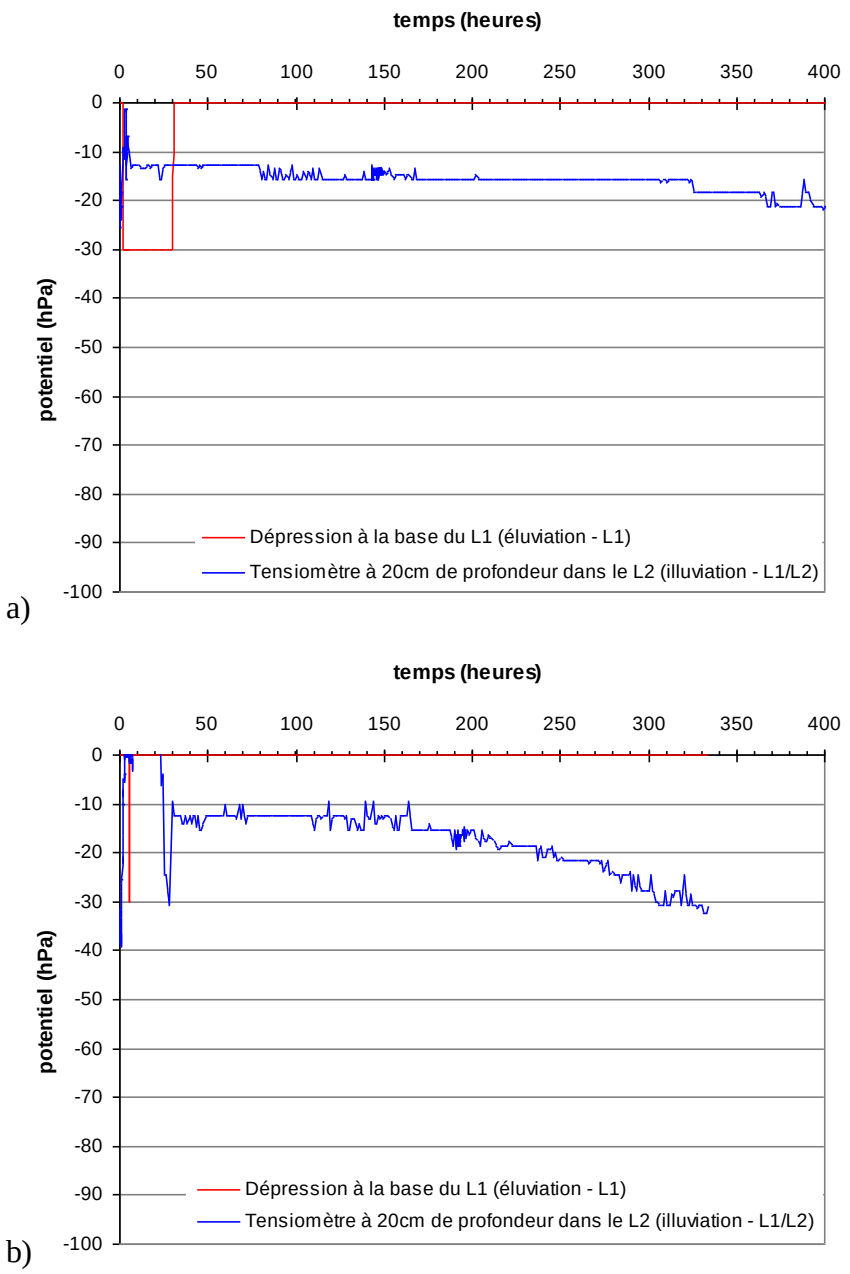


Figure 5.6 : Comparaison de la dépression appliquée à la base du L1 de l'expérimentation éluviation et du potentiel matriciel mesuré par tensiomètre à 20 cm de profondeur dans le L2 de l'expérimentation illuviation. Exemple de la pluie 8 pour a) l'intensité 20 mm/h et b) l'intensité 6 mm/h

2.2.1.2 Comparaison des conditions initiales

Pour comparer les comportements hydrodynamiques des deux expérimentations, nous avons, analysé les valeurs des deux tensiomètres situés à 5 et 10 cm de profondeur dans les cylindres L1 instrumentés avant le début de chaque pluie.

La différence moyenne de potentiel matriciel entre les deux expérimentations est pour 5 cm de profondeur de l'ordre de 8 hPa pour 20 mm/h et 4 hPa pour 6 mm/h et pour 10 cm de profondeur de l'ordre de 130 hPa pour l'intensité 20 mm/h et 80 hPa pour l'intensité 6 mm/h (figure 5.7).

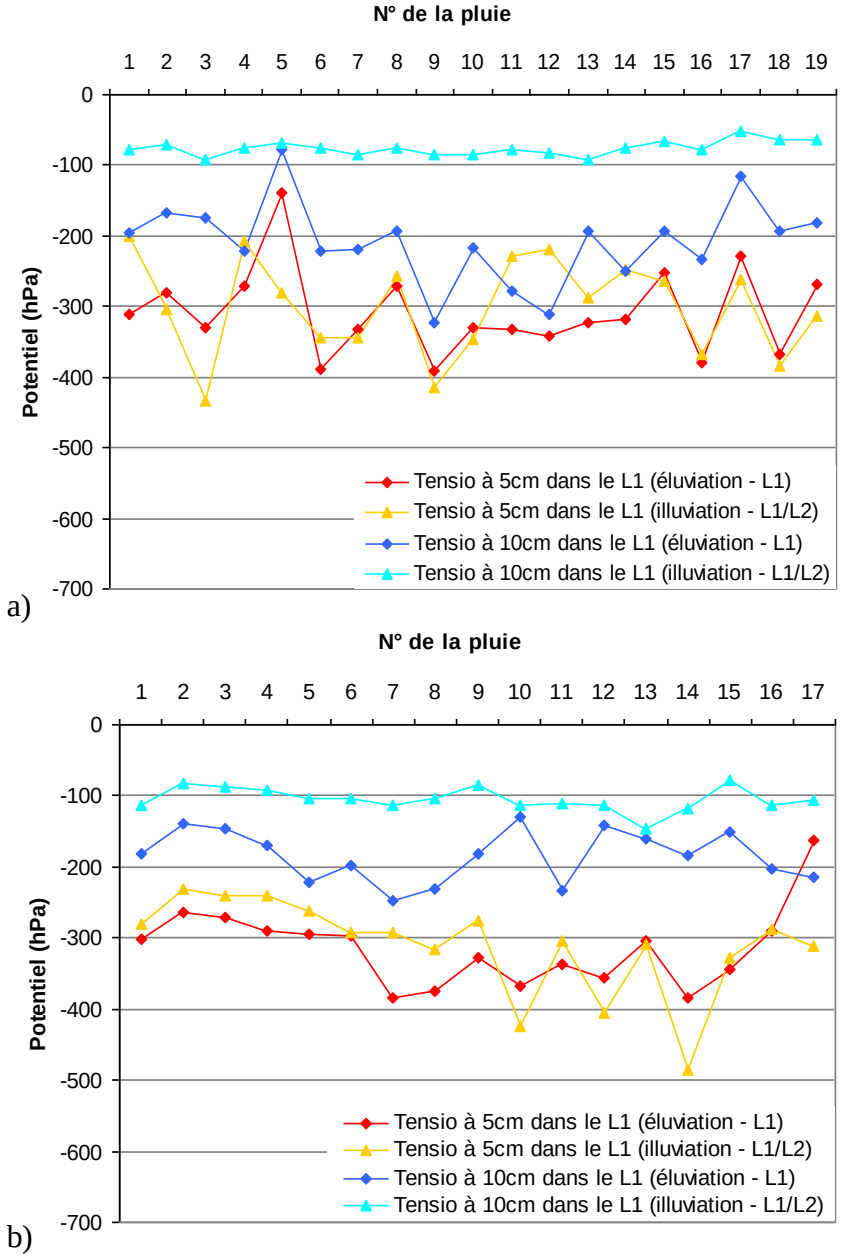


Figure 5.7 : Evolution des potentiels matriciels à 5 et 10 cm de profondeur dans le L1 de l'expérimentation éluviation (L1) et dans le L1 de l'expérimentation illuviation (L1/L2). a) Intensité 20 mm/h et b) Intensité 6 mm/h

La condition initiale à 5 cm de profondeur dans les colonnes est quasiment identique pour les expérimentations L1 et L1/L2. Les différences sont un plus marquées à 10 cm de profondeur

surtout pour l'intensité 20 mm/h. A 10 cm de profondeur le potentiel matriciel est systématiquement moins élevé pour la colonne L1/L2. Il semble donc que la dynamique de drainage entre les deux types de colonnes soit un peu différente, avec pour conséquence un horizon L1 plus humide dans le cas des colonnes L1/L2 par rapport aux colonnes L1 seules.

2.2.1.3 Comparaison des quantités d'eau drainée

L'analyse des quantités d'eau drainée pour l'intensité 20mm/h, des colonnes L1/L2, montre que 5 groupes de colonnes se distinguent avec des comportements différents (figure 5.8) : les colonnes M, T et W drainent 78 % de l'eau reçue (de l'ordre de 500 mm); les colonnes L, O, U et V 70 % (440 mm); les colonnes N et S 64 % (375 mm) ; les colonnes P et Q environ 55 % (260-360 mm) et la colonne R 46 % (280 mm). Ce dernier drainage est 1,7 fois moins important que pour les colonnes qui drainent le plus. Les colonnes Q et R, qui drainent le moins, sont également celles pour lesquelles les énergies de pompages sont les plus fortes (voir chapitre 2, figure 2.13), ce qui n'est par contre pas le cas de la colonne P.

Pour l'intensité 6 mm/h, l'ensemble des colonnes (à l'exception de la colonne AL) présente une dynamique de drainage assez homogène jusqu'à la pluie 13 (figure 5.8); suite à l'incident de la pluie 14, les colonnes se différencient légèrement. La colonne AL se distingue des autres colonnes avec une quantité d'eau de pluie reçue plus faible et une quantité d'eau drainée plus faible également (300 mm pour la colonne AL et plus de 380 mm pour les autres colonnes). Pour cette colonne, le drainage représente 54 % de l'eau reçue alors que pour les autres colonnes il varie entre 58 et 73 %. On n'observe pas de lien direct entre la quantité d'eau drainée et l'énergie de pompage.

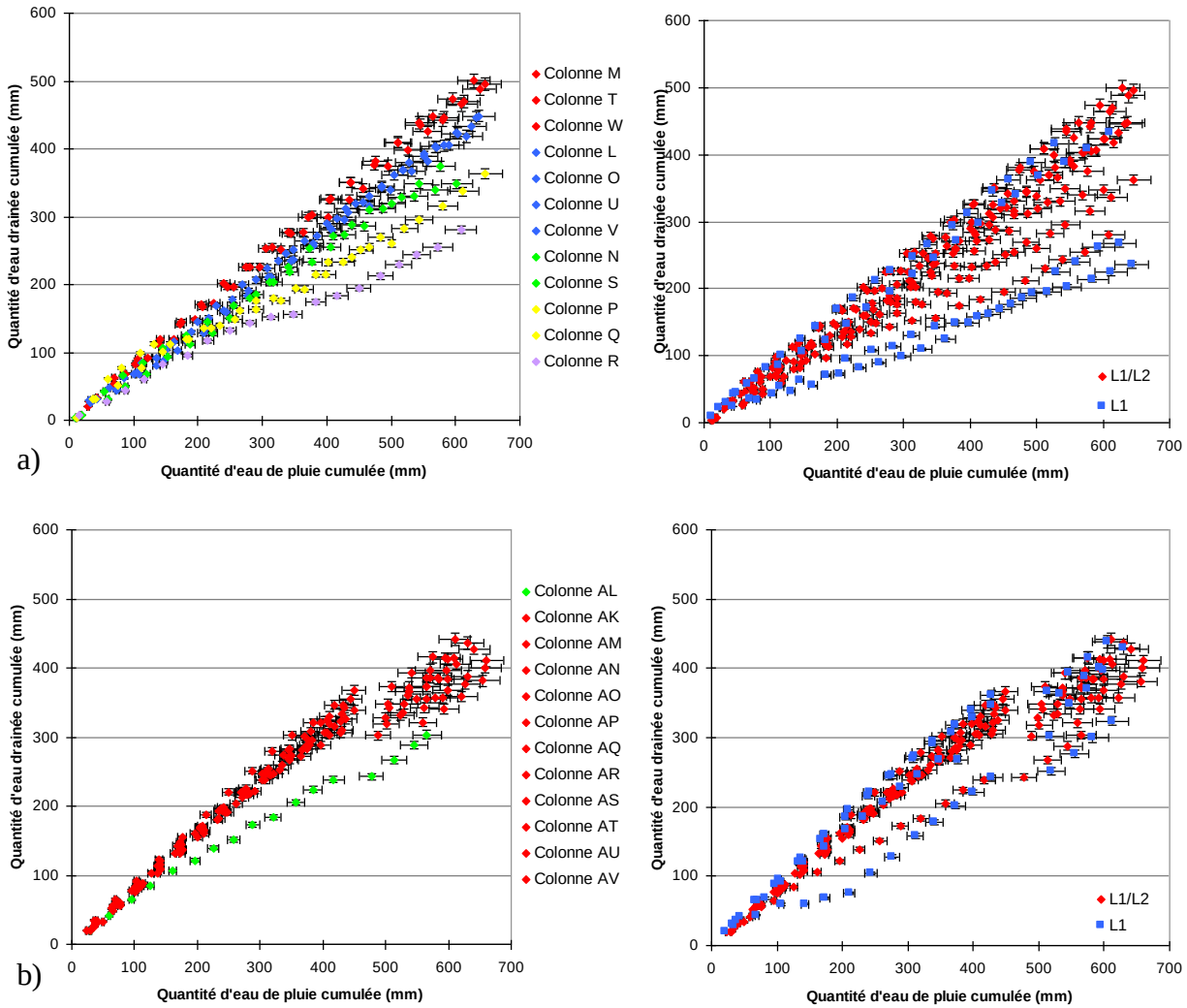


Figure 5.8 : Quantités d'eau drainée cumulée en fonction des quantités d'eau de pluie reçues cumulées pour a) l'intensité 20 mm/h et b) l'intensité 6 mm/h. A gauche pour les colonnes L1/L2 et à droite pour les colonnes L1/L2 et les colonnes de L1 seul

On peut rapprocher les dynamiques de drainage des colonnes L1/L2 de l'expérimentation d'illuviation de celles des colonnes L1 de l'expérimentation d'éluviation de la façon suivante (figures 5.5 et figure 4.7) :

Pour l'intensité 20mm/h, les colonnes M, T, W et L, O, U (expérimentation d'illuviation) qui sont les deux groupes de colonnes qui drainent le plus, ont une dynamique proche des colonnes I et K (expérimentation d'éluviation). La colonne qui draine le moins (R) a un comportement proche des colonnes H et J. Les autres colonnes de l'expérimentation d'illuviation ont un comportement intermédiaire.

Pour l'intensité 6 mm/h, l'ensemble des colonnes de l'expérimentation d'illuviation, exceptée la colonne AL, ont le même comportement que les colonnes AG, AI et AJ de

l'expérimentation L1. La colonne AL, différente des autres colonnes L1/L2, est quant à elle, très similaire à la colonne AH de l'expérimentation L1.

Pour les deux intensités de pluie, il est donc possible d'apparier des comportements de dynamique de drainage entre les expérimentations d'éluviation et les expérimentations d'illuviation (figure 5.9). En conséquence, nous utiliserons les quantités de particules mesurées à la base de l'horizon L1 dans les expérimentations d'éluviation comme flux d'entrée de l'horizon L2 dans les colonnes L1/L2 pour les groupes ayant la même dynamique de drainage.

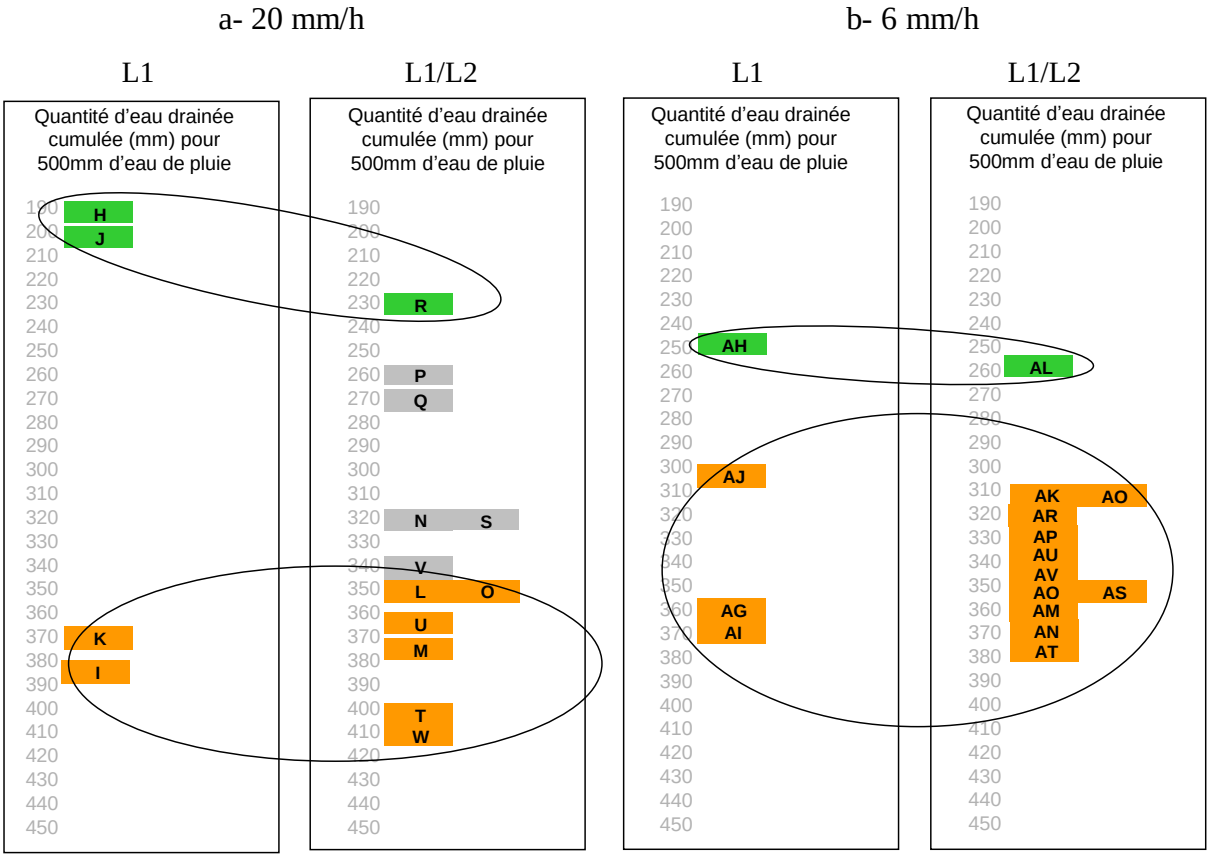


Figure 5.9 : Groupes de colonnes L1 et L1/L2 avec des dynamiques de drainage similaires pour une quantité d'eau reçue de 500 mm. a) intensité 20 mm/h et b) intensité 6 mm/h

2.2.2 Quantités de particules exportées à la base des colonnes L1/L2, comparaison avec les quantités exportées dans l'expérimentation L1 et conclusion sur la fixation des particules dans le L2

Les quantités d'eau drainées étant comparables entre les deux expérimentations L1 et L1/L2, nous avons ensuite comparé les quantités de particules exportées de ces deux expérimentations pour déterminer si l'exportation à la base du L1 est supérieure ou inférieure

à l'exportation à la base du L1/L2. Cette comparaison permet de déterminer s'il y a ou non fixation de particules du L1 dans le L2.

2.2.2.1 Quantités de particules exportées à la base du L1/L2.

Les quantités cumulées de particules 0-2 µm exportées à la base des colonnes L1/L2 sont très variables d'une colonne à l'autre pour 20 mm/h, ce qui est moins vrai pour 6 mm/h (figure 5.10).

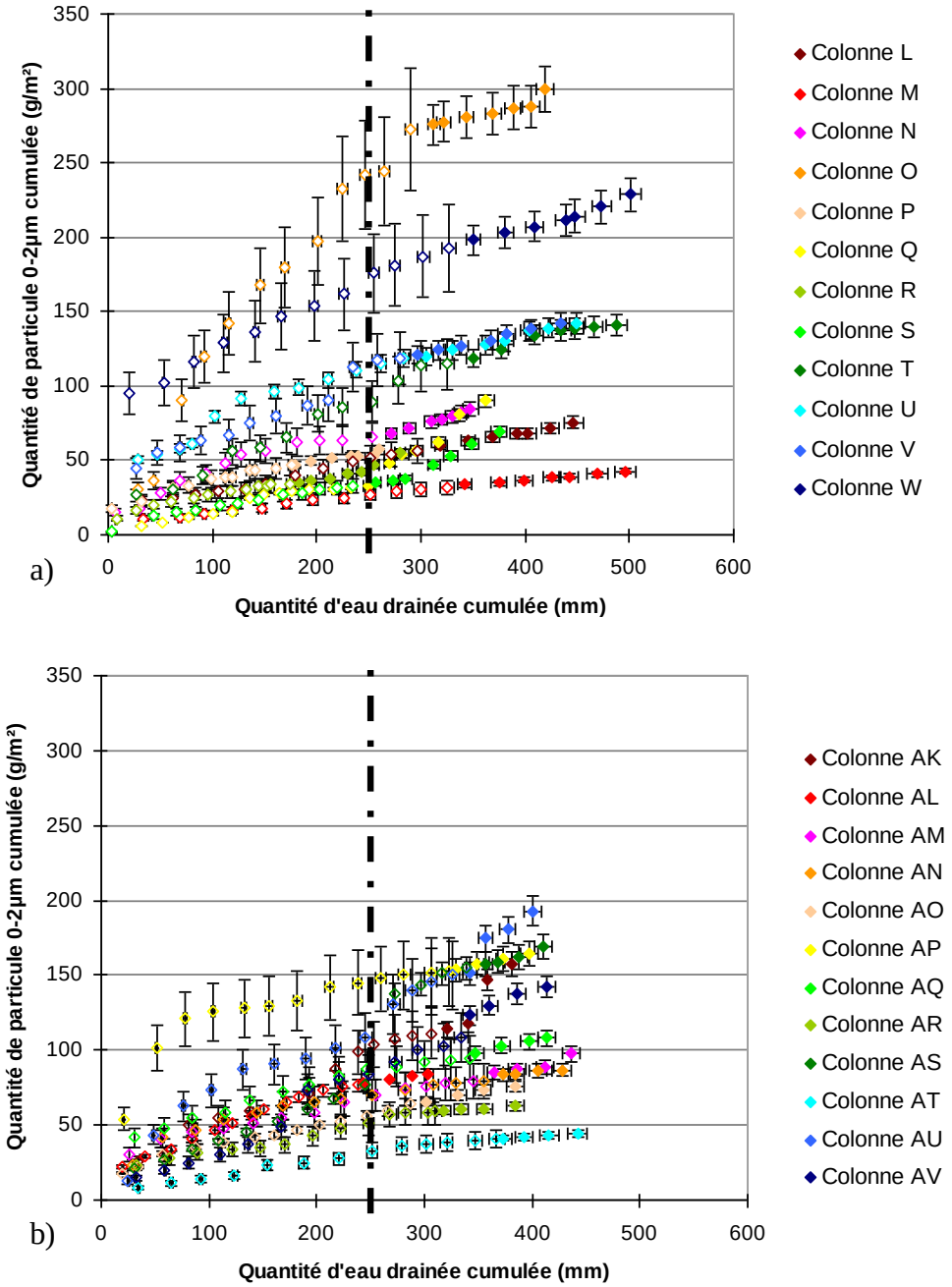


Figure 5.10 : Quantités de particules 0-2 µm cumulées en fonction des quantités d'eau drainée cumulées pour chaque colonne L1/L2. a) Intensité 20 mm/h ; b) Intensité 6 mm/h. Les symboles vides représentent les concentrations estimées et les symboles pleins les concentrations mesurées

Les quantités d'eau drainée étant assez variables d'une colonne à l'autre (figure 5.8 et 5.9), nous avons comparé les exportations cumulées de particules entre les colonnes pour une quantité d'eau drainée commune, 250 mm. Cinq groupes de colonnes se distinguent : les colonnes O et W dont les exportations sont supérieures à 170 g/m^2 de particules ; les colonnes U, V, AP, AU et AK dont les exportations sont comprises entre 100 et 150 g/m² de particules ; les colonnes L, N, P, T, AQ, AV, AL, AM, AN, AR, AS et AO dont les exportations sont comprises entre 50 et 90 g/m^2 ; et les colonnes M, Q, R, S et AT dont les exportations sont inférieures à 50 g/m^2.

2.2.2.2 Comparaison des quantités de particules entre L1 et L1/L2.

Nous avons identifié précédemment des colonnes L1 et L1/L2 dont le comportement en termes de drainage était proche et sur cette base nous avons apparié les colonnes des deux expérimentations entre elles (figure 5.9 et tableau 5.2). Nous comparons ici les quantités de particules exportées lors de ces deux types d'expérimentations pour ces différents appariements.

Tableau 5.2 : Exportation de particules à la base des colonnes L1/L2 et des colonnes L1 ayant un comportement comparable, pour 250 mm de drainage et quantités de particules fixées dans le L2 déduites de ces exportations

Groupe	Colonne L1/L2	Exportation en g/m² après 250mm de drainage des colonnes L1/L2	Colonne de L1 comparable en terme de drainage	Exportation en g/m² des colonnes L1 après 250mm de drainage	Fixation en g/m²
1	T	90	I et K	108 ou 150	20 ou 60
	L	52	I et K	108 ou 150	56 ou 98
	R	47	H et J	73 ou 76	26 ou 29
	M	27	I et K	108 ou 150	81 ou 123
	AL	78	AH	135	57
2	O	242	I et K	108 ou 150	-
	W	176	I et K	108 ou 150	-
	AP	148	AG, AI, AJ	29 à 71	-
	AU	109	AG, AI, AJ	29 à 71	-
	AK	104	AG, AI, AJ	29 à 71	-
	AQ	87	AG, AI, AJ	29 à 71	-
	AV	84	AG, AI, AJ	29 à 71	-
	AS	77	AG, AI, AJ	29 à 71	-
3	U	115	I et K	108 ou 150	-
	AM	70	AG, AI, AJ	29 à 71	-
	AN	70	AG, AI, AJ	29 à 71	-
	AO	56	AG, AI, AJ	29 à 71	-
	AR	51	AG, AI, AJ	29 à 71	-
	AT	33	AG, AI, AJ	29 à 71	-
4	V	118	-	-	-
	N	65	-	-	-
	P	53	-	-	-
	S	35	-	-	-
	Q	33	-	-	-

Pour l'intensité 20 mm/h, nous identifions quatre groupes de comportement (figure 5.11 et tableau 5.2) :

1. Des colonnes pour lesquelles les exportations à la base de la colonne L1/L2 sont inférieures à l'apport estimé au sommet de l'horizon L2 : c'est le cas, par exemple, des colonnes T, et M (figure 5.11). Dans ce cas il y a un stockage de particules fines au sein du L2, avec des quantités stockées allant de 20 à 123 g/m^2 selon la colonne considérée (tableau 5.2).
2. Des colonnes pour lesquelles les exportations à la base de la colonne L1/L2 sont supérieures à l'apport estimé au sommet de l'horizon L2 : c'est le cas, par exemple, des colonne O et W (figure 5.11). Dans ce cas, l'horizon L1 de la colonne L1/L2 lors de l'expérimentation d'illuviation a probablement libéré plus de particules que le l'horizon L1 seul lors de l'expérimentation d'éluviation. Ce défaut d'estimation de la quantité de particules libérées à la base de l'horizon L1 est compris entre 26 à 134 g/m^2.
3. Des colonnes L1/L2 pour lesquelles les exportations à la base des colonnes L1/L2 sont du même ordre de grandeur que l'apport estimé au sommet de l'horizon L2 sur la base d'une ou de plusieurs colonnes L1 dont la dynamique de drainage est proche (cas de la colonne U dont on rapproche le comportement des colonnes I et K, figure 5.11). Pour ces colonnes aucune fixation ne peut être mise en évidence.
4. Des colonnes de L1/L2 pour lesquelles il n'a pas été possible d'apparier une colonne L1 de l'expérimentation d'éluviation sur la base de la dynamique de drainage (colonnes V, N, P, S et Q). Pour ces colonnes, dans la plupart des cas, les exportations enregistrées à la base du L2 sont du même ordre de grandeur ou inférieures à l'apport estimé au sommet de l'horizon L2. Néanmoins, pour ces colonnes on se rapproche, au mieux, de la dynamique de drainage des colonnes I et K, ce qui laisse supposer qu'il y aurait une fixation de particules au sein de l'horizon L2.

Pour l'intensité 6 mm/h, on n'observe pas la quatrième famille de comportement, mais les trois premiers comportements sont observés (tableau 5.2).

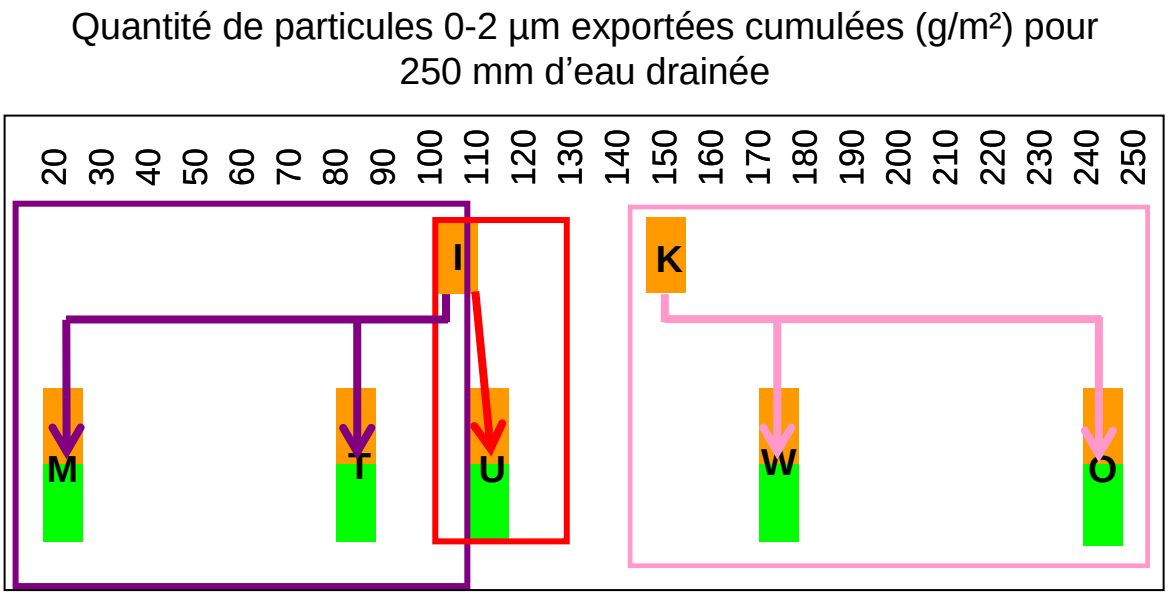


Figure 5.11 : Exemple, pour l'intensité 20 mm/h, des différents comportement rencontrés par rapport à l'exportation de particules à la base des colonnes L1/L2 et des colonnes L1 et ce pour 250 mm de drainage

De l'analyse précédente nous retenons que l'expérimentation d'éluviation basée seulement sur 4 colonnes de sol non perturbé, ne permet pas de capturer toute la variabilité de l'expérimentation d'illuviation, constituée de 12 cylindres d'horizon L1 surmontant 12 cylindres d'horizon L2. Certains cylindres L1 de l'expérimentation d'illuviation L1/L2 exportent vraisemblablement plus que les colonnes L1 de l'expérimentation d'éluviation dont nous disposons. Néanmoins, nous avons montré que, dans un certain nombre de cas, les quantités de particules recueillies à la base des colonnes L1/L2 sont inférieures à celles qui entrent dans les colonnes L2. Des fixations de particules dans l'horizon L2 sont donc probables, avec des quantités fixées qui représentent 20 à 80 % des particules éluviées selon les cas.

L'analyse proposée pour mettre en évidence ces fixations au sein du L2 est la diffraction des rayons X qui permet, comme nous l'avons vu au chapitre 2, une quantification de la proportion de particules 0-2 µm de l'horizon L1 contenues dans la fraction 0-2 µm de l'horizon L2, dès lors que cette proportion excède 2 %. Sur la base des taux de fixation des particules dans le L2 et des taux de mobilisation de particules dans le L1 (chapitre 4, figure 4.14), nous avons estimé le drainage qui serait nécessaire pour obtenir ce seuil de 2 % et le nombre d'événements pluvieux auquel il correspond (tableau 5.3). Cette estimation montre qu'il faudrait poursuivre l'expérimentation encore au moins 5 ans dans le cas le plus favorable pour commencer à pouvoir quantifier la fixation. Il est donc indispensable d'envisager une

autre approche pour quantifier une telle fixation. Une piste serait la réalisation de lames minces au sein de l'horizon L2 après l'arrêt de l'expérimentation sur la colonne L1/L2. Une analyse en microscopie permettrait d'identifier et de quantifier les cutanes et revêtements d'argile ; une analyse en micro-diffraction des rayons X permettrait de déterminer la nature des argiles présentes dans ces revêtements. Une autre piste serait de suivre des évolutions en tomographie des rayons X de la macroporosité entre le début et la fin de l'expérimentation. Dans ce cas, on serait amené à faire l'hypothèse que les dépôts ont lieu dans une porosité de grande taille (plus de 300 µm). Ces deux approches sont donc complémentaires.

Tableau 5.3 : Drainage nécessaire et nombre d'événements pluvieux associés pour observer une fixation de 2 % de particules 0-2µm de l'horizon L1 dans la fraction 0-2 µm de l'horizon L2

Colonne de L1 seul	Fraction des particules libérées du L1 fixées dans le L2 (%)	Quantité d'eau drainée nécessaire (mm)	Quantité d'eau drainée moyenne par évènement pluvieux (mm)	Nombre d'évènements pluvieux	Durée des expérimentations en considérant une pluie toutes les deux semaines (ans)
H	20	21246	12	1771	68
	80	5240	12	437	17
I	20	15889	22	722	28
	80	3786	22	172	7
J	20	11146	14	796	31
	80	2773	14	198	8
K	20	12019	23	523	20
	80	2884	23	125	5
AG	20	17526	25	701	27
	80	4128	25	165	6
AH	20	14867	19	782	30
	80	3383	19	178	7
AI	20	34308	26	1320	51
	80	8191	26	315	12
AJ	20	81944	25	3278	126
	80	19917	25	797	31

2.3- Extrapolation sur les temps de la pédogenèse

A notre connaissance, il n'y a pas d'information dans la littérature sur le taux de fixation, dans les horizons d'accumulation des sols, des particules mises en suspensions dans les horizons plus superficiels. Les expérimentations conduites dans ce travail fournissent une fourchette de 20 à 80 % de fixation. Cette fourchette bien que très large représente un premier pas qu'il sera nécessaire d'affiner ultérieurement.

Pour établir des bilans de masse à l'échelle de profils de Luvisols, nous avions fait l'hypothèse, dans le chapitre 1 que 100 % des particules libérées par l'horizon E étaient fixées

dans l'horizon BT. Si nous reprenons ces calculs au vu des résultats obtenus dans ce chapitre, nous voyons qu'il n'y a pas de grande différence entre le nombre de Luvisols développés principalement par le processus de lessivage si l'on considère 100 ou 80 % de fixation (tableau 5.4). Ce nombre décroit par contre significativement si on considère le taux de fixation de 20 %. En revanche, le changement de taux de fixation n'influence pas trop le nombre de profils de Luvisols pour lequel le temps de formation du BT est compatible avec la durée maximale possible du lessivage (tableau 5.5).

Tableau 5.4 : Processus majeur de la formation des profils des 1163[1] Luvisols de la base de données Donesols développés sur un seul matériau parental

	100%	80%	20%
Lessivage possible (%)	3-21	3-21	2-12
Autres processus (%)	13-79	13-79	13-88
- Lutum C ≥ lutum BT (%)	9-57	9-57	9-58
- Eluviation (%)	2-12	2-10	0-1
- Erosion > 50cm (%)	1-6	1-8	4-24
- Lutum A/E > lutum C (%)	1-4	1-4	1-4

[1] Ce nombre de profils a été obtenu en considérant un seuil de 30% dans l'approche du squelette granulométrique utilisé dans le chapitre 1 (tableau 1.2).

Tableau 5.5 : Durée nécessaire pour former par lessivage l'horizon BT de Luvisols développés sur Loess selon le taux de fixation dans le BT des particules mise en suspension dans l'horizon E. Comparaison avec la durée maximale possible pour le lessivage pour ces sols (en gras le temps de formation du BT est compatible avec la durée maximale possible du lessivage, en italique le temps de formation du BT est incompatible avec la durée maximale possible du lessivage)

N° profil[1]	Gain en particules fines du BT (g/cm²)[2]	Taux de fixation des particules migrantes dans le BT (%)	Temps pour former le BT (ans)[3]	Durée maximale possible pour le lessivage (ans)[4]
21213	**9,1**	**100** **80**	**1657-4272** **2072-5340**	**5231**
21524	**4,2**	**100** **80**	**763-1970** **955-2463**	**7393**
68547	**16,7**	**100** **80**	**3044-7842** **3805-9803**	**8344**
78873	**3,1**	**100** **80**	**563-1453** **704-1817**	**6868**
79320	**2,5**	**100** **80**	**453-1171** **567-1465**	**8833**
85771	7,9	100 80	1438-3708 1799-4636	3856
94264	**4,8**	**100** **80**	**873-2252** **1092-2816**	**9061**
99807	*8,7*	*80* *20*	*1981-5105* *7933-20430*	*4286*
102572	12,8	100 80	2332-6010 2916-7513	4918
73336	**4,1**	**100** **80**	**745-1923** **932-2404**	**6322**
79348	**2,6**	**100** **80**	**471-1218** **590-1524**	**4673**
80354	**3,7**	**80** **20**	**841-2170** **3372-8687**	**9398**
84745	*13,6*	*100* *80*	*2478-6385* *3098-7982*	*710*
21278	3,1	20	2825-7278	6273
57620	**0,3**	**20**	**271-702**	**9709**
34438	**1,1**	**20**	**1000-2581**	**4942**
68537	**2,3**	**20**	**2095-5399**	**7651**
80157	**5,5**	**20**	**5014-12915**	**8932**

1- Profils de Luvisols développés sur Loess pour lesquels le lessivage peut être considéré comme le processus majeur de la formation du sol sur la base de l'approche de bilan de masse décrite au chapitre 1, et pour le taux de fixation reporté dans la colonne ad hoc.

2- calculé par bilan de masse selon l'approche décrite au chapitre 1.

3- calculé en considérant une pluie efficace annuelle de 238 mm constituée de 4 orages et de pluie fine. Les valeurs minimales et maximales sont obtenues en considérant les relations quantité de particules exportées en fonction du drainage établies au chapitre 4 pour les colonnes qui perdent le moins et le plus de particules respectivement.

4- établie sur la base de l'âge des læss et de la durée nécessaire pour la décarbonatation de celui-ci comme expliqué au chapitre 1.

III. Les mécanismes de l'illuviation

Comme nous l'avons vu au chapitre 1, l'illuviation est gouvernée principalement par deux processus : un processus physique de filtration des particules par la matrice du sol (Wan et Tokunaga, 1997) et un processus physico-chimique de fixation des particules. La filtration physique a lieu lorsque les particules sont plus grandes que la taille des pores (McGechan, 2002) et dépend donc de la géométrie porale du milieu et de son évolution temporelle. La fixation physico-chimique, quant à elle, dépend des caractéristiques des particules, des interfaces et de la chimie de la solution du sol (DeNovio et al., 2004; Kretzschmar et al., 1997; Vinten et Nye, 1985).

Dans ce qui suit, nous avons analysé d'une part la nature des écoulements et leur évolution temporelle pour mettre en évidence d'éventuels phénomènes de fixation physique et d'autre part la composition de la solution du sol pour discuter des phénomènes de fixation physico-chimique.

3.1- Mise en évidence du processus physique de filtration

3.1.1. Fonctionnement hydrodynamique des colonnes

Pour discuter du fonctionnement hydrodynamique des colonnes L1/L2, nous avons analysé la dynamique du drainage pendant la phase de pluie et pendant la phase de ressuyage : nous avons analysé spécifiquement la quantité d'eau qui est drainée durant la pluie.

L'analyse du fonctionnement hydrique des différentes colonnes L1/L2 au cours du temps met en évidence trois principaux groupes de fonctionnement hydrique (figure 5.12).

1. Des colonnes pour lesquelles le drainage pendant la pluie est important au cours des premières pluies, puis disparaît alors que les énergies de pompage augmentent (M, O, Q, S, T, AK, AL, AQ et AR,) (figure 5.12a). Ce groupe peut être subdivisé sur la base i) du drainage pendant la pluie et ii) de l'énergie de pompage. On classe ainsi les colonnes selon trois classes : un drainage pendant la pluie supérieur à 70 % du drainage total (colonnes O et T), un drainage pendant la pluie intermédiaire, autour de 30 à 70 % du drainage total (colonnes AQ et AR), et un drainage pendant la pluie plutôt faible, inférieur à

20 % du drainage total (colonnes M, Q, S, AK et AL). On observe des énergies de pompage en fin d'expérimentation supérieures à 10000 hPa*h pour les colonnes Q, S, et O, comprises entre 2000 et 8000 hPa*h pour les colonnes T, AK, AR et inférieures à 2000 hPa*h pour les colonnes AL, AK et AR.

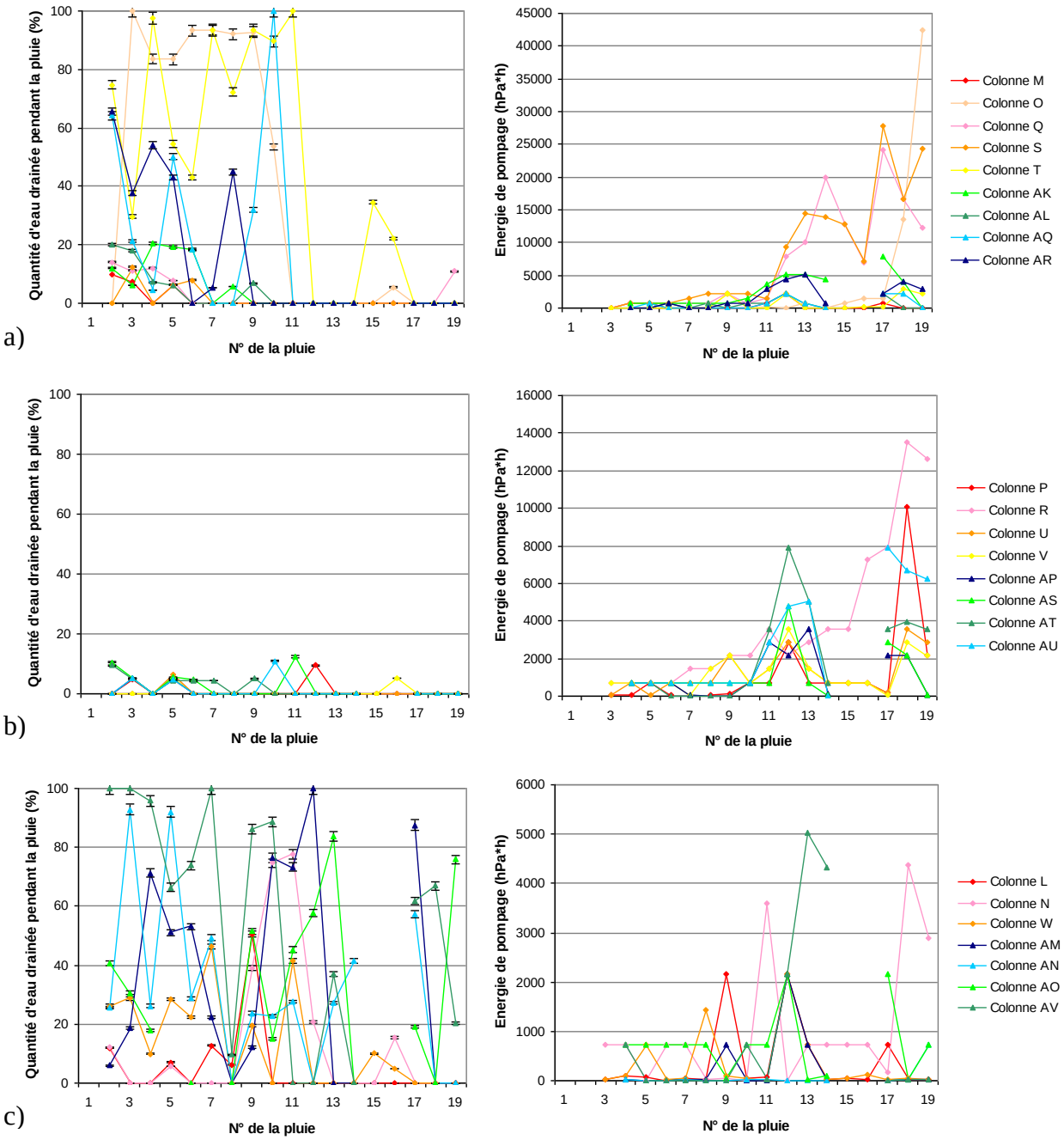


Figure 5.12 : Evolution du drainage pendant la pluie et des énergies de pompage au cours des 19 événements pluvieux

2. Des colonnes dont l'écoulement pendant la pluie est très faible et pour lesquelles les énergies de pompages augmentent avec le temps pour atteindre soit des énergies de pompage importantes, de 8000 à 13500 hPa*h (colonnes P, R, AT et AU), soit des énergies plus faibles, inférieures à 4800 hPa*h (les colonnes U, V, AP, et AS) (figure 5.12b).
3. Des colonnes qui drainent relativement bien pendant la pluie tout au long de l'expérimentation sans évolution temporelle nette et pour lesquelles les énergies de pompage restent relativement limitées (L, N, W, AM, AN, AO, et AV) (figure 5.12c).

Ainsi les colonnes des deux premiers groupes caractérisées soit par une baisse du pouvoir percolant au cours du temps, soit part une augmentation de l'énergie de pompage à la base de la colonne, soit la combinaison des deux, présentent les traits fonctionnels d'un colmatage de la structure. Pour ces colonnes, il semble donc bien avoir une fixation de particules au sein du L2, même si celle-ci n'a pu être quantifiée que pour 3 des colonnes de ce groupe. Par contre, le troisième groupe, pour qui une fixation n'a pu être établie que pour la colonne L, ne présente apparemment pas de symptôme de colmatage au vu de l'évolution du fonctionnement hydrodynamique au cours du temps.

3.1.2. Impact sur les concentrations en particules

L'analyse de l'évolution des concentrations en particules au cours des pluies successives met en évidence trois types de fonctionnements (figure 5.13):

1. des colonnes pour lesquelles des concentrations en particules élevées sont obtenues lorsque des pics de drainage sont observés durant la phase de pluie (O, T, U, AN, AU et AV) (figure 5.13a);
2. des colonnes pour lesquelles les concentrations en particules augmentent avec les énergies de pompage, notamment à partir de la pluie 15 (Q, R, S, AU) (figure 5.13b);
3. des colonnes pour lesquelles les fortes concentrations en particules ne sont liées à aucun des deux fonctionnements précédents (L, M, N, P, V, W, AK, AL, AM, AO, AQ, AP, AS, AT, AR) (figure 5.13c).

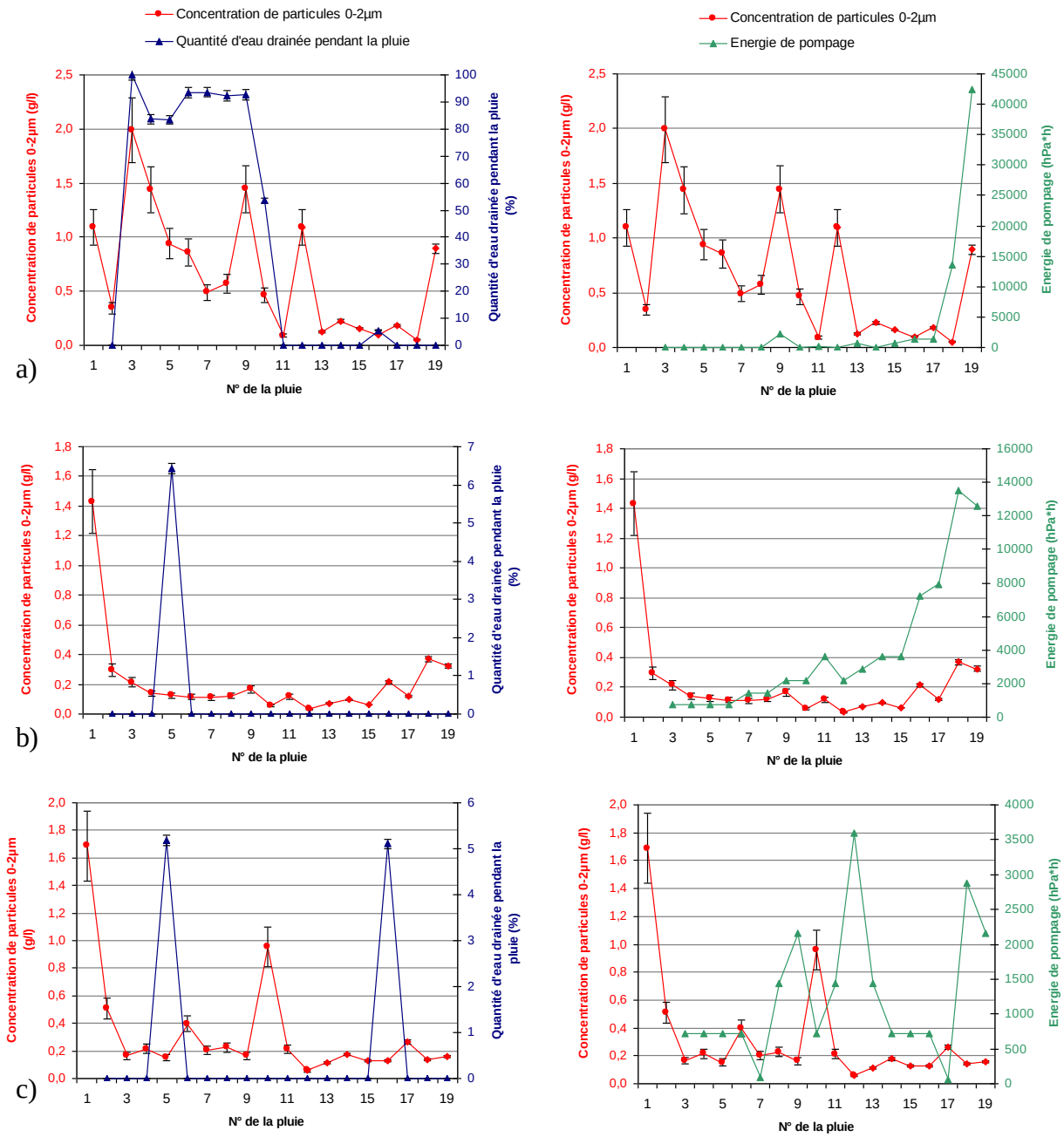


Figure 5.13 : Relation entre concentration de particules perdues à la base des colonnes, pourcentage de drainage pendant la pluie et énergie de pompage. Un exemple par famille de fonctionnement est présenté. a) colonne O ; b) Colonne R ; c) Colonne V

Alors que le premier et le dernier type d'évolution se retrouvent dans tous les groupes de fonctionnement hydrique identifiés précédemment, le lien entre énergie de pompage et concentration ne se rencontre que pour des colonnes présentant des symptômes de colmatage.

Le cas de la colonne O, qui présente des concentrations en particules particulièrement élevées, est à ce titre tout à fait intéressant (figure 5.13a). Lors des forts drainages en début d'expérimentation (jusqu'à la pluie 9), les concentrations de particules mesurées à la sortie de

cette colonne sont élevées, elles diminuent suite à la diminution du drainage pendant la pluie pour devenir très faibles et n'augmenter à nouveau qu'en fin d'expérience lorsque de plus fortes énergies de pompages sont appliquées à la base de la colonne. Ce comportement est cohérent avec un processus de colmatage de la colonne.

3.2- Mise en évidence de processus physico-chimiques de fixation

La composition chimique de la solution de l'horizon L1 des colonnes L1/L2[1] est assez proche de celle du L1 seul tant en terme de concentrations que en terme d'évolution de ces concentrations au cours du temps (figure 5.14). Une différence notable est néanmoins observable pour la bougie localisée à 5 cm dans l'horizon L1 de la colonne O de l'expérimentation L1/L2 : des concentrations en Ca^{2+} et en Mg^{2+} relativement élevées sont observées autour de 4,5 volumes poraux drainés. Celles-ci peuvent être attribuées à l'échange, à la surface des particules du sol, du Ca^{2+} présent dans la CEC. Un tel échange devrait avoir un effet de défloculation sur les particules. Effectivement, la colonne O de l'expérimentation L1/L2 est la colonne qui perd le plus de particules, particules originaires du L1 comme le montre leur composition minéralogique. En outre, le pic de concentrations en Ca^{2+} et en Mg^{2+} s'accompagne d'une remontée des concentrations en particules collectées à la base de cette colonne (figure 5.15).

[1] Nous n'avons pas collecté d'eau dans la bougie 20 cm du L2 à 20 mm/h et les bougies du L1 à 6 mm/h (figures 5.14 et 5.16).

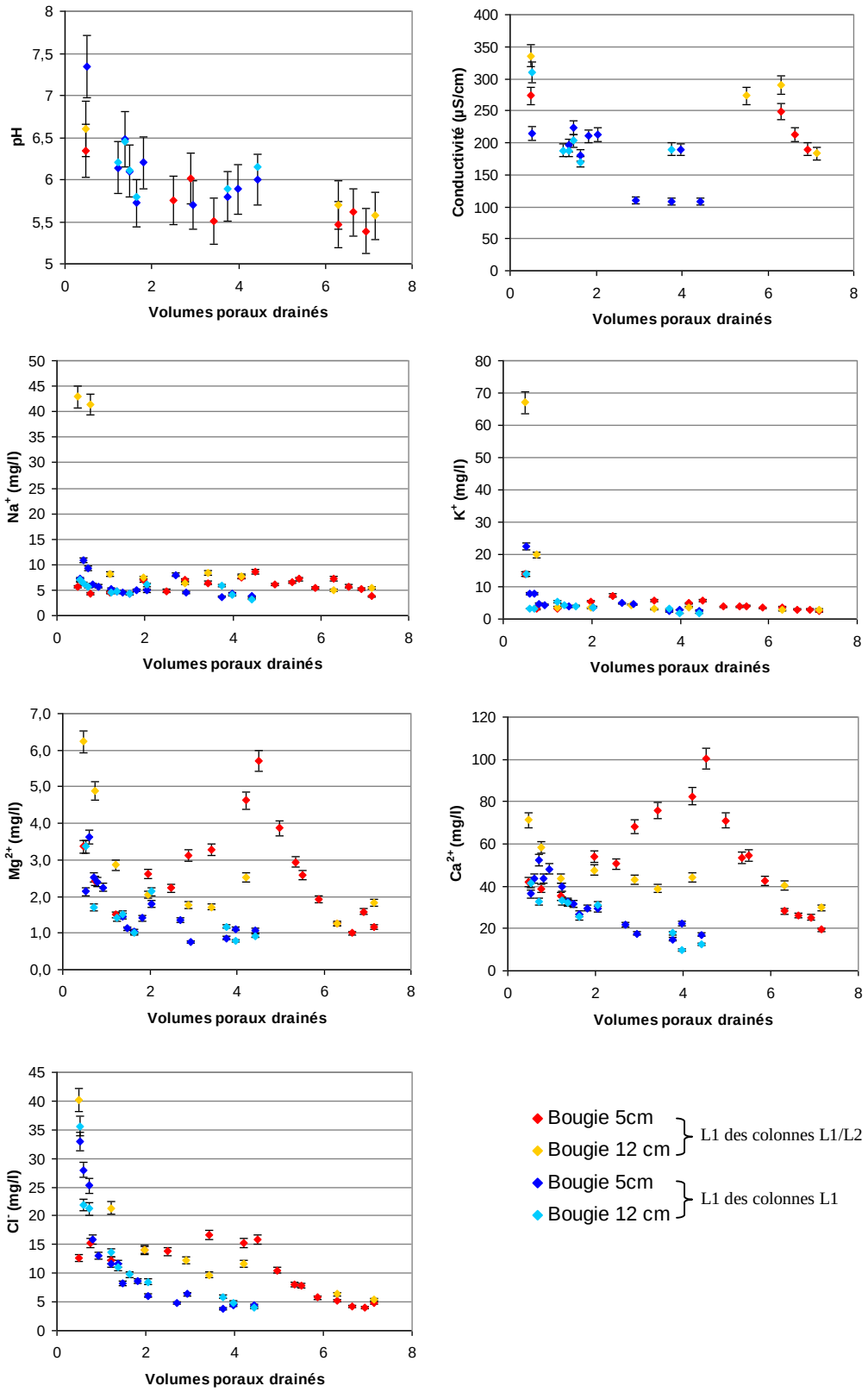


Figure 5.14 : pH, conductivité, Na^+, K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+} et Cl^- de l'eau des bougies poreuses situées à 5 cm et 12 cm dans le L1 de la colonne L1 et de la colonne L1/L2 pour l'intensité à 20 mm/h. La zone grisée représente la gamme de composition[1] de l'eau de pluie (eau osmosée)

[1] Moyenne ± écart-type

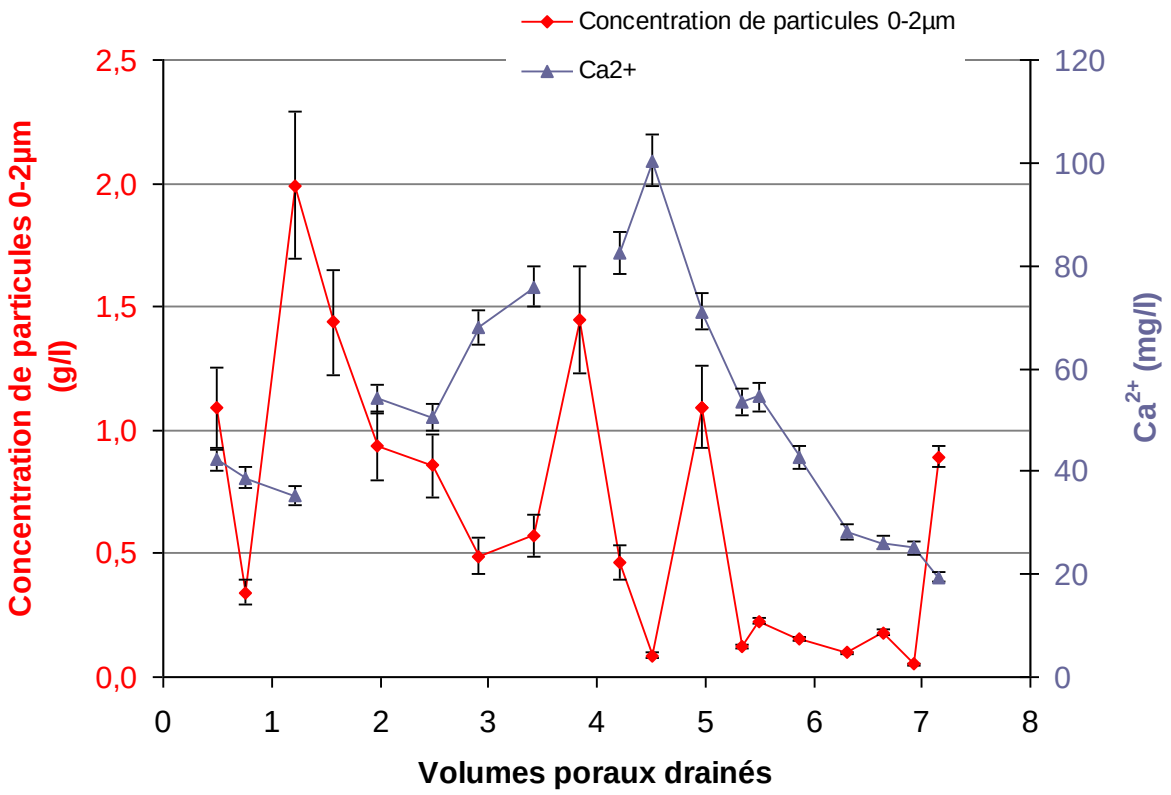


Figure 5.15 : Concentration en calcium dans la solution du sol de l'horizon L1 de la colonne O et concentrations en particules collectées à la base de cette colonne. Evolution au cours du temps

Le pH de l'horizon L2 est significativement supérieur à celui de la solution du sol de l'horizon L1, au moins lors des 4 premiers volumes poraux drainés (figure 5.16).

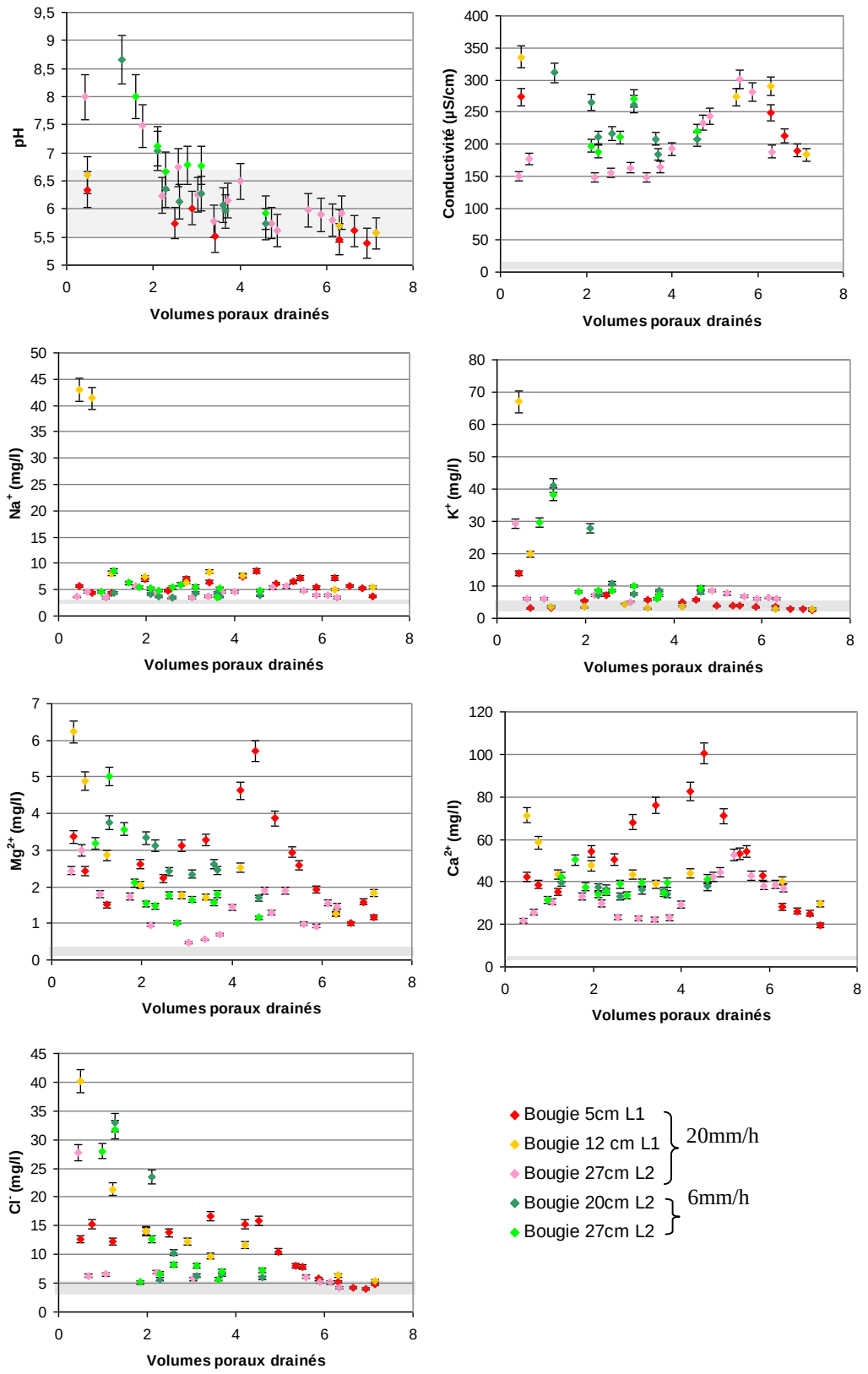


Figure 5.16 : pH, conductivité, Na^+, K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+} et Cl^- de l'eau des bougies poreuses situées à 5 cm, 12 cm, 20 cm et 27 cm dans les colonnes O et AK de l'expérimentation L1/L2 pour les deux intensités. La zone grisée représente la gamme de composition[1] de l'eau de pluie (eau osmosée)

[1] Moyenne ± écart-type

La solution de l'horizon L2 est par ailleurs moins concentrée en Ca^{2+} et Mg^{2+} et plus concentrée en K^{+} que celle de l'horizon L1 traduisant des mécanismes probables d'échange d'ions à la surface des particules (figure 5.16). Enfin, on observe une relation exponentielle décroissante de la concentration de particules à la base des colonnes L1/L2 équipées de bougies poreuses en fonction de la conductivité de la solution du sol de l'horizon L2 (figure 5.17). Une telle relation est classique d'un processus de floculation des particules (Tombácz et Szekeres, 2004).

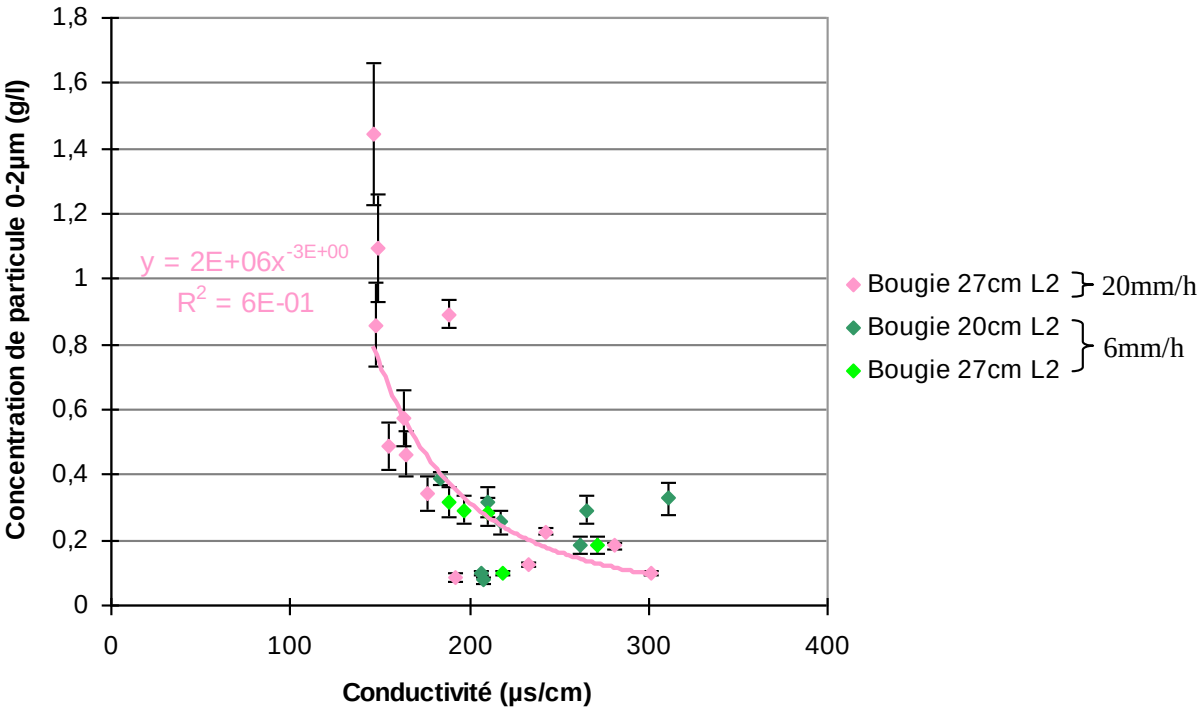


Figure 5.17 : Concentration de particules collectées à la base des colonnes O et AK en fonction de la conductivité de la solution du sol de l'horizon L2 pour les deux intensités de pluies

IV. Conclusion

La gamme de concentrations en particules collectées à la base des colonnes L1/L2 dans cette expérimentation d'illuviation montre une grande variabilité, qui reflète probablement la variabilité naturelle de la structure. Cette variabilité est plus large que celle observée lors des expérimentations d'éluviation sur l'horizon L1 seul, probablement parce qu'on a utilisé plus de colonnes. Les particules collectées dans l'expérimentation d'illuviation à la base des colonnes L1/L2 ont une signature minéralogique très proche de celle déterminée sur les particules collectées dans l'expérimentation d'éluviation à la base des colonnes L1. Ainsi, si les caractéristiques physico-chimiques sélectionnées pour l'horizon L2 le rendent peu propice à la dispersion, il semble par contre qu'il ne soit pas complètement favorable au piégeage des particules issues de l'horizon L1, dont au moins une partie migre. Les colonnes des deux expérimentations L1 et L1/L2 ayant un comportement relativement proche, il a été possible d'estimer les quantités de particules du L1 fixées dans le L2.

L'analyse conjointe de l'évolution des concentrations en particules collectées à la base des colonnes au cours du temps, du fonctionnement hydrodynamique de ces dernières et de la composition géochimique des solutions permet également de conclure sur les processus de fixation des particules au sein de l'horizon L2 et de confirmer ou de compléter certains processus de mobilisation des particules dans le L1, du fait de la plus grande diversité de cas disponibles par rapport à l'expérimentation précédente.

Du point de vue de la mobilisation des particules du L1, les résultats obtenus sur les colonnes L1/L2 confirment l'importance des flux préférentiels et de la succion à la base des colonnes sur le transfert des particules dans le sol. L'analyse de la colonne O, équipée de bougies poreuses permet en outre de mettre en évidence un impact de la composition géochimique de la solution du sol sur cette mobilisation. Cet impact n'avait pu être mis en évidence dans le cas du L1 seul sans doute du fait que la colonne équipée de bougies poreuses dans cette expérimentation (colonne J) draine très peu d'eau contrairement au cas de la colonne O.

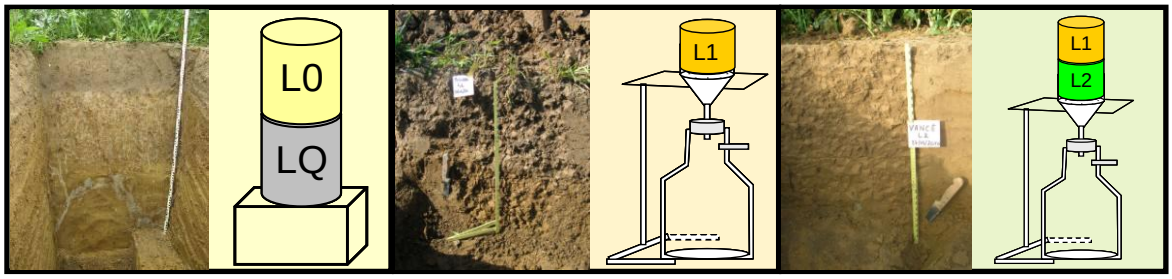
En ce qui concerne la fixation des particules dans le L2, un processus de coagulation est mis en évidence au cours des expérimentations. Ces dernières n'ont pas permis d'identifier de processus de filtration physique et donc de conclure sur l'importance relative de ces deux types de processus dans la fixation des particules dans les horizons d'accumulation des sols.

Au final, les expérimentations fournissent une fourchette de 20 à 80 % de fixation. Cette fourchette, bien que très large, représente un premier pas qu'il sera nécessaire d'affiner

ultérieurement. Cette estimation montre qu'il faudrait poursuivre l'expérimentation encore au moins 5 ans dans le cas le plus favorable pour commencer à pouvoir quantifier la fixation des particules dans l'horizon L2 sur la base des approches proposées au chapitre 2. Il sera donc indispensable d'envisager une autre approche pour quantifier une telle fixation.

De plus, l'extrapolation des données obtenues dans ces expériences sur des temps pédologiques montre que dans le cas de l'hypothèse d'une fixation de seulement 20% des particules mises en suspension dans l'horizon E, seule la moitié des profils étudiés soit entre 0,5 et 6 % doit sa différence texturale au processus de lessivage. Par contre, l'hypothèse d'une fixation de 80 % des particules ne change que peu les résultats obtenus. Néanmoins, encore une fois, la fourchette de fixation obtenue étant très large, il sera nécessaire d'affiner cette conclusion ultérieurement.

Conclusions et perspectives



Afin de caractériser le lessivage dans les sols favorables à ce processus, principalement les Luvisols, nous avons choisi une approche expérimentale associée à une approche de bilan de masse sur les bases de données pédologiques existantes. Cette double approche nous a permis de : (i) déterminer la nature des particules migrantes dans les Luvisols, (ii) quantifier les particules mobilisées et identifier un certain nombre de processus responsables de cette mobilisation, (iii) quantifier les quantités de particules fixées au sein des horizons d'accumulation et identifier un certain nombre de processus responsables de cette fixation, (iv) déterminer l'impact de la structure du sol et des événements climatiques extrêmes sur le lessivage, (v) extrapoler ces résultats expérimentaux sur des durées de la pédogenèse et les confronter aux profils de sols décrits dans la littérature. Ce travail a aussi nécessité des développements méthodologiques préalables importants afin de pouvoir quantifier les faibles quantités de particules migrantes. Dans ce qui suit, nous reviendrons sur les conclusions que ce travail a permis d'établir sur ces différents points et les perspectives directes qui en découlent avant de discuter de perspectives à plus long terme.

Mise au point de méthodes de quantifications de faibles quantités de particules migrantes.

Plusieurs types de traceurs ont été testés pour détecter de faibles quantités de particules migrantes accumulées dans un solide récepteur (CEC, granulométrie laser, DRX, IR, extraction à l'eau régale). Le solide récepteur était : soit un limon de quartz (cas du L0) pour lequel seules les méthodes à l'infra rouge et la mesure des teneurs en majeurs Fe et Al par la méthode à l'eau régale ont permis de quantifier des apports d'un mélange d'argiles contenant des smectites avec des limites de quantification respectivement de 0,05 % et de 0,8 % ; soit un limon contenant des argiles minéralogiques mais dépourvu de smectite (cas du L2) pour lequel seule la méthode de diffraction des rayons X sur lame orientée glycolée a été concluante avec une limite de quantification de 2 %.

Ces méthodes présentent néanmoins des limites de quantification ou des incertitudes importantes au regard des quantités de particules transférées par les processus étudiés. Ainsi, notamment pour la quantification des apports d'un mélange d'argiles riches en smectites dans un mélange d'argiles qui en est dépourvu, d'autres approches devront être recherchées.

Une quantification des zones de dépôt de particules dans les colonnes à deux échelles par tomographie des rayons X et par microscopie optique sur lame mince comme discutée au chapitre 5 pourrait être envisagée.

Nature des particules migrantes dans les Luvisols

Nos résultats montrent que les particules qui migrent appartiennent majoritairement à la fraction 0-2 µm. Les particules libérées et transférées à la base des colonnes de sol ont une signature minéralogique très proche de celle de la fraction 0-2 µm du sol, sauf pour les premières pluies pour lesquelles on observe aussi une contribution non négligeable de la fraction 0-0,2 µm riche en smectites. Ainsi la sélectivité du processus d'éluviation en faveur des smectites ne semble exister qu'en début d'expérimentation, contrairement à ce qui est décrit dans la littérature (Mercier et al., 2000). On observe également une mobilisation préférentielle des quartz par rapport aux argiles minéralogiques. Ce dernier résultat est surprenant.

Nous montrons également que les tests de dispersion de type LE-WDC réalisés sur un sol « humide » (ayant subi un prétraitement à pF2,5) sont un bon indicateur de la nature minéralogique des particules qui migrent par éluviation dans les sols. Ceci est moins vrai pour le même test réalisé sur un sol « sec » (ayant subi un prétraitement à pF 6) qui exacerbe le départ de quartz. Par contre, ces tests ne sont pas réellement de bons indicateurs de la granulométrie des particules qui migrent.

Néanmoins, les tests LE-WDC réalisés dans cette étude l'ont été pour deux sols très comparables. Afin d'extrapoler ces résultats à d'autres types de sol ayant des propriétés contrastées (matière organique, pH, minéralogie des argiles), des tests complémentaires seraient nécessaires car les différences de protocole entre les tests de LE-WDC existant dans la littérature rendent les comparaisons inter-études délicates. L'influence du rapport solide/solution devra notamment être testée.

Quantification des particules mobilisées et processus responsables de cette mobilisation

Lors des premières pluies dans les deux expérimentations -éluviation et illuviation-, on observe un « lavage » des colonnes, mis en évidence par de très fortes concentrations en particules éluviées. Suite à cela, les concentrations en particules sont inférieures à 0,65g/L dans l'expérimentation sur sol non perturbé. Ces concentrations sont du même ordre de grandeur que celles obtenues par Kjaergaard et al. (2004b) et Jacobsen et al. (1997), avec une tendance à des concentrations légèrement supérieures dans notre cas par rapport aux sols de Kjaergaard et al. (2004b) qui sont moins favorables au lessivage. Néanmoins, compte tenu des différences de protocoles entre la littérature et cette étude et la grande variabilité de concentrations enregistrée entre les colonnes (d'un facteur 3), il est difficile de conclure sur l'impact de la nature du sol sur les concentrations de particules libérées en suspension.

Par ailleurs, nos résultats mettent en évidence que le transfert des particules dépend du mode de fonctionnement hydrodynamique. On observe des exportations de particules liées au transfert préférentiel, et des exportations en partie liées à la succion appliquée à la base des colonnes. L'importance de l'un par rapport à l'autre n'a pu être déterminée dans le cadre de ce travail, les concentrations enregistrées étant à peu près équivalentes dans les deux cas. Enfin, dans certains cas, une influence de la composition chimique de la solution du sol sur les concentrations de particules mises en suspension est observée. Il n'a pas été possible de discriminer l'importance relative des différents processus sur l'exportation en particules.

Pour aller plus loin, la caractérisation de la structure des colonnes par tomographie des rayons X permettrait de mieux comprendre les différences de fonctionnement hydrodynamique et ainsi sans doute les processus à l'origine de la mobilisation des particules éluviées. Notamment une quantification de la surface de contact entre la phase solide et l'eau du sol serait nécessaire comme discutée au chapitre 3. Cette surface pourrait être estimée par deux approches : simulation de pluie avec suivi des transferts d'eau par tomographie des rayons X ou simulation de pluie contenant du colorant et analyse d'images associée.

Quantification des particules fixées au sein des horizons d'accumulation et processus responsables de cette fixation

Nos résultats mettent en évidence que seule une fraction des particules mises en suspension dans l'horizon d'éluviation est fixée dans l'horizon d'illuviation. Les expérimentations fournissent une fourchette de 20 à 80 % de fixation. Si cette fourchette est très large, elle représente néanmoins un résultat original dans la littérature qui nécessitera d'être affiné dans l'avenir.

Cette fixation est en partie due à un processus de coagulation mis en évidence au cours des expérimentations. Ces dernières n'ont pas permis d'identifier de processus de filtration physique et donc de conclure sur l'importance relative entre filtration physique et physico-chimique sur la fixation des particules dans les horizons d'accumulation des sols.

Cette fixation s'accompagne de phénomènes de colmatage des colonnes pour un certain nombre d'entre elles.

Impact de la structure et des événements climatiques extrêmes sur le lessivage

Nos travaux mettent en évidence des départs de particules deux fois plus importants dans des horizons remaniés par rapport à des horizons en place. Or ces horizons remaniés peuvent être considérés comme analogues à des horizons de labour. Ainsi, le labour aurait tendance à

augmenter le départ de particules par éluviation dans les sols. A notre connaissance, il n'y a pas de travaux dans la littérature permettant de confirmer cette hypothèse. Nous pourrions envisager de vérifier cette hypothèse en réalisant des bilans détaillés de stocks de particules fines dans des sols ayant subi une réduction du travail du sol ou une absence de travail depuis de nombreuses années. Ces stocks seraient comparés à ceux de parcelles témoins toujours labourées. De telles parcelles existent dans différents essais à long terme (essai système de l'INRA de Mons en Chaussée, essai d'Arvalis à Boigneville, par exemple).

Enfin, nos travaux montrent l'impact non négligeable des événements extrêmes sur le processus d'éluviation. Or dans le contexte de changement climatique actuel, les prédictions montrent que sous nos climats ces événements extrêmes devraient être de plus en plus nombreux à l'horizon 2100 (GIEC, 2007). Ainsi, le changement climatique devrait avoir tendance à augmenter la vitesse du processus de lessivage de même qu'il accélererait le drainage (Montagne et Cornu, 2010).

Extrapolation des résultats expérimentaux sur des durées de la pédogenèse et confrontation aux profils de sols décrits dans la littérature.

Des calculs de bilan de masse sur des profils de Luvisols issus de la base de données des sols de France Donesol nous a permis d'établir que le lessivage était le processus majeur responsable de la formation de profils de sols à texture contrastée dans seulement 1 à 12% des cas. Dans les 88 à 99% des cas restant, d'autres processus rentrent en jeu dans la différentiation texturale des horizons (Quénard et al., 2011). L'approche utilisée ici ne permet par contre pas de quantifier la contribution de ces différents processus dans la formation des profils de sol en question. L'utilisation d'un modèle de formation des sols contenant ces différents processus (bioturbation, microdivision, dissolution, lessivage), pourrait être envisagée pour estimer ces contributions. Un tel modèle a été développé par Finke et Hutson (2008). Il a été calibré pour un nombre réduit de profils de sol (Finke, 2011). Une phase de calibration préliminaire sur un plus grand nombre de profils de sols issus de la base de donnée Donesol par exemple serait nécessaire.

Perspectives à plus long terme

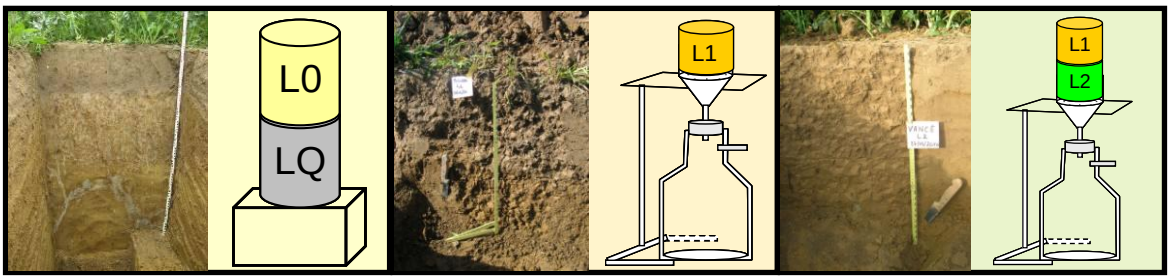
A plus long terme, les résultats obtenus ici pourraient être utilisés pour calibrer un modèle de lessivage. Samouëlian et Cornu (2008) ont effectivement montré que le lessivage reste un processus peu modélisé en pédogenèse. Dans une étude récente, Finke et Hutson (2008) ont développé un modèle de genèse des sols appelé SoilGen1. Ce modèle est basé sur les modèles

de LEACHC (Hutson et Wagener, 1992) et de RothC 26.3 (Jenkinson et Coleman, 1994) auxquels ils ont ajouté un module de bioturbation ainsi qu'un module supplémentaire sur le recyclage biogéochimique par les plantes et les transferts par lessivage. Cependant, les auteurs ont conclu que : "le transport d'argile (…) ne peut pas être simulé en raison du manque de connaissance du processus". Dans une nouvelle version le module de lessivage a été mieux développé (Finke, 2011) et en parallèle Michel et al. (2010) ont développé un nouveau modèle conceptuel sur le transfert de particules. Ces deux approches pourraient être combinées pour développer un modèle intégré de genèse des sols incluant le lessivage qui pourrait être calibré sur les résultats des expériences présentes.

Néanmoins, pour mener à bien le développement d'une telle modélisation certains mécanismes restent insuffisamment caractérisés et notamment l'impact des conditions physico-chimiques sur la dispersion des particules. Ainsi, des expérimentations complémentaires pourraient être réalisées sur des suspensions de particules issues des sols utilisés dans notre étude afin de mieux comprendre, en milieu contrôlé, l'impact des caractéristiques physico-chimiques de la solution du sol sur la dispersion, l'arrangement interparticulaire et la stabilité des particules en suspension. La cinétique de ces processus pourrait être caractérisée par dispersion et diffraction de la lumière, DRX, mobilité électrophorétique et microscopie électronique.

Enfin, les résultats expérimentaux obtenus dans ce travail l'ont été sur du court terme (un à deux ans). Si des approches de type bilan sur des profils de sols de la base de données DoneSol ont permis de montrer que la dynamique obtenue dans ces expérimentations est cohérente avec la dynamique de la pédogenèse, il sera nécessaire de valider le modèle développé sur des sols pour lesquels le processus de lessivage aura été quantifié. La quantification des minéraux argileux et des concentrations en éléments majeurs ne permettant pas de différencier les différents processus impliqués dans le développement de sols à texture contrastée (Legros, 2007; Presley et al., 2004; Phillips, 2007) une autre approche devra être développée.

Bibliographie



Arkley, R.J., 1967. Climate of soil great soil groups of the western United States. Soil Science, 103 (6): 389-400.

Banwell, C.N., 1983. Fundamentals of molecular spectroscopy (3rd edition). McGraw-Hill Book Compagny, London, 338pp.

Barnes, R.J., Dhanoa, M.S., and Lister, S.J., 1989. Standard normal variate transformation and de-trending of near-infrared diffuse reflectance spectra.

Bear, J., 1972. Dynamics of fluids in porous media. Elsevier, New York.

Bidwell, O.W. and Hole, F.D., 1965. Man as a factor of soil formation. Soil Science, 99: 65-72.

Bockheim, J.G. and Gennadiyev, A.N., 2000. The role of soil-forming processes in the definition of taxa in soil taxonomy and the world soil reference base. Geoderma, 95: 53-72.

Boixadera, J., Poch, R.M., Garcia-Gonzalez, M.T. and Vizcayno, C., 2003. Hydromorphic and clay-related processes in soils from the Llanos de Moxos (northern Bolivia). Catena, 54: 403-424.

Boulaine, J., 1978. Les sols calfersiques. Cahier de l'ORSTOM, série pédologique XVI : 265-291.

Boulaine, J., 1989. Histoire des pédologues et de la science des sols. INRA, Paris, 285 pp.

Brimhall, G.H., Lewis, C.J., Ford, C., Bratt, J., Taylor, G. and Warin, O., 1991. Quantitative geochemical approach to pedogenesis: importance of parent material reduction, volumetric expansion, and eolian influx in lateritization. Geoderma, 51: 51-91.

Brinkman, R., 1990. "Resilience against climate change? Soil minerals, transformations and surface properties: Eh and pH", in Scharpenseel, H.W., Schomaker, M. and Ayoub, A. (eds), Soil on a warmer earth. Elsevier, p51-60.

Brubaker, S.C., Holzhey, C.S. and Brasher, B.R., 1992. Estimating the water-dispersible clay content of soils. Soil Science Society of America Journal, 56: 1227-1232.

Cerdan, O., Govers, G., Le Bissonnais, Y., Van Oost, K., Poesen, J., Saby, N., Gobin, A., Vacca, A., Quinton, J., Auerswald, K., Klik, A., Kwaad, F.J.P.M., Raclot, D., Ionita, I., Rejman, J., Rousseva, S., Muxart, T., Roxo, M.J. and Dostal, T., 2010. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data. Geomorphology, 122: 167-177.

Chadwick, O.A. and Chorover, J., 2001. The chemistry of pedogenic thersholds. Geoderma 100: 321-353.

Chenu, C., Le Bissonnais, Y. and Arrouays, D., 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. Soil Science Society of America Journal, 64: 1479-1486.

Concaret, J., (Editor), 1981. Drainage agricole: Théorie et pratique. Chambre régionale d'agriculture de Bourgogne, Dijon, France, 509 pp.

Cornu, S., Montagne, D., Maguin, F., Le Lay, C., Chevallier, P. and Cousin, I., 2007. Influence of human impacts on Albeluvisol analysed by X-ray microfluorescence: Relative evolution of the transforming front at the tongue scale. The Science of the Total Environment. 377, 2-3, 244-254

Cornu, S., Besnault, A. and Bermond, A., 2008. Soil podzolisation induced by reforestation as shown by sequential and kinetic extractions of Fe and Al. EJSS, 59 (2): 222-232

De Jonge, L.W., Kjaergaard, C. and Moldrup, P., 2004. Colloids and colloid-facilitated transport of contaminants in soils: an introduction. Vadose Zone Journal, 3: 321-325.

DeNovio, N.M., Saiers, J.E. and Ryan, J.N., 2004. Colloid Movement in Unsaturated Porous Media. Vadose Zone J., 3(2): 338-351.

Dexter, A.R, 1988. Advances in characterization of soil structure. Soil and tillage research, 11: 199-238.

Dexter, A.R., Richard, G., Czyz, E.A., Davy, J., Hardy, M. and Duval, O., 2011. Clay dispersion from soil as a function of antecedent water potential. Soil Science Society of America Journal, 75: 444-455.

DoneSol, www.gissol.fr (accessed the 2011-02-15).

Duchaufour, P., 1956. Pédologie. Applications forestières et agricoles. Ecole nationale des Eaux et Forêts, 310 pp.

Duchaufour, P., 1983. Pédologie. 1. Pédogenèse et classification. Masson, Paris, 491 pp.

Dultz, S., 2000. Effect of silicate weathering and lessivage on K-content in forest soils derived from Pleistocene sediments. Journal of Plant Nutrition & Soil Science, 163 (3): 299-305.

Egli, M. and Fitze, P., 2001. Quantitative aspects of carbonate leaching of soils with differing ages and climates. Catena, 46: 35-62.

El-Farhan, Y.H., Denovio, H.M., Herman, J.S. and Hornberger, G.M. 2000., Mobilization and transport of soil particles during infiltration experiments in an agricultural field, Shenandoah Valley, Virginia. Environnemtal Science Technology. 34:3555-3559

Elzein, A. and Balesdent, J., 1995. Mechanistic simulation of vertical distribution of carbon concentrations and residence times in soils. Soil Science Society of America Journal, 59(5): 1328-1335.

Emerson, W.W., 1967. A classification of soil aggregates bases on their coherence in water. Australian Journal of Soil Research, 5: 47-57.

European Community Commission, 2002. Communication de la Commission au Conseil, au Parlement Européen, au Comité Economique et Social et au Comité des Régions : Vers une stratégie thématique pour la protection des sols 39 pp.

Faivre, P., 1988. Lessivage et planosolisation dans les séquences de sols caractéristiques des milieux intrandins de Colombie (Amérique du Sud). Thèse Doct. Etat Un. Nancy I, U.E.R – G.S.M.

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: 25-41.

Fedoroff, N., 1997. Clay illuviation in Red Mediterranean soils. Catena, 28: 171-189.

Finke, P.A. and Hutson, J.L., 2008. Modelling soil genesis in calcareous loess. Geoderma, 145: 462-479.

Finke, P.A., 2011. Modeling the genesis of luvisols as a function of topographic position in loess parent material. Quaternary International, sous presse.

Gal, M., Arcan, L., Shainberg, I. and Keren, R., 1984. Effect of exchangeable sodium and phosphogypsum on crust structure-scanning electron microscope observations. . Soil Science Society of America Journal, 48: 872-878.

Gamerdinger, A.P. and Kaplan, D.I., 2001. Physical and chemical determinants of colloid transport and deposition in water-unsaturated sand and Yucca Mountain tuff material. Environmental Science Technology, 35: 2497-2504.

Gaudet, J.P. and Szenknect, S., 2006. Colloidal transport through soils: mechanisms and models In: Samouëlian A., and Cornu S. (Editors), Proceedings of the workshop on modelling of pedogenesis. INRA, Orléans, France, pp. 61-64.

GIEC, 2007 : Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A.). GIEC, Genève, Suisse, 103 pages.

Goldbergs, S., Kapoor, B.S. and Rhoades, J.D., 1990. Effect of aluminium and iron oxides and organic matter on flocculation and dispersion of arid zone soils. Soil Science, 150: 588-593.

Gradusov, B.P., Frid, A.S. and Gradusova, O.B., 2002. The use of statistical methods for the analysis of particle-size distribution data on texturally differentiated soils in order to reveal their genesis. Eurasian Soil Science, 35 (7): 706-716.

Gunal, H. and Ransom, M.D., 2006. Clay illuviation and calcium carbonate accumulation along a precipitation gradient in Kansas. Catena, 68: 59-69.

Gutiérrez-Castorena, M.d.C., Ortiz-Solorio, C.A. and Sanchez-Guzman, P., 2007. Clay coatings formation in tepetates from Texcoco, Mexico. Catena, 71 : 411-424.

Hutson, L. and Wagener, R.J., 1992. LEACHM: Leaching Estimation and Chemistry Model. New York State College of Agriculture and Life Sciences, Cornell University. Department of Soil, Crop and Atmospheric Sciences, Rapport technique.

INRA, 1998. Base de données Géographique des Sols de France à l'échelle du 1/1.000.000, version 1 du 21/12/1998. INRA, US 1106 Infosol, Orléans, France.

Jacobsen, O.H., Moldrup, P., Larson, C., Konnerup, L. and Peteren, L.W., 1997. Particle transport in macropores of undisturbed soil columns. Journal of Hydrology, 196: 185-203.

Jamagne, M., 1967. Bases et techniques d'une cartographie des sols. Annales Agronomiques 18 (hors série), 142 pp.

Jamagne, M., 1973. Contribution à l'étude pédologique des formations loessiques du Nord de la France. Thèse de la faculté des sciences agronomiques de l'état, Gembloux, Belgique.

Jamagne, M., 1978. Les processus pédogénétiques dans une séquence évolutive progressive sur formations limoneuses loessiques en zone tempérée froide et humide. Comptes Rendus de l'Académie des sciences, 286: 25-27.

Jamagne, M. et Pedro, G., 1981. Les phénomènes de migration et d'accumulation de particules au cours de la pédogenèse sur les formations limoneuses du Nord de la France. Essai de caractérisation du processus de "lessivage". Comptes Rendus de l'Académie des sciences, 292: 1329-1332.

Jarvis, N.J., Villholth, K.G. and Ulén, B., 1999. Modelling particle mobilization and leaching in macroporous soil. European Journal of Soil Science, 50: 621-632.

Jenkinson, D.S. and Coleman, K., 1994. Calculating the annual input of organic matter to soil from measurements of total organic carbon and radiocarbon. European Journal of Soil Science, 45: 167-174.

Kaplan, D.I., Bertsch, P.M., Adriano, D.C. and Miller W.P. 1993. Soil-borne mobile colloids as influenced by water flow and organic carbon. Environmental Science Technology, 27: 1193-1200

Kaplan, D.I., Bertsch, P. and Adriano, D.C., 1997. Mineralogical and physicochemical differences between mobile and nonmobile colloidal phases in reconstructed pedons. Soil Science Society of America Journal, 61: 641-649.

Kjaergaard, C., Poulsen, T., Moldrup, P. and de Jonge, L.W., 2004a. Colloid mobilization and transport in undisturbed soil columns: I. Pore structure characterization and tritium transport. Vadose Zone Journal, 3: 413-423.

Kjaergaard, C., Moldrup, P., de Jonge, L.W. and Jacobsen, O.H., 2004b. Colloid mobilization and transport in undisturbed soil columns. II. The role of colloid dispersibility and preferential flow. Vadose Zone Journal, 3: 424-433.

Kjaergaard, C., de Jonge, L.W, Moldrup, P. and Schjønning, P., 2004c. Water-dispersible colloids: effect of measurement method, clay content, initial soil matric potential, and wetting rate. Vadose Zone Journal, 3: 403-412.

Klute, A., 1986. Water retention: Laboratory methods. In: Methods of soil analysis. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA (ed. A. Klute), pp. 635-662. Madison, WI.

Kretzschmar, R., Barmettler, K., Grolimund, D., Yan, Y.D., Borkovec, M. and Sticher, H., 1997. Experimental determination of colloid deposition rates and collision efficiencies in natural porous media. Water Resources Research, 33: 1129-1137

Krull, E.S., Bestland, E.A., Skjemstad, J.O. and Parr, J.F., 2006. Geochemistry (d13C, d15N, 13C NMR) and residence time (14C and OSL) of soil organic matter from red-brown earth of South Australia: Implication for soil genesis. Geoderma, 132: 344-360.

Laegdsmand, M., de Jonge, L.W. and Moldrup, P., 2005. Leaching of colloids and dissolved organic matter from columns packed with natural soil aggregates. Soil Science, 170: 13-27.

Laird, D.A., Barak, P., Nater, E.A. and Dowdy, R.H., 1991. Chemistry of smectitic and illitic phases in interstratified soil smectite. Soil Science Society of America Journal, 55: 1499-1504.

Le Bissonnais, Y., 1988. Analyse des mécanismes de désagrégation et de mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies. Thèse Doct. de Science de la terre, Univ. Orléans, France.

Le Bissonnais, Y., 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I.Theory and methodology. European Journal of Soil Science, 47: 425-437.

Le Bissonnais, Y., Bruand, A. and Jamagne, M., 1989. Laboratory experimental study of soil crusting: relation between aggregate breakdown mechanisms and crust structure. Catena, 16: 377-392.

Le Bissonnais, Y. et Le Souder, C., 1995. Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. Etude et Gestion des sols, 2 : 43-56.

Le Bissonnais, Y. and Arrouays, D., 1997. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. European Journal of Soil Science, 48: 39-48.

Legros, J.P., 2007. Les grands sols du monde. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 574 pp.

Levy, G.J., Eisenberg, H. and Shainberg, I., 1993. Clay dispersion as related to soil properties and water permeability. Soil Science, 155: 15-22.

Majdalani, S., Michel, E., Di-Pietro, L. and Angulo-Jaramillo, R., 2008. Effects of wetting and drying cycles on in situ soil particle mobilization. European Journal of Soil Science, 59(2): 147-155.

Malvern, 2005. Mastersizer 2000: Integrated systems for particle sizing. Brochure, 12pp.

Mathieu, C., 2009. Les principaux sols du monde. Voyage au centre de l'épiderme de la planète Terre, Lavoisier, éditions Tech & Doc, 233 pp.

McCarthy, J.F. and Zachara, J.M. 1989. Subsurface transport of contaminants: Mobile colloids in the subsurface environment may alter the transport of contaminants. Environnemental Science & Technologie, 23(5): 496-502.

McGechan, M.B., 2002. SW--Soil and Water: Transport of Particulate and Colloid-sorbed Contaminants through Soil, Part 2: Trapping Processes and Soil Pore Geometry. Biosystems Engineering, 83(4): 387-395.

McGechan, M.B. and Lewis, D.R., 2002. SW--Soil and Water: Transport of Particulate and Colloid-sorbed Contaminants through Soil, Part 1: General principles. Biosystems Engineering, 83(3): 255-273.

McKeague, J.A., Guertin, R.K., Valentine, K.W.G., Bélisle, J., Bourbeau, G.A., Howell, A., Michalyna, W., Hopkins, L., Pagé, F. and Bresson, L.M., 1980. Estimating illuvial clay in soils by mircomorphology. Soil Science, 129: 386-388.

Mercier , P., Denaix, L., Robert, M. et de Marsily, G., 2000. Caractérisation des matières colloïdales évacuées au cours du drainage agricole : incidence sur l'évolution pédogénétique des sols. Comptes Rendus de l'Académie des sciences, 331: 195-202.

Michel, E., Majdalani, S. and Di-Pietro, L., 2010. How differential capillarity stresses promote particle mobilization in macroporous pores: A novel conceptual model. Vadose Zone Journal, 9/ 307-316.

Miller, W.P., Frenkel, H. and Newman, K.D., 1990. Flocculation concentration and sodium/calcium exchange of kaolinitic soil clays. Soil Science Society of America Journal, 54: 346-351.

Montagne, D., Cornu, S., Le Forestier, L. and Cousin, I., 2009. Soil drainage as an active agent of soil evolution: a review. Pedosphere, 19:1-13.

Montagne, D. and Cornu, S., 2010. Do we need to include soil evolution module in models for prediction of future climate change? Climatic Change, 98: 75-86.

Norme ISO 11466, 1995. Qualité du sol - Extraction des éléments en traces solubles dans l'eau régale

Norme ISO-11275, 2004. Qualité du sol – Détermination de la conductivité hydraulique en milieu non saturé et de la caractéristique de rétention en eau – Méthode par évaporation de Wind.

Norme NF ISO 22036, AFNOR, 2009. Recueil de normes. Qualité du sol - Dosage des éléments traces dans des extraits de sol par spectrométrie d'émission atomique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES).

Peters, N.E. and Ratcliffe, E.B., 1998. Tracing hydrologic pathways using chloride at the Panola Mountain Research watershed, Georgia, USA. Water, air soil pollution, 105: 263-275.

Petersen, C.T., Holm, J., Koch, C.B., Jensen, H.E. and Hansen, S., 2003. Movement of pendimethalin, ioxynil and soil particles to field drainage tiles. Pest Management Science, 59(1): 85-96.

Phillips, J.D., 2007. Development of texture contrast soils by a combination of bioturbation and translocation. Catena, 70: 92-104.

Pojasok, T. and Kay, B.D., 1990. Assessment of a combination of wet sieving and turbidimetry to characterize the structural stability of moist aggregates. Canadian Journal of Soil Science, 70: 33-42.

Presley, D.R., Ransom, M.D., Kluitenberg, G.J. and Finnell, P.R., 2004. Effect of thirty years irrigation on the genesis and morphology of two semiarid soils in Kansas. Soil Science Society of America Journal, 68: 1916-1926.

Quénard, L., Samouëlian, A., Laroche, B. and Cornu, S., 2011. Lessivage as a major process of soil formation: a revisitation of existing data. Geoderma, 167-168: 135-147.

Quétin, Ph. et Raison, L.,1997. Conductivité hydraulique à saturation par la méthode de la charge constante. Fiche protocole, INRA Orléans, 3p.

Rasiah, V., Kay, B.D. and Martin, T., 1992. Variation of aggregate stability and dispersible clay with water content: Influence of selected soil properties. Soil Science Society of America Journal, 56: 1604-1609.

Richards, L.A., 1956. Sample retainers for measuring water retention by soil. Soil Science Society of America Proceedings, 20: 301-303.

Richter, D., 2006. Improving the science of soil change: A proposal for earth science community, 18th World Congress of Soil Science. IUSS-SSSA, Philadelphia Pennsylvania, USA, pp. 85

Richter Jr, D. deB., 2007. Humanity's transformation of earth's soil: pedology's new frontier. Soil Science, 172(12): 957-967.

Robert, M. et Tessier, D., 1974. Méthode de préparation des argiles des sols pour des études minéralogiques. Annales Agronomiques, 25(6): 859-882.

Rounsevell, M.D.A., Evans, S.P. and Bullock, P., 1999. Climate change and agricultural soils: impacts and adaptation. Climatic Change 43: 683-709.

Rousseau, M., 2003. Transport préférentiel de particules dans un sol non saturé: de l’expérimentation en colonne lysimetrique à l’élaboration d’un modele à base physique. Thèse de l’institut national polytechnique de Grenoble.

Rousseau, M., Di Pietro, L., Angulo-Jaramillo, R., Tessier, D. and Cabibel, B., 2004. Preferential transport of soil colloidal particles: Physicochemical effects on particle mobilization. Vadose Zone Journal, 3: 247-261.

Ryan, J.N., Illangasekare, T.H., Litaor, M.I. and Shannon, R., 1998. Particle and plutonium mobilization in macroporous soils during rainfall simulations. Environ. Sci. Technol. 32:476–482.

Saiers, J.E. and Lenhart, J.J., 2003. Ionic-strenght effects on colloid transport and interfacial reactions in partially saturated porous media. Water Resources Research, 39: 1256. doi:10.1029/2002WR001887.

Samouelian, A. and Cornu, S., 2008. Modelling the formation and evolution of soils, a synthesis. Accepted in Geoderma, special issue on modelling of pedogenesis.

Schelde, K., Moldrup, P., Jacoben, O.H., de Jonge, H., de Jonge, L.W. and Komatsu, K., 2002. Diffusion-limited mobilization and transport of natural colloids in unsaturated macroporous soil. Vadose Zone Journal, 1: 125-136.

Schjønning, P., Thomsen, I.K., Møberg, J.P., de Jonge, H., Kristensen, K. and Christensen, B.T., 1999. Turnover of organic matter in differently textured soils I. Physical characteristics of structurally disturbed and intact soils. Geoderma, 89: 177-198.

Schulin, R., Van Genuchten, M., Flühler, H. and Ferlin, P., 1987. An experimental study of solute transport in a stony field soil. Water Resources Research, 23(9): 1785-1794.

Seta, A.K. and Karathanasis, A.D., 1996. Water dispersible colloids and factors influencing their dispersibility from soil aggregates. Geoderma, 74: 255-266.

Seta, A.K. and Karathanasis, A.D., 1997. Stability and transportability of water-dispersible soil colloids. Soil Science Society of America Journal, 61: 604-611.

Shang, J., Flury, M., Chen, G. and Zhuang, J., 2008. Impact of low rate, water content, and capillary forces on in situ colloid mobilization during infiltration in unsaturated sediments. Water Resources Research, 44, W06411, doi:10.1029/2007WR006516.

Sharma, P., Abdou, H.M. and Flury, M., 2008. Effect of the lower boundary condition and flotation on colloid mobilization in unsaturated sandy sediments. Vadose Zone Journal, 7(3): 930-940.

Simunek, J., Van Genuchten, M.Th. and Sejna, M., 2005. The Hydrus-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 3.0, Hydrus software series 1, Departement of environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, CA, 240 pp.

Sirivithayapakorn, S. and Keller, A.A., 2003. Transport of colloids in unsaturated porous media: A pore-scale observation of processes during the dissolution of air–water interface. Water Resour. Res. 39:1346, doi:10.1029/2003WR002487.

Soil Atlas of Europe, 2005. European Soil Bureau Network. European Commission, Luxembourg, 128 pp.

Soil Survey Staff, 1999. Soil taxonomy: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys (2nd edition). US Department of Agriculture, Agriculture Handbook, N°436, Washington DC, 871pp.

Sombroek, W.G., 1990. Soils on a warmer earth : tropical and subtropical regions. Chap. 13. In: Soils on a warmer earth. (H.W. Scharpenseel, M. Schomaker et A. Ayoub eds.) Elsevier, Amsterdam, 157-174.

Stichting voor Bodemkartering (Editor), 1965. De Bodem van Nederland: Toelichting bij de Bodemkaart van Nederland schaal 1:200 000. Stichting voor Bodemkartering, Wageningen, 292 pp.

Tamari, S., Bruckler, L., Halbertsma, J. and Chadoeuf, J., 1993. A simple method for determining soil hydraulic properties in the laboratory. Soil Science Society of America Journal, 57: 642-651.

Tauler, R., 1995. Multivariate curve resolution applied to second order date. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 30: 133-146.

Temminghoff, E.J.M., Van der Zee, S.E.A.T.M. and De Haan, F.A.M., 1998. Effects of dissolved organic matter on the mobility of copper in a contaminated sandy soil. . European Journal of Soil Science, 49: 617-628.

Tenenhaus, M., 1999. L'approche PLS. Revue de statistique appliquée, tome 47 (2) : 5-40.

Thompson, M.L., Fedoroff, N. and Fournier, B., 1990. Morphological features related to agriculture and faunal activity in three loess-derived soils in France. Geoderma, 46: 329-349.

Tombácz, E. and Szekeres, M., 2004. Colloidal behaviour of aqueous montmorillonite suspensions: the specific role of pH in the presence of indifferent electrolytes. Applied Clay Science 27: 75-94.

Tugel, A.J., Herrick, J.E., Brown, J.R., Mausbach, M.J., Puckett, W. and Hipple, K., 2005. Soil change, soil survey and natural resources decision making: a blueprint for action. Soil Science Society of America Journal 69: 738-747.

Van Breemen, N. and Buurman, P., 2002. Soil formation (2nd edition). Kluwer academic publishers, Dordrecht, The Netherlands, 404 pp.

Van Genuchten, M.Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, 44: 892-898.

Van Genuchten, M.Th., Leij, F.J. and Yates, S.R., 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. EPA report 600/2-91/065. U.S. Salinity Laboratory USDA ARS, Riverside, California.

Verheijen, F.G.A., Jones, R.J.A., Rickson, R.J. and Smith, C.J., 2009. Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. Earth-Science Reviews, 94: 23-38.

Villholth, K.G., Jarvis, N.J., Jacobsen, O.H. and de Jonge, H., 2000. Field investigations and modeling of particle-facilitated pesticide transport in macroporous soil. Journal of Environmental Quality, 29: 1298-1309.

Vinten, A.J.A. and Nye, P.H., 1985. Transport and deposition of dilute colloidal suspension in soils. Journal of Soil Science. 36: 531-541

Wan, J. and Tokunaga, T.K. 1997. Film straining of colloids in unsaturated porous media: conceptual model and experimental testing. Environmental Science and Technology, 31:2413-2420

Wind, G.O., 1968. Capillary conductivity data estimated by a simple method, In: P.e; Rijtema ans H Wassink (eds.) water in the unsaturated zone. Vol.1.Proc. Wageningen Symposium Wageningen, the Netherlands, June 1966. IASH Gentbrugge/UNESCO Paris: 181-191.

Wold, H., 1966. Estimation of principal components ans related models by iterative least squares, in Multivariate Analysis, Krishnaiah, P.R (Ed.), Academic Press, New York, pp. 391-420.

Worrall, F., Parker, A., Rae, J.E. and Johnson, A.C., 1999. A study of suspended and colloidal matter in the leachate from lysimeters and its role in pesticide transport. Journal of Environmental Quality, 28:595-604

WRB, 2006. World Reference Base for soil resources: a framework for international classification, correlation and communication. World soil resources reports 103. FAO, ISRIC, IUSS, Rome, 128pp.

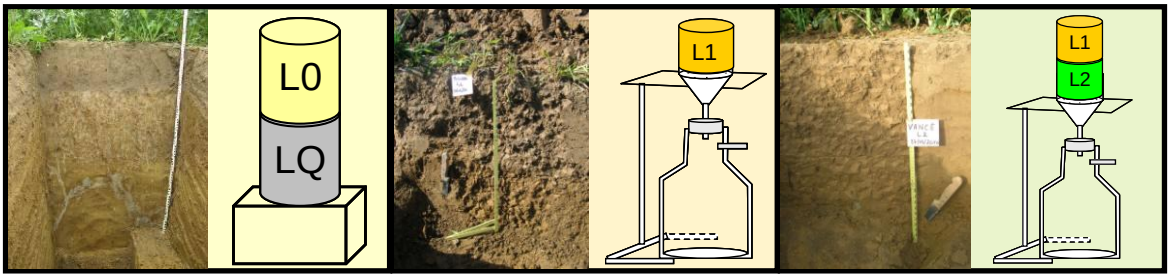
Yaalon, D.H and Yaron, B. 1966. Framework for man-made soil changes: An outline of metapedo-genesis. Soil Science 102: 272–277.

Yoder, R.E., 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. Journal of American Society of Agronomy, 28: 337-351.

Zhuang, J., McCarthy, J.F., Tyner, J.S., Perfect, E. and Flury, M., 2007. In-situ colloid mobilization in Hanford sediments under unsaturated transient flow conditions: Effect of irrigation pattern. Environmental Science & Technology, 41: 3199–3204.

Zykina, V.S., 2003. Pleistocene warming stages in southern west Siberia: soils, environment and climate evolution. Quaternary International, 106/107: 233-243.

Annexe



Le site de Heurtebise : L0

Le sol sélectionné est un Luvisol situé sur la commune de Nesle la Montagne (02400) dans le département de l'Aisne au lieu dit le Grand Heurtebise (X=681731 et Y=2445237 ; coordonnées en Lambert 2 étendu). Les prélèvements ont été réalisés en juin 2009. La parcelle était alors cultivée en pois.

La description du profil est la suivante (figure A.1) :

- De 0 à 35 cm de profondeur, un horizon AP, de couleur brun - gris, à texture limoneuse, peu lourd. On note la présence de croûtes de battance enfouies dans le labour, suite au travail du sol.
- De 35 à 60 cm de profondeur, un horizon E&BT à texture limono-argileuse avec deux types de volumes pédologiques différents : des volumes de couleur claire (gris/beige) et des volumes de couleur ocre. Cet horizon présente quelques traces d'hydromorphie et l'on observe également des concrétions noires d'oxy-hydroxydes de fer et de manganèse.
- De 60 à 95 cm, un horizon BTgd, principalement de couleur ocre avec présence de volumes verticaux gris-blanc nommés « glosses ». La texture est limono-argileuse avec une teneur en argile plus élevée que dans l'horizon précédent. On n'observe ni trace d'hydromorphie ni taches d'oxy-hydroxydes de fer et de manganèse.
- De 95 à 140 cm, un horizon BT de texture limono-argileuse, sec, constitué principalement de volume ocre et d'une glosse importante de couleur gris blanc.
- De 140 à 160 cm, un horizon C de texture limono-argileuse avec une teneur en argile plus faible. L'horizon est compact, plus humide et de couleur jaune-ocre. Les volumes gris/beige sont quasiment inexistants.

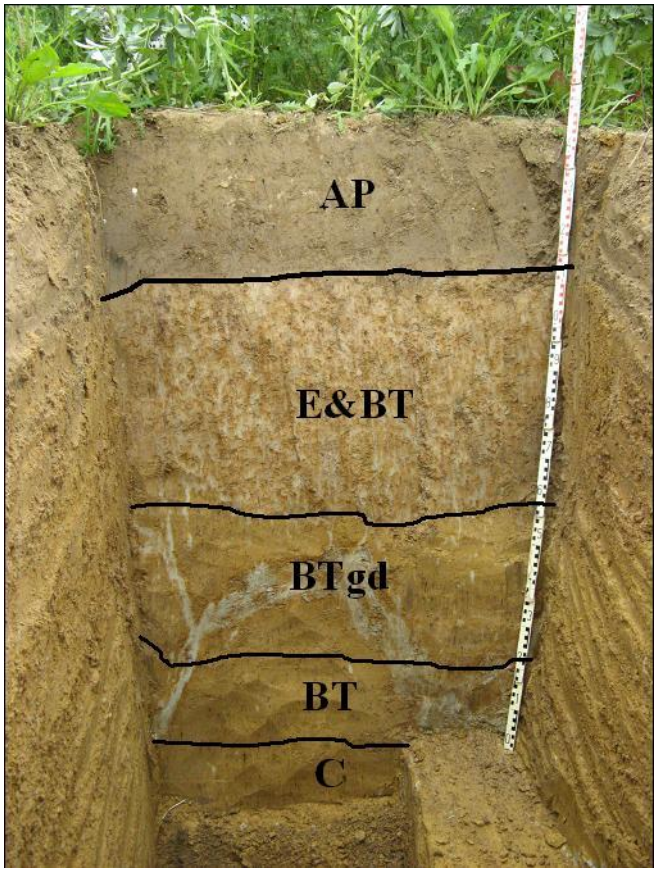


Figure A.1 : Profil du Luvisol de Heurtebise

Les échantillons ont été prélevés entre 145 et 155 cm, dans l'horizon C.

Le site de La Brosse : L1

Le sol sélectionné est un Luvisol, situé sur la commune de St Ouen de la Cour (61130) dans le département de l'Orne au lieu dit la Brosse (X= 470948 et Y= 2379798 ; coordonnées en Lambert 2 étendu). Les prélèvements ont été réalisés en avril 2010. La parcelle était alors cultivée en blé.

La description du profil est la suivante (figure A.2) :

- De 0 à 35 cm de profondeur, un horizon AP, de couleur brun, à texture limoneuse avec présence d'éléments organiques peu dégradés (chaumes, pailles…) et un réseau racinaire bien développé. L'activité biologique est importante (vers de terre et conduits de vers de terre nombreux).
- De 35 à 50 cm de profondeur, un horizon E de couleur brun jaune, à texture argilo-limoneuse, plus compact mais avec une activité biologique encore importante.

Figure A.2 : Profil du Luvisol de Brosse

Les échantillons d'intérêt ont été prélevés dans l'horizon E, entre 35 et 50 cm de profondeur.

<u>Le site de La Pilotière : L2</u>

Le Luvisol échantillonné est situé sur la commune de Ruillé sur Loir (72262) dans le département de la Sarthe au lieu dit la Pilotière (X= 471090 et Y= 2316012 ; coordonnées en Lambert 2 étendu). Les prélèvements ont été réalisés en avril 2010. La parcelle était alors cultivée en colza.

La description du profil est la suivante (figure A.3) :

- De 0 à 35 cm de profondeur, un horizon AP, de couleur brun, à texture limoneuse avec présence d'un réseau racinaire très développé. L'activité biologique est importante (vers de terre et conduits de vers de terre nombreux).

- De 35 à 50 de profondeur, un horizon E de couleur brun jaune, à texture limono-argileuse avec une activité biologique encore importante.

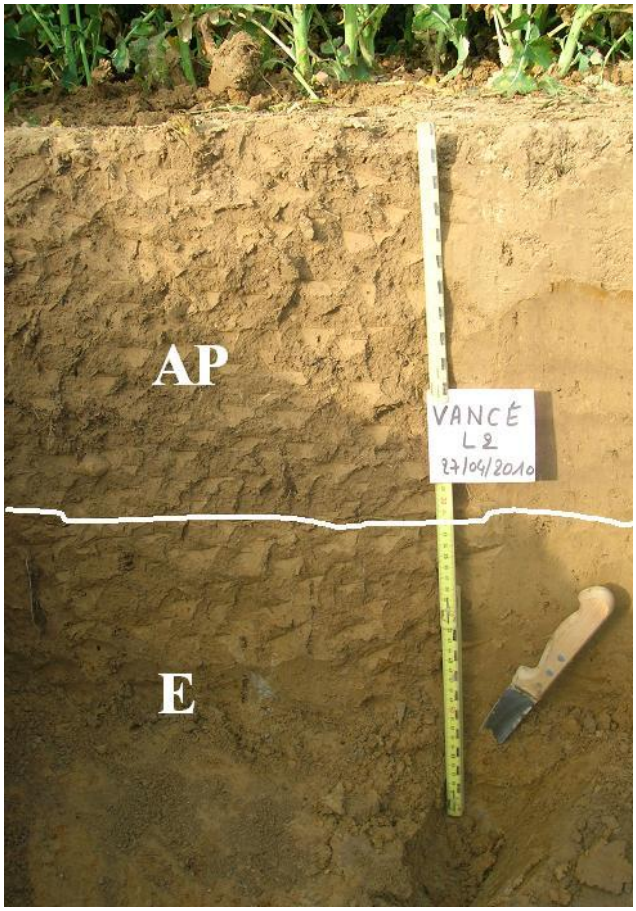


Figure A.3 : Profil du Luvisol de Vancé

Les échantillons d'intérêt ont été prélevés dans l'horizon E, entre 35 et 50 cm de profondeur.

La figure A.4 présente le cortège minéralogique de la fraction 0-2 µm du L0, du L1 et du L2. Les sites L0 et L1 présentent des smectites alors qu'elles sont absentes du L2. Celui-ci est principalement constitué de vermiculites, d'illites et de kaolinites (figure A.4c). La présence de smectites dans cet horizon au cours des expérimentations pourra donc être interprétée comme une arrivée de particules issues de l'horizon L1.

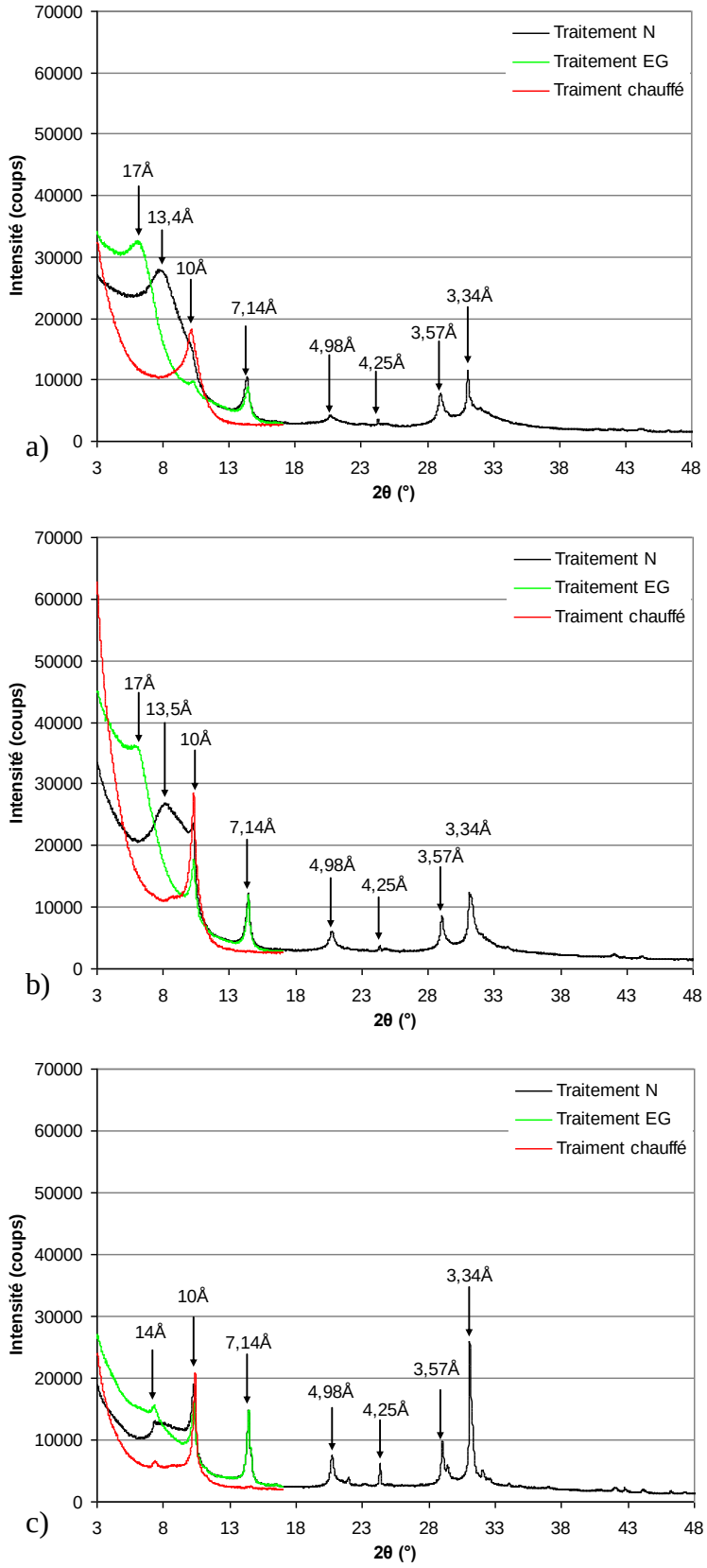
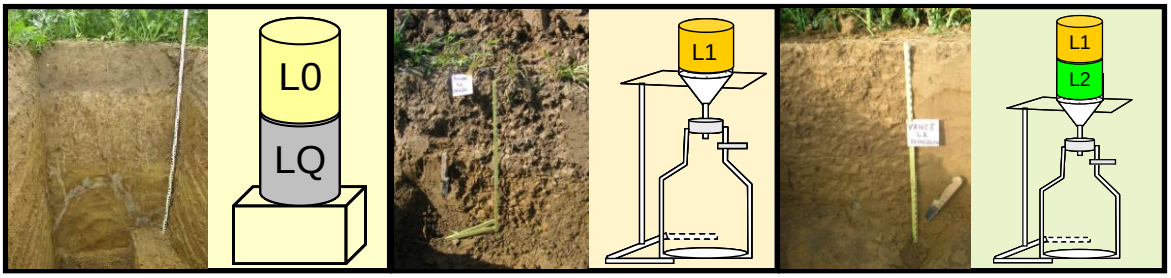


Figure A.4 : Diffractogrammes de la fraction 0-2 µm avec en noir le traitement normal, en vert le traitement EG et en rouge le traitement chauffé pour les sites de a) Heurtebise, b) La Brosse et c) La Pilotière

Table des matières



Sommaire **1**

Introduction générale **3**

Chapitre 1 : Le lessivage dans les Luvisols **9**

I. Introduction **13**

II. Conditions for lessivage: soil and climate characteristics **16**

2.1- Impact of chemical and physico-chemical mechanisms on particle mobilisation and deposition 16

2.2- Impact of physical and mechanical mechanisms on particle mobilisation and deposition 17

2.3- Pedo-climatic conditions that favour lessivage 18

III. Occurrence of lessivage in France based on the analysis of soil profiles from the French soil database, DoneSol. **19**

3.1- Characteristics of soils developed by lessivage (DoneSol) 19

3.1.1 Luvisols and Albeluvisols in France: the French soil database, DoneSol 19

3.1.2 Characteristics of Luvisols and Albeluvisols in France 20

3.2- Mass balance approach 22

3.2.1 Principle 22

3.2.2 Results 25

IV. Is the amount of vertical transfer of particles in soils sufficient to explain soil formation over pedological time? **27**

4.1- Determining the quantities of particles lost by soil during laboratory experiments described in the literature 27

4.1.1 Impact of the experimental setting on the transferred particles 29

4.1.2 Impact of environmental conditions on the particles transferred 30

4.2- Are the quantities of particles migrating through the soil sufficient for the observed B-horizon to develop over pedological time? 32

4.2.1 Duration of the formation of B-horizons 32

4.2.2 Estimated amount of particles transferred 36

V. Conclusion **37**

Chapitre 2 : Matériels, Méthodes et développements méthodologiques **39**

I. Introduction **41**

II. Matériel et méthode **43**

2.1- Quels matériaux utiliser pour remplir les colonnes ? 43
2.2- Quelles pluies simuler tant en terme de quantité (intensité x durée) qu'en terme de qualité de l'eau ? 47
2.2.1 Choix des événements pluvieux 47
2.2.2 Choix de la composition de l'eau 49
2.3- Choix de la taille des colonnes et du régime hydrique 50
2.3.1 Choix de la taille des colonnes 50
2.3.2 Choix du régime hydrique (durées des pluies et conditions initiales) 51
2.3.2.1 Caractéristiques générales 51
2.3.2.2 Intensité 20 mm/h 52
2.3.2.3 Intensité 6 mm/h 54
2.4- Caractérisation des propriétés hydrodynamiques des horizons d'intérêt 54
2.4.1 Méthodes de caractérisation des propriétés hydrodynamiques des horizons d'intérêt 54
2.4.1.1 Caractérisation de la conductivité hydraulique en régime saturé 54
2.4.1.2 Courbe de rétention en eau et conductivité hydraulique en régime insaturé par la méthode évaporatoire de Wind 55
2.4.1.3 Courbe de rétention en eau issue de données de presse à membrane de Richards 56
2.4.2 Propriétés hydrodynamiques des horizons d'intérêt 57
2.5- Descriptions des expérimentations d'éluviation et d'illuviation 59
2.5.1 Les dispositifs expérimentaux utilisés 59
2.5.1.1 L'expérimentation d'éluviation sur sol remanié L0 59
2.5.1.2 L'expérimentation d'éluviation sur sol non perturbé L1 62
2.5.1.3 Les expérimentations d'illuviation L1/L2 63
2.5.2 Analyses et mesures réalisées au cours des différentes expériences 65
2.6- Conclusion 68
III. Variabilité spatio-temporelle des conditions aux limites et initiales 69
3.1- Caractéristiques des conditions aux limites supérieure et inférieure 69
3.1.1 Condition à la limite supérieure : intensité de pluie et quantité de pluie 69
3.1.2 Condition à la limite inférieure : la succion appliquée à la base de chaque colonne. 74
3.1.2.1 Expérimentations L1 et L1/L2 75
3.1.2.2 Expérimentations L0/LQ 80

3.1.2.3 Comparaison des deux conditions à la limite inférieure entre les différentes expérimentations 82
3.2- Caractéristiques des conditions initiales 83
3.2.1. Evolution de l'état de surface des colonnes au cours des événements pluvieux 83
3.2.2. Potentiel matriciel dans le sol au début de chaque événement pluvieux 84
3.3- Conclusions 85
IV. Mesure de faibles quantités de particules migrantes 86
4.1- Quantification de particules fines allochtones dans un solide 86
4.1.1 Considérations générales 86
4.1.2 Présentation des échantillons analysés 88
4.1.2.1 Préparation d'échantillons standard 88
4.1.2.2. Analyse des échantillons issus des expériences de simulation de pluie 89
4.1.3 Méthodes 89
4.1.3.1 Quantification des argiles migrantes par mesure de l'évolution de la taille des particules inférieures à 2µm au granulomètre laser 89
4.1.3.2 Quantification des argiles migrantes par diffraction des rayons X 89
4.1.3.3 Quantification des argiles migrantes par quantification de Al et Fe extrait à l'eau régale 90
4.1.3.4 Quantification des argiles migrantes par spectroscopie infra-rouge moyen en réflexion totale atténuée 90
a. Analyse par infra-rouge moyen 90
b. Traitement des données 91
4.1.4 Résultats 92
4.1.4.1 Analyses de l'apport de particules 0-2 µm par granulométrie laser 92
4.1.4.2 Analyses de l'apport de particules 0-2 µm par DRX 93
a. Quantification de l'apport de particules 0-2 µm de L0 dans le LQ par DRX 93
b. Quantification de l'apport de particules 0-2 µm de L1 dans le L2 par DRX 95
4.1.4.3 Analyses de l'apport de particules 0-2 µm par la mesure des teneurs en Fe et Al extraites à l'eau régale 97

a. Etude des échantillons standards 97
b. Etude des échantillons issus des simulations de pluie 98
4.1.4.4 Analyses de l'apport de particules 0-2 µm par spectroscopie infra-rouge moyen 99
a. Etude des échantillons standards 99
b. Etude des échantillons issus des simulations de pluie 101
4.2- Quantification et identification des particules en suspension diluée 102
4.2.1 Méthode de quantification 102
4.2.1.1 Matériel d'étude 103
a. Fabrication d'échantillons standards 103
b. Echantillons des expérimentations de simulation de pluie 103
4.2.1.2 Résultats 104
4.2.2 Identification des particules en suspension 106
4.2.2.1 Principe 107
4.2.2.2 Limite de l'approche 109
4.3- Conclusion 112
V. Conclusion 113

Chapitre 3 : Quelles particules migrent dans les sols ? 115
I. Introduction 117
II. Quelle est la fraction granulométrique du sol qui migre ? Résultats expérimentaux sur colonnes de sol 118
III. Analyse des données de la littérature et proposition d'un nouveau protocole pour caractériser les particules mobilisées lors du lessivage 122
3.1- Les tests de dispersion : analyse de la littérature 122
3.2- Test de laboratoire permettant la caractérisation des particules mobilisées par le lessivage 125
3.2.1. Prétraitement des échantillons pour le test LE-WDC 125
3.2.2 Protocole du test LE-WDC 125
3.2.3 Analyse des suspensions obtenues 127
IV. Apport des tests de stabilité à l'identification de particules mobilisables par le lessivage 128
4.1- Matériel utilisé 128
4.2- Résultats 130
4.2.1 Quantité de particules libérées par le test LE-WDC 130

4.2.2 Minéralogie des particules dispersées par le test LE-WDC. Comparaison avec la minéralogie de la fraction totale 0-2 µm et des particules lessivées lors des expérimentations sur colonnes de sol 130
4.2.3. Distribution granulométrie des particules dispersées par le test LE-WDC 137
4.3 -Discussion et comparaison avec les données de la littérature 139
4.3.1 Impact du prétraitement sur le test LEWDC 139
4.3.2 Impact respectif de la nature du sol et des conditions expérimentales sur les résultats de tests LE-WDC rapportés dans la littérature 139
4.3.3 Représentativité du test LE-WDC en ce qui concerne le lessivage 142
V. Conclusion 145

Chapitre 4 : Eluviation expérimentale 147
I. Introduction 149
II.Concentrations de particules migrantes dans un Luvisol au cours d'expérimentations de pluies par rapport à celles migrantes dans d'autres types de sol 151
2.1- Evolution temporelle et inter-colonnes des concentrations de particules migrantes dans les colonnes L1 151
2.2- Evolution temporelle de la nature de ces particules 153
2.3- Impact des conditions expérimentales sur les concentrations en particules migrantes dans les sols: confrontation des données expérimentales des expérimentations L1 et L0/LQ 158
2.4- Les Luvisols produisent-ils plus de particules que les autres types de sol ? Confrontation avec les données expérimentales disponibles pour d'autres types de sols dans la littérature 160
2.5- Conclusion : concentrations et nature des particules migrantes dans un Luvisol 162
III. Les mécanismes de l'éluviation 163
3.1- Rôle des écoulements préférentiels par rapports aux écoulements matriciels sur les concentrations en particules 163
3.1.1 Fonctionnement hydrodynamique des colonnes 163
3.1.1.1 Hypothèses sur le fonctionnement des colonnes 163
3.1.1.2 Analyse des colonnes L0/LQ 165
3.1.1.3 Analyse des colonnes L1 165
3.1.2 Mise en évidence de l'importance quantitative de ces écoulements par modélisation sur le L1 172

3.1.3. Impact sur les concentrations en particules 174
3.2 Impact de la chimie de la solution du sol sur les concentrations en particules migrantes dans le sol 176
3.3 Conclusion : impact respectif des processus de transfert et des processus physico-chimique sur l'éluviation 178
IV. Quantités de particules perdues à l'échelle des expérimentations et extrapolation sur les temps de la pédogenèse. 179
4.1 Quantités de particules perdues et évolution temporelle à l'échelle de l'expérimentation 179
4.2 Bilan de masse et extrapolation sur les temps de la pédogenèse 181
4.3 Conclusion sur les quantités de particules perdues aux différentes échelles de temps 183
V. Conclusion 184

Chapitre 5 : Illuviation expérimentale 187
I. Introduction 189
II. Etude expérimentale de l'illuviation : caractérisation des particules qui migrent d'un horizon à l'autre 191
2.1- Concentration et nature des particules qui migrent à la base des colonnes L1/L2 191
2.1.1 Concentration de particules qui migrent 191
2.1.2 Nature minéralogique de particules migrées 195
2.2- Quantité de particules fixées dans la colonne 198
2.2.1 Comparaison des comportements hydrodynamiques pour les expérimentations 199
2.2.1.1 Comparaison des conditions a la limite inférieure 199
2.2.1.2 Comparaison des conditions initiales 200
2.2.1.3 Comparaison des quantités d'eau drainée 202
2.2.2 Quantités de particules exportées à la base des colonnes L1/L2, comparaison avec les quantités exportées dans l'expérimentation L1 et conclusion sur la fixation des particules dans le L2 204
2.2.2.1 Quantités de particules exportées à la base du L1/L2 205
2.2.2.2 Comparaison des quantités de particules entre L1 et L1/L2 206
2.3- Extrapolation sur les temps de la pédogenèse 209
III. Les mécanismes de l'illuviation 212
3.1- Mise en évidence du processus physique de filtration 212
3.1.1. Fonctionnement hydrodynamique des colonnes 212

3.1.2. Impact sur les concentrations en particules 214
3.2- Mise en évidence de processus physico-chimiques de fixation 216
IV. Conclusion **221**

Conclusions et perspectives **223**

Bibliographie **231**

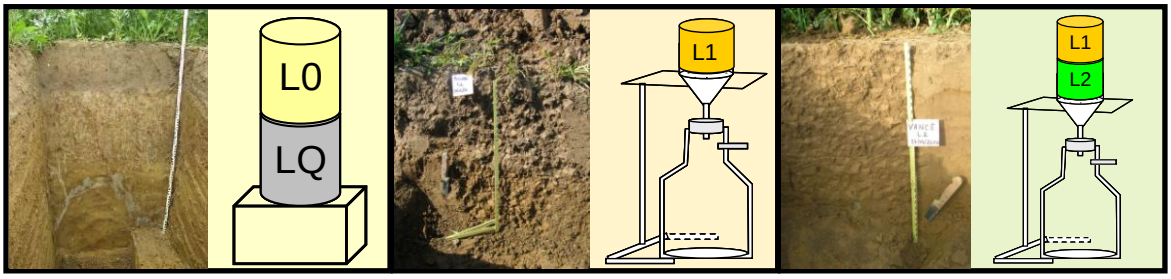
Annexe **245**

Table des matières **253**

Listes des figures **263**

Listes des tableaux **277**

Listes des figures



Chapitre 1 : Le lessivage dans les Luvisols

Figure 1.1: Sampling location of A) all of the soil profiles gathered in the DoneSol Database and B) all of the Luvisol and Albeluvisol profiles gathered in DoneSol. In the grey levels, the frequency of Luvisols and Albeluvisols in SMUs is derived from the French soil map (INRA, 1998) 20

Figure 1.2: Box Plot of the index of textural differentiation of the Luvisol and Albeluvisol sola. The box represents the upper and lower quartiles, with the median (in black with the associated value), the average (in grey), the smallest and highest values (open circles) and outliers (closed circles) 21

Figure 1.3: Box Plot of the pH of the A/E- and B-horizons for the Luvisol and Albeluvisol sola. The box represents the upper and lower quartiles with the median (in black with the associated value) and the average (in grey). The number of pH values is higher than the number of soil profiles, as several A/E- or/and B-horizons may be described in a single soil profile 21

Figure 1.4: Flow sheet of the approach performed to determine whether lessivage was the dominant soil forming process for the 1946 Luvisol and Albeluvisol profiles selected from DoneSol 23

Figure 1.5: Box plot of the bulk densities of B-horizons (A) and C-horizons (B). The 1st and 3rd quartiles were considered as the minimum and maximum bulk densities, respectively. Data are from the Solhydro database that was compiled at the Unité de Science du Sol, INRA (France), and today, it includes about 700 measurements of the gravimetric water content of different types of soils. The box represents the upper and lower quartiles with the median (in black with the associated value) and the average (in grey) 25

Figure 1.6: Particle concentration in drainage water as a function of column height, all other experimental conditions being kept constant. The analysed results are from studies by Zhuang et al. (2007), Shang et al. (2008) and Sharma et al. (2008). The box represents the upper and lower quartiles with the median (in black with the associated value) and the average (in grey) 30

Figure 1.7: Box plot of particle concentration as a function of soil lutum content. The analysed results are from studies by Sharma et al. (2008) and Kjaergaard et al. (2004b). The box represents the upper and lower quartiles with the median (in black with the associated value) and the average (in grey) 31

Figure 1.8: Range of particle concentrations at the outlet of the columns depending on different experimental conditions. 32

Figure 1.9: Location of the Luvisols and Albeluvisols formed mainly by lessivage, with loess as the parent material. The grey level represents the abundance of loess as the parent material of soils derived from the French soil map as a percentage of SMUs (INRA, 1998) 33

Figure 1.10: For the 11 considered soil profiles: the duration of decarbonation and desaturation, the duration of lessivage and the period of time over which lessivage stops as pH reaches values higher or lower than 6.5 and 5.5, respectively 36

Chapitre 2 : Matériel, Méthode et développement méthodologique

Figure 2.1: Principe général des expérimentations 41

Figure 2.2 : Propriétés hydrodynamiques des sols étudiés .a) Courbes de rétention en eau ; b) Courbes de conductivité hydrauliques pour L1 et L2. Ces courbes ont été modélisées à partir des données obtenues par presse à membrane pour L0 et par méthode évaporatoire de Wind pour L1 et L2. Sur L1 et L2, les courbes ne sont valides que dans la gamme tensiomètrique (de -50 hPa à -800 hPa) 58

Figure 2.3 : Assemblage des cylindres et plaque de support 60

Figure 2.4 : Déroulement de la fabrication des cylindres 61

Figure 2.5 : Déroulement de l'expérimentation éluviation sur sol remanié pour les intensités de pluie 20 mm/h et 6 mm/h 62

Figure 2.6 : Schéma de la mise en place des colonnes et instrumentations pour l'expérimentation d'éluviation avec le sol L1 62

Figure 2.7 : Photos de l'expérimentation 64

Figure 2.8 :	Schéma de la mise en place des colonnes pour l'expérimentation d'illuviation avec les sols L1 et L2	64
Figure 2.9 :	Déroulement temporel des expérimentations pour a) l'intensité 20 mm/h et b) l'intensité 6 mm/h. Les pluies en gras et italiques ont été renommées suite à l'accident survenu sur le simulateur de pluie	70
Figure 2.10 :	Evolution temporelle des intensités de pluies reçues pour les différentes colonnes des différentes expérimentations pour a) l'intensité 20 mm/h et de b) l'intensité 6 mm/h. Les numéros de pluies présentés en abscisse correspondent au n° de pluie de l'expérimentation L0/LQ	71
Figure 2.11 :	Energie de pompage cumulées (hPa*h) pour chaque colonne des expérimentations L1 et L1/L2 pour a) l'intensité 20 mm/h et b) l'intensité 6 mm/h	76
Figure 2.12 :	Evolution temporelle des temps de pompage et des dépressions appliquées à la base des colonnes L1 de a) l'intensité 20 mm/h b) de l'intensité 6 mm/h	77
Figure 2.13:	Evolution temporelle des temps de pompage et des dépressions appliquées à la base des colonnes L1/L2 de l'intensité 20 mm/h	78
Figure 2.14 :	Evolution temporelle des temps de pompage et des dépressions appliquées à la base des colonnes L1/L2 de l'intensité 6 mm/h	79
Figure 2.15 :	Evolution temporelle du potentiel matriciel au cours des différents cycles « pluie-séchage » pour le tensiomètre situé à 5 cm dans le LQ pour a) l'intensité 20 mm/h et b) l'intensité 6 mm/h	81
Figure 2.16 :	Energie de pompage cumulée (hPa*h) pour les intensités 20 mm/h et 6 mm/h des expérimentations L0/LQ	82
Figure 2.17:	Distribution des différentes classes d'état de surface pour les expérimentations L1 et L1/L2	84
Figure 2.18 :	Evolution temporelle du potentiel matriciel avant la pluie, à 5 cm de profondeur, pour les différentes expérimentations	85
Figure 2.19 :	Modèle simple d'une molécule diatomique : les deux masses m_1 et m_2 sont liées par un ressort caractérisé par la constante de rappel k	91
Figure 2.20:	Distribution granulométrique du 0-2 µm des deux pôles purs L1 et L2 et des 10 mélanges de 0-2 µm de L1 dans L2	92

Figure 2.21 :	Droite de mélanges des deux modes issus de la distribution granulométrique pour 8 mélanges de 0-2 µm de L1 dans L2	93
Figure 2.22 :	Diffractogrammes des lames glycolées de la fraction 0-2 µm des échantillons LQ, L0 et des 10 mélanges de 0-2 µm de L0 dans LQ	94
Figure 2.23 :	Droite de calibration de la mesure de l'abondance de L0 dans le LQ déterminée par la mesure par DRX de l'intensité du pic 001 de la smectite	94
Figure 2.24 :	Diffractogrammes des lames glycolées de la fraction 0-2 µm des échantillons L1, L2 et des 10 mélanges de 0-2 µm de L1 dans L2	95
Figure 2.25 :	Droite de calibration de la mesure de l'abondance de L1 dans le L2 déterminée par la mesure par DRX de l'intensité du pic 001 de la smectite	96
Figure 2.26 :	Rapport Fe/Al déterminé par la méthode d'extraction à l'eau régale pour les deux pôles pures 0-2 µm de L0 et sol total de LQ et pour les 11 échantillons standards	97
Figure 2.27 :	Droite de calibration de la mesure de l'abondance de 0-2 µm de L0 dans le LQ déterminée par la mesure des concentrations en fer et en aluminium extraites à l'eau régale	98
Figure 2.28 :	Signal des pôles purs de 0-2 µm du L0, LQ total et des argiles de références (chlorite et montmorillonite) dans la zone des liaisons Si-O et Al-O en IR-ATR	99
Figure 2.29 :	Signal des 5 premières composantes de la PLS	100
Figure 2.30 :	Droite de calibration à 4 composantes déterminée par la méthode PLS sur des résultats d'infra rouge dans la zone allant de 1052 cm^{-1} à 802 cm^{-1} pour 12 échantillons standards	101
Figure 2.31 :	Pourcentage de 0-2 µm de L0 dans le LQ déterminé à l'IR-ATR pour les différents arrêts pour les 5 profondeurs de LQ et pour les particules présentes dans l'eau de drainage (point au-delà de 18 cm). a) intensité 20mm/h et b) intensité 6mm/h	102

Figure 2.32 : Droites de calibration du turbidimètre pour les fractions : a) 0-100 µm du L1 pour les gammes allant de 0,1 à 1 g/L (à gauche) et 1 à 8 g/L (à droite) b) 0-10 µm du L1 pour des gammes allant de 0,05 à 0,8 g/L (à gauche) à 0,5 à 4 g/L (à droite) et c) 0-2 µm du L1 pour des gammes allant de 0,05 à 0,5 g/L (à gauche) à 0,5 à 4 g/L (à droite) 105

Figure 2.33 : Valeurs de turbidimétrie obtenues pour les standards de concentrations a) 0,08 g/L et 0,5 g/L et b) 1 g/L et 4 g/L. En noir est représenté la valeur de référence et en rouge l'écart accepté par rapport cette valeur 106

Figure 2.34 : Diffractogrammes des lames normales et glycolées des fractions 0-2 µm L1, 0-0,02 µm L1 et 0-2 µm L2 108

Figure 2.35 : Résultats des traitements MCR-ALS des diffractogrammes des suspensions collectées à la base du L1 109

Figure 2.36 : a) distribution granulométrique et b) diffractogrammes des lames N de la fraction 0-2 µm du sol L1 et de la suspension récoltée après les pluies 6 (a) et 15 (b) pour l'intensité 20 mm/h de l'expérimentation L1 110

Figure 2.37 : Contribution du a) 0-2 µm et 0-0,2 µm du L1 et b) du 0-2, 0-0,2 et 0-5 µm du L1 au diffractogramme des rayons X normal de la suspension récoltée après la pluie 15, 20 mm/h. Pour faciliter la déconvolution le bruit de fond a été enlevé 111

Chapitre 3 : Quelles particules migrent dans les sols ?

Figure 3.1 : Concentration en particules dans l'eau percolée des expérimentations sur les colonnes L1. De haut en bas 0-10 µm en fonction de 0-100 µm ; 0-2 µm en fonction de 0-10 µm et 0-2 µm en fonction de 0-100 µm pour a) l'intensité 20 mm/h et b) l'intensité 6 mm/h 120

Figure 3.2 : Concentration en particules dans l'eau percolée des expérimentations sur les colonnes L1/L2. De haut en bas 0-10 µm en fonction de 0-100 µm ; 0-2 µm en fonction de 0-10 µm et 0-2 µm en fonction de 0-100 µm pour a) l'intensité 20 mm/h et b) l'intensité 6 mm/h 121

Figure 3.3 : Description synthétique du protocole du test LE-WDC utilisé dans cette étude 126

Figure 3.4 : Diffractogrammes obtenus sur la fraction 0-2 µm totale du sol, et la fraction 0-2 µm des suspensions issues du test LE-WDC après un prétraitement à pF6 ou à pF2,5 pour le sol L0. a) Traitement N et b) Traitement EG 131

Figure 3.5 : Diffractogrammes obtenus sur la fraction 0-2 µm totale du sol, et la fraction 0-2 µm des suspensions issues du test LE-WDC après un prétraitement à pF6 ou à pF2,5 pour le sol L1. a) Traitement N et b) Traitement EG 132

Figure 3.6 : Diffractogrammes obtenus la fraction 0-2 µm des suspensions issues du test LE-WDC après un prétraitement à pF6 ou à pF2,5 pour le sol L1 et pour les particules 0-2 µm lessivées lors des expérimentations sur colonnes de sol L1 . a) Traitement N et b) Traitement EG 133

Figure 3.7 : Facteurs d'enrichissement obtenus pour différentes espèces minéralogiques du sol L0 déterminées sur lames orientées par DRX pour les suspensions issues du test LE-WDC par rapport à la fraction 0-2 µm totale du sol. a) Traitement N et b) Traitement EG. La zone grise représente la zone pour laquelle il n'y a pas de fractionnement 135

Figure 3.8 : Facteurs d'enrichissement obtenus pour différentes espèces minéralogiques du sol L1 déterminées sur lames orientées par DRX pour les suspensions issues du test LE-WDC par rapport à la fraction 0-2 µm totale du sol. a) Traitement N et b) Traitement EG. La zone grise représente la zone pour laquelle il n'y a pas de fractionnement 135

Figure 3.9 : Facteur d'enrichissement des différentes espèces minéralogiques pour les suspensions obtenues après différentes pluies à la base des colonnes de L1 par rapport a) aux suspensions obtenues par le test LE-WDC après un prétraitement à pF6 b) aux suspensions obtenues par le test LE-WDC après un prétraitement à pF2,5 et c) à la fraction 0-2 µm totale du sol. Résultats obtenus par DRX sur lames orientées normales (voir note n°2 p127 pour la légende) 136

Figure 3.10 : Distribution granulométrique de la fraction 0-2 µm totale du sol et des particules dispersées par les tests LEWDC pour a) L0, b) L1 et c) des particules collectées à la base d'expérimentations sur les colonnes L1 138

Figure 3.11 : Comparaison entre les concentrations en particules résultant des tests LE-WDC et les concentrations en particules mesurées à la base d'expérimentations sur colonne de sol après 3 volumes poraux drainés 144

Chapitre 4 : Eluviation expérimentale

Figure 4.1 : Evolution temporelle de la concentration de particules de taille 0-2 µm mesurée à la base des colonnes de sol pour l'expérimentation L1.Intensité 20 mm/h : a) en fonction du numéro de la pluie, b) en fonction du volume drainé en mm. Intensité 6 mm/h c) en fonction du numéro de la pluie, d) en fonction du volume drainé en mm. Les figurés vides représentent les concentrations estimées (voir chapitre 3) et les figurés pleins les concentrations mesurées 152

Figure 4.2 : Cortège minéralogique de la fraction 0-2 µm brute du sol L1 et des particules collectées pour les pluies 1, 2-5, 6 et 15. a) Intensité 20 mm/h et b) Intensité 6 mm/h. Traitement N (à gauche) et traitement EG (à droite) 154

Figure 4.3 : Distribution granulométrique des particules collectées à la base d'expérimentations sur colonne de L1 non perturbée et de la fraction 0-2 µm totale du sol L1. 155

Figure 4.4 : Contribution de la fraction 0-2 µm et 0-0,2 µm du L1 au mélange de particules collectées à la base des colonnes de L1 au cours des différentes pluies estimée par analyse MCR-ALS des diffractogrammes des rayons X obtenus sur lames orientées glycolées. a) Intensité 20 mm/h b) Intensité 6 mm/h 157

Figure 4.5 : Evolution temporelle de la concentration de particules de taille 0-2 µm mesurée à la base des colonnes de sol pour l'expérimentation L0. a) en fonction du numéro de la pluie, b) en fonction du drainage cumulé. Pour mémoire les concentrations de 0-2 µm de L0 dans LQ ont été mesurées par infra-rouge moyen sur différentes couches du LQ et sur les particules collectées dans le bac sous-jacent. Les concentrations présentées dans cette figure résultent d'un calcul de moyenne pondérée sur les différentes couches et le bac 159

Figure 4.6 : Image de tomographie au rayon X de l'état initial de la colonne I de l'intensité 20mm/h. Suivi d'un macropore percolant sur toutes la hauteur de la colonne 164

Figure 4.7 : Quantité de pluie reçue et quantité d'eau drainée par les différentes colonnes des expérimentations L0/LQ. a) Intensité 20 mm/h b) Intensité 6 mm/h 165

Figure 4.8 : Synthèse des résultats d'expérimentation sur toutes les colonnes L1 166

Figure 4.9 : Quantités de pluie, quantités d'eau drainée, pourcentage d'eau drainée pendant la pluie, énergie de pompage pour les différentes colonnes de l'expérimentation L1. a) Intensité 20 mm/h b) Intensité 6 mm/h. Les caractéristiques des colonnes surlignées en gris dans la légende sont sur l'axe secondaire 168

Figure 4.10 : Quantité d'eau drainée en fonction de la quantité d'eau de pluie reçue pour chaque colonne de l'expérimentation L1. a) Intensité 20 mm/h b) Intensité 6 mm/h. (Pour l'intensité 6 mm/h, la pluie 14 n'a pas été prise en compte et les points extrêmes en rose n'ont pas été pris pour réaliser la droite de régression) 169

Figure 4.11 : Quantité d'eau drainée après la pluie en fonction de l'état de surface pour chaque colonne de l'expérimentation L1. a) Intensité 20 mm/h b) Intensité 6 mm/h 170

Figure 4.12 : Evolutions du potentiel matriciel à 5 et 10 cm de profondeur, mesurées sur les colonnes K et AG et simulées par modélisation. a) simulation de la pluie 11 pour 20 mm/h, b) simulation de la pluie 7 pour 6 mm/h 173

Figure 4.13 : Concentrations en particules, pourcentage d'eau drainée pendant la pluie et énergie de pompage pour les colonnes de l'expérimentation L1. a) Intensité 20 mm/h et b) Intensité 6 mm/h. Les colonnes surlignées en gris dans la légende sont représentées sur l'axe secondaire 175

Figure 4.14 : Evolution des concentrations en cations majeurs et en Cl^-, du pH et de la conductivité électrique de la solution du sol collectée par bougie poreuse dans les colonnes des expérimentations L1 et L0/LQ. La zone grisée correspond aux propriétés de l'eau de pluie 177

Figure 4.15 : Evolution des quantités cumulées de particules exportées en fonction des quantités d'eau drainée cumulée pour chaque colonne de l'expérimentation L1. a) Intensité 20 mm/h b) Intensité 6 mm/h. Les figurés vides représentent les concentrations estimées et les figurés pleins les concentrations mesurées 180

Figure 4.16 : Evolution des quantités de particules 0-2 µm exportées du L0 en fonction des quantités d'eau drainée cumulée pour les deux intensités 181

Chapitre 5 : Illuviation experimentale

Figure 5.1 : Principe conceptuel du dispositif expérimental 190

Figure 5.2 : Evolution temporelle de la concentration de particules de taille 0-2 µm mesurée à la base des colonnes de sol pour l'expérimentation L1/L2. Intensité 20 mm/h : a) en fonction du numéro de la pluie, b) en fonction du volume drainé en mm. Intensité 6 mm/h c) en fonction du numéro de la pluie, d) en fonction du volume drainé en mm. Les figurés vides représentent les concentrations estimées (voir chapitre 3) et les figurés pleins les concentrations mesurées 192

Figure 5.3 : Synthèse des résultats pour l'expérimentation sur les colonnes L1/L2 194

Figure 5.4 : Cortège minéralogique pour les traitements N (à gauche) et EG (à droite) de la fraction 0-2 µm des pluies 1, 2-5, 6 et 15 de a) l'intensité 20 mm/h et b) l'intensité 6 mm/h et de la fraction 0-2 µm du L1 et L2 bruts 196

Figure 5.5 : Contribution des fractions 0-0,2 µm L1, 0-2 µm L1 et 0-2 µm L2 dans chaque suspension collectée à la base des colonnes L1/L2 pour les pluies de a) l'intensité 20 mm/h et b) l'intensité 6 mm/h. Ces contributions ont été obtenues par traitement MCR-ALS des diffractogrammes des rayons X des lames orientées glycolées 197

Figure 5.6 : Comparaison de la dépression appliquée à la base du L1 de l'expérimentation éluviation et du potentiel matriciel mesuré par tensiomètre à 20 cm de profondeur dans le L2 de l'expérimentation illuviation. Exemple de la pluie 8 pour a) l'intensité 20 mm/h et b) l'intensité 6 mm/h 200

Figure 5.7 : Evolution des potentiels matriciels à 5 et 10 cm de profondeur dans le L1 de l'expérimentation éluviation (L1) et dans le L1 de l'expérimentation illuviation (L1/L2). a) Intensité 20 mm/h et b) Intensité 6 mm/h 201

Figure 5.8 : Quantités d'eau drainée cumulée en fonction des quantités d'eau de pluie reçues cumulées pour a) l'intensité 20 mm/h et b) l'intensité 6 mm/h. A gauche pour les colonnes L1/L2 et à droite pour les colonnes L1/L2 et les colonnes de L1 seul 203

Figure 5.9 : Groupes de colonnes L1 et L1/L2 avec des dynamiques de drainage similaires pour une quantité d'eau reçue de 500 mm. a) intensité 20 mm/h et b) intensité 6 mm/h 204

Figure 5.10 : Quantités de particules 0-2 µm cumulées en fonction des quantités d'eau drainée cumulées pour chaque colonne L1/L2. a) Intensité 20 mm/h ; b) Intensité 6 mm/h. Les symboles vides représentent les concentrations estimées et les symboles pleins les concentrations mesurées 205

Figure 5.11 : Exemple, pour l'intensité 20 mm/h, des différents comportement rencontrés par rapport à l'exportation de particules à la base des colonnes L1/L2 et des colonnes L1 et ce pour 250 mm de drainage 208

Figure 5.12 : Evolution du drainage pendant la pluie et des énergies de pompage au cours des 19 événements pluvieux 213

Figure 5.13 : Relation entre concentration de particules perdues à la base des colonnes, pourcentage de drainage pendant la pluie et énergie de pompage. Un exemple par famille de fonctionnement est présenté. a) colonne O ; b) Colonne R ; c) Colonne V 215

Figure 5.14 : pH, conductivité, Na^+, K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+} et Cl^- de l'eau des bougies poreuses situées à 5 cm et 12 cm dans le L1 de la colonne L1 et de la colonne L1/L2 pour l'intensité à 20 mm/h. La zone grisée représente la gamme de composition de l'eau de pluie (eau osmosée) 217

Figure 5.15 : Concentration en calcium dans la solution du sol de l'horizon L1 de la colonne O et concentrations en particules collectées à la base de cette colonne. Evolution au cours du temps 218

Figure 5.16 : pH, conductivité, Na^+, K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+} et Cl^- de l'eau des bougies poreuses situées à 5 cm, 12 cm, 20 cm et 27 cm dans les colonnes O et AK de l'expérimentation L1/L2 pour les deux intensités. La zone grisée représente la gamme de composition de l'eau de pluie (eau osmosée) 219

Figure 5.17 : Concentration de particules collectées à la base des colonnes O et AK en fonction de la conductivité de la solution du sol de l'horizon L2 pour les deux intensités de pluies 220

Annexe 1 : Présentation des sites d'études

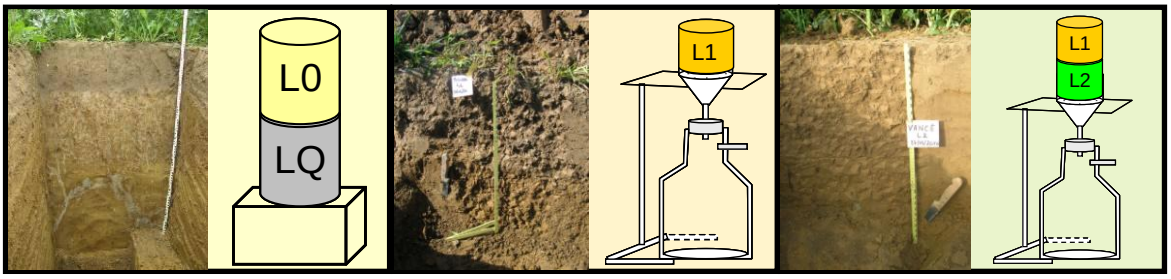
Figure A.1 : Profil du Luvisol de Heurtebise 248

Figure A.2 : Profil du Luvisol de Brosse 249

Figure A.3 : Profil du Luvisol de Vancé 250

Figure A.4 : Diffractogrammes de la fraction 0-2 µm avec en noir le traitement normal, en vert le traitement EG et en rouge le traitement chauffé pour les sites de a) Heurtebise, b) La Brosse et c) La Pilotière 251

Listes des tableaux



Introduction générale

Tableau 1 : Objectif des deux approches développées dans ce travail 7

Chapitre 1 : Le lessivage dans les Luvisols

Table 1.1: WRB soil types in which lessivage occurs according to Bockheim and Gennadiyev (2000), including the importance of lessivage in these soil types, the surfaces covered and the locations of these soils along with the climates they now experience 15

Table 1.2: Dominant soil forming processes for the 1946 Luvisols and Albeluvisols selected from DoneSol, identified using the approach described in figure 5 (see above) 26

Table 1.3: Distribution of the 119 column experiments according to the different experimental settings and natural conditions used. A) Column height varied from 3 cm to 60 cm and was grouped into the following 3 classes of heights: (1) small, which includes columns less than 10 cm height, (2) medium, which includes columns ranging from 20 cm to 30 cm and, (3) large, which includes columns taller than 50 cm. B) Classes of pH were defined according to the method described in the first part of this paper. C) Classes of lutum were based on texture classes (%) (Jamagne, 1967). D) Seven rainfall classes were based on a typology of rain events. Condition settings, for which experiments were performed in the literature, were greyed. Crosses represent the conditions favourable to lessivage (no experiment). Numbers represent the number of experiments performed under each set of conditions 28

Table 1.4: Shape of the particle breakthrough curves as a function of the lower boundary condition 29

Table 1.5: Characteristics of the loess compiled from the literature 33

Table 1.6: Range of rainfall, evapotranspiration, effective rainfall and decarbonation rates for different periods of time considered over the last 15000 years 34

Table 1.7: For the 11 considered soil profiles: quantity of particles eluviated from the A/E-horizons and accumulated in the B-horizon and thickness of parent material assumed to be decarbonised before the start of lessivage; pH of the upper soil horizon and estimation of the quantity of particles exported over the period of time during which lessivage occurs 35

Chapitre 2 : Matériel, Méthode et développement méthodologique

Tableau 2.1 : Conditions pédologiques favorables respectivement à l'éluviation et à l'illuviation (d'après le chapitre 1) 43

Tableau 2.2 : Caractéristiques des sols choisis sur la base des données du RMQS 44

Tableau 2.3 : Synthèse des propriétés des trois limons prélevés 46

Tableau 2.4 : Répartition en classes des intensités horaires obtenues sur le site de Mons pour les mois de juin à septembre des années 1994-2010 ainsi que leur fréquence d'apparition. En vert sont surlignées les pluies correspondant à des orages 48

Tableau 2.5 : Répartition en classes des intensités horaires obtenues sur le site de Mons pour les mois de novembre à février des années 1994-2011 ainsi que leurs fréquences d'apparition. En vert sont surlignées les pluies proches de l'intensité de 6 mm/h choisie pour nos expérimentations 49

Tableau 2.6 : Concentrations en anions et cations des différentes eaux étudiées 50

Tableau 2.7 : Valeurs moyennes et écart type du pH, de la conductivité et des anions et cations majeurs de l'eau osmosée (utilisée pour les pluies) 50

Tableau 2.8 : Résultats des différents tests réalisés sur la durée des pluies, la condition initiale et la condition de séchage pour les intensités 20 mm/h et 6 mm/h à partir des cylindres de sol remanié de limon L0 posés sur un limon de quartz tous les deux fabriqués à une masse volumique apparente de 1,45 g.cm^3 53

Tableau 2.9 : Paramètres de l'ajustement du modèle de Van Genuchten aux données expérimentales obtenues par presses à membrane sur le sol de Heurtebise (sol remanié), et par expérimentations de Wind sur les sols de la Brosse et la Pilotière (sols non perturbés). La conductivité hydraulique à saturation a été mesurée par la méthode du perméamétre à charge constante 57

Tableau 2.10 :	Avantages et inconvénients des deux dispositifs expérimentaux	59
Tableau 2.11 :	Récapitulatif des instrumentations présentes sur les différentes colonnes pour les deux intensités de pluie	61
Tableau 2.12 :	Récapitulatif des instrumentations présentes sur les différentes colonnes pour les deux intensités de pluies	63
Tableau 2.13 :	Récapitulatif des instrumentations présentes sur les différentes colonnes pour les deux intensités de pluies	64
Tableau 2.14 :	Synthèse des différentes analyses réalisées pour chaque expérimentation	66
Tableau 2.15 :	Typologie pour déterminer l'état de surface de chaque cylindre avant la pluie	67
Tableau 2.16 :	Intensités de pluies et quantités d'eau reçues par les différentes colonnes de l'expérimentation L0/LQ	72
Tableau 2.17 :	Intensités de pluies et quantités d'eau reçues par les différentes colonnes de l'expérimentation L1	72
Tableau 2.18 :	Intensités de pluies et quantités d'eau reçues par les différentes colonnes de l'expérimentation L1/L2	73
Tableau 2.19 :	Eléments descriptifs de l'évolution temporelle du potentiel matriciel au cours des cycles « pluie-séchage » pour le tensiomètre situé à 5 cm dans le LQ	82
Tableau 2.20 :	Différentes classes d'état de surface des colonnes	83
Tableau 2.21 :	Récapitulatif des différentes approches testées pour les différentes expérimentations selon la fraction concernée	87
Tableau 2.22 :	Récapitulatif des échantillons préparés pour chaque méthode de quantification utilisée	88
Tableau 2.23 :	Analyse des standards utilisés pour valider la droite de calibration de 0-2 µm de L0 dans le LQ	95
Tableau 2.24 :	Analyse des standards utilisés pour valider la droite de calibration de 0-2 µm de L1 dans le L2	96
Tableau 2.25 :	Concentrations en fer et aluminium extraites à l'eau régale dans les trois premiers centimètres du LQ pour les différents arrêts 20 mm/h et 6 mm/h	98

Tableau 2.26 : Analyse des standards utilisés pour valider la droite de calibration à 4 composantes de 101

Tableau 2.27 : Analyse des standards utilisés pour valider la droite de calibration du turbidimètre pour la fraction 0-100 µm du L1 pour les gammes allant de 1 à 8 g/L et de 0,1 à 1 g/L, 0-10 µm pour les gammes allant de 0,05 à 0,8 g/L et de 0,5 à 4 g/L et 0-2 µm pour les gammes allant de 0,05 à 0,5 g/L et de 0,5 à 4 g/L 104

Chapitre 3 : Quelles particules migrent dans les sols ?

Tableau 3.1 : Différents tests de stabilité existant dans la littérature : objectifs et mise en œuvre 123

Tableau 3.2 : Caractéristiques pédologiques et minéralogiques des sols utilisés dans les tests LE-WDC. Pour la minéralogie la correspondance est la suivante : - absente ; (+) trace ; + un peu ; ++ présente ; +++ abondante ; ++++ dominante 129

Tableau 3.3 : Quantités de particules libérées par les tests LE-WDC pour les deux sols L0 et L1. Un test de comparaison des moyennes au seuil de 5 % (test de Fisher) a été réalisé. Les résultats sont indiqués par des lettres en exposant dans le tableau 130

Tableau 3.4 : Caractéristiques pédologiques et minéralogiques des sols utilisés dans les tests LE-WDC. Pour la minéralogie la correspondance est la suivante : - absente ; (+) trace ; + un peu ; ++ présente ; +++ abondante ; ++++ dominante 140

Tableau 3.5 : Quantités de particules libérées par les tests LE-WDC pour les différents sols 141

Tableau 3.6 : Quantités de particules libérées à la base de colonnes des différents sols après 3 volumes poraux drainés 144

Chapitre 4 : Eluviation expérimentale

Tableau 4.1 : Valeurs moyenne, minimum, maximum et modale des concentrations en particules collectées à la base des colonnes de l'expérimentation L1 pour les deux intensités de pluie 153

Tableau 4.2 : Concentrations en particules collectées à la base des colonnes de différentes expériences de la littérature et de cette étude, ainsi que les conditions expérimentales associées 161

Tableau 4.3 : Récapitulatif des différents types de fonctionnements hydrodynamiques des colonnes pour les expérimentations L1 et L0/LQ 174

Tableau 4.4 : Nombre d'années climatiques nécessaire pour exporter la quantité de particules perdues par l'horizon E des sols 79320 et 84745 de la base de données DoneSol 183

Chapitre 5 : Illuviation expérimentale

Tableau 5.1 : Valeurs moyenne, minium, maximum et modale des concentrations en particules collectées à la base des colonnes de l'expérimentation d'illuvation L1/L2 pour les deux intensités de pluie 191

Tableau 5.2 : Exportation de particules à la base des colonnes L1/L2 et des colonnes L1 ayant un comportement comparable, pour 250 mm de drainage et quantités de particules fixées dans le L2 déduites de ces exportations 206

Tableau 5.3 : Drainage nécessaire et nombre d'événements pluvieux associés pour observer une fixation de 2 % de particules 0-2µm de l'horizon L1 dans la fraction 0-2 µm de l'horizon L2 209

Tableau 5.4 : Processus majeur de la formation des profils des 1163 Luvisols de la base de données Donesols développés sur un seul matériau parental 210

Tableau 5.5 : Durée nécessaire pour former par lessivage l'horizon BT de Luvisols développés sur Loess selon le taux de fixation dans le BT des particules mise en suspension dans l'horizon E. Comparaison avec la durée maximale possible pour le lessivage pour ces sols (en gras le temps de formation du BT est compatible avec la durée maximale possible du lessivage, en italique le temps de formation du BT est incompatible avec la durée maximale possible du lessivage) 211

Laurence QUÉNARD

Analyse d'un processus pédogénétique par une approche expérimentale : le lessivage des argiles dans le sol

Résumé :

Le lessivage, compris comme la translocation de particules fines dans les sols à partir d'un horizon dit éluvié vers un horizon d'accumulation dit illuvié, est considéré comme un processus pedogénétique majeur. Il a été décrit dans de nombreux sols mais reste assez peu connu, mal caractérisé et son existence même est encore sujette à débat dans la communauté scientifique. Pour améliorer nos connaissances, ce projet a eu pour objectif de mettre en place des expérimentations au laboratoire pour permettre une quantification et une approche cinétique du lessivage. Nous avons ainsi construit trois dispositifs expérimentaux, deux étant dédiés à l'étude de l'éluviation sur sols remaniés et non perturbés, et le troisième dédié à l'étude de l'illuviation. Ces expériences associées à une approche de bilan de masse sur les bases de données pédologiques existantes nous ont permis de : (i) déterminer la nature des particules migrantes, (ii) quantifier les particules mobilisées et identifier certains processus responsables de cette mobilisation, (iii) quantifier les quantités de particules fixées au sein des horizons d'accumulation et identifier quelques processus responsables de cette fixation, (iv) déterminer l'impact de la structure du sol et des événements climatiques extrêmes sur le lessivage, (v) extrapoler ces résultats expérimentaux sur les durées de la pédogenèse et les confronter aux profils de sols décrits dans la littérature.
Nos résultats montrent que : (1) les particules qui migrent ont la signature de la fraction 0-2 µm, légèrement enrichie en smectites lors des premières pluies ; (2) le transfert des particules dépend du mode de fonctionnement hydrodynamique, matriciel ou préférentiel ; (3) seule une fraction des particules mises en suspension dans l'horizon d'éluviation est fixée dans l'horizon d'illuviation ; (4) le lessivage est le processus majeur responsable de la formation de profils à texture contrastée dans 1 à 12% des cas.

Mots clés : Lessivage, éluviation, illuviation, processus pédogénétique, approche expérimentale.

Analyse of a pedogenetic process by an experimental approach: the clay lessivage in soil

Sumary:

Lessivage - understood as a substantial vertical transfer of fine particles from an eluvial horizon to an illuvial horizon - is one of the major pedogenetic processes. It has been described in many soil types but remains poorly known and characterized. Its existence is still subject to debate in the scientific community. To improve our knowledge, this project aimed at conducting laboratory experiments allowing both a quantification and a kinetic approach of lessivage. We thus designed three experiments, two to study eluviation on disturbed and undisturbed soils, and the third one to study illuviation. Theses experiments associated to a mass balance approach performed on existing pedological data allowed: (i) determing the nature of migrant particles, (ii) quantifying the mobilized particles and identifying some of the processes responsible for their mobilization, (iii) quantifying the quantities of particles retained in the illuvial horizon and identifying some of the processes responsible for this fixation, (iv) determining the impact of soil structure and extreme climatic events on lessivage. At last, we extrapolated these experimental results on the pedogenese duration and confronted them to soils profiles described in the literature.
Our results show that: (1) the migrating particles have the signature of the 0-2 µm fraction, slightly enriched in smectites for the first rain events, (2) the particle transfer depends of the hydrodynamic functioning, either matricial or preferential, (3) only a fraction of particles mobilised in the eluvial horizon is fixed in the illuvial horizon, (4) the lessivage is the process mainly responsible for the formation of textural contrast in 1 to 12 % of the studied profiles.

Keywords: Lessivage, argiluviation, eluviation, illuviation, pedogenetic process, experimental approach.

Ce projet a bénéficié en partie du financement du projet AGRIPED (projet ANR 10 blanc 605)

Institut National de la Recherche Agronomique
Unité de Recherche Science du Sol
2163 Avenue de la Pomme de Pin, CS 40001 Ardon,
45075 Orléans Cedex 2, France