

ESTIMATION DE L'ÉTAT DE DÉGRADATION DES SOLS SUR MARNES DU PRÉRIF (MAROC) PAR LA SUSCEPTIBILITÉ MAGNÉTIQUE: EXEMPLE DU BASSIN VERSANT DE L'OUED BOUSSOUAB

Abdelhamid Sadiki¹, Ali Faleh², Ana Navas³ et Saïdati Bouhlassa⁴
Universidad de Fes, CSIC Zaragoza y Universidad de Rabat

RÉSUMÉ

L'exploitation de la susceptibilité magnétique des particules du sols pour l'estimation de l'état de développement pédogénétique ou de dégradation des sols par l'érosion repose sur la comparaison des valeurs de la susceptibilité magnétique et de leur évolution en profondeur entre des sols stables de référence et des sols qui ont subi une érosion ou, au contraire, un apport de particules. Des mesures de la susceptibilité magnétique des particules du sol sur 30 cm de profondeur ont été effectués sur quatre zones différentes par la pente et l'utilisation des sols de la couverture pédologique d'un même substrat. Dans la première zone le sol est peu évolué. Il se développe sous une jachère exceptionnellement travaillée. La moyenne des susceptibilités magnétiques mesurées est de $7,41 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$. Dans la seconde zone le sol est bien développé sur plusieurs décimètres. Il est intensivement exploité par la céréaliculture. La susceptibilité magnétique moyenne est de $23,42 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$. La troisième zone est un sol qui évolue sous une formation herbacée naturelle (alfa) moyennement dense. La moyenne des susceptibilités magnétique de cette zone est $13,75 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$. La quatrième zone a complètement perdu son sol, le substrat est lui-même érodé. La moyenne des susceptibilités magnétique de cette zone est $6,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$. En comparant les susceptibilités magnétiques de ces sols dégradés et leur évolution en profondeur à celles d'un sol stable ($204,04 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$) on constate une grande différence qui permet d'évaluer l'état de leur dégradation et de déterminer les facteurs favorisant cette dégradation. La position des carottes sur le versant a permis d'avoir une idée sur la redistribution des particules par le ruissellement et par conséquent sur les processus de la géodynamique de surface du versant.

Fecha de recepción: 13 de diciembre de 2006. Fecha de aceptación: 15 de diciembre de 2006.

1 Département de Géologie, Faculté des Sciences, Dhar Mahraz, Fes, Maroc. sadiki_a@yahoo.fr

2 Département de Géographie, Faculté des Letters, Saiss, Route Imouzzer, Fes, Maroc falehali2001@yahoo.fr

3 Department d'Edafologie, Estacion Experimental de Aula Dei, CSIC Zaragoza, Spain anavas@eead.csic.es

4 Universidad de Rabat. Laboratoire de Radiochimie, Facultad de Ciencias. bouhlass@fsr.ac.ma

Mots clés: susceptibilité magnétique, dégradation des sols, quatre zones différentes, processus de la géodynamique de surface du versant.

ABSTRACT

The exploitation of the magnetic susceptibility of soil particles to estimate the state of soil development or its degradation by erosion bases on the comparison of the magnetic susceptibility values and their evolution in depth between stable reference soil and soil which underwent erosion or, on the contrary, receive a contribution of particles. Measures of the magnetic susceptibility of the soil particles on 30 cms deep were made on pedological coverage of one substratum in four zones different by their slope and land use. In the first zone the soil is little evolved. It develops under an exceptionally worked fallow. The average of the magnetic susceptibilities is $7.41 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 / \text{kg}$. In the second zone the ground is developed well on several decimeters. It is extensively exploited by cereal crops. The magnetic average susceptibility is $23.42 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 / \text{kg}$. The third zone is a soil which evolves under a natural herbaceous coverage (alfa) moderately dense. The average of the magnetic susceptibilities of this zone is $13.75 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 / \text{kg}$. The fourth zone completely lost its soil, the substratum is affected itself. The average of the magnetic susceptibilities of this zone is $6.5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 / \text{kg}$. By comparing the magnetic susceptibilities of these degraded soils and their evolution in depth to those of a stable soil ($204.04 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$) we notice a big difference which allows to estimate the state of their degradation and to determine the factors favoring this degradation. The position of cores on the hillside allowed to have an idea on the particles redistribution by the streaming and consequently on the geodynamics processes of the hillside surface.

Key words: magnetic susceptibility, soil degradation, four zones different, geodynamics processes of the hillside surface.

1. INTRODUCTION

Les marnes constituent plus de 70% des substrats qui affleurent dans le Prérif marocain et la majorité des sols fertiles de cette région se développent sur ce type de substrat. Ces sols constituent un capital important pour les habitants de cette zone car l'agriculture est la principale source de revenus. Les marnes sont des roches relativement tendres, elles subissent une géodynamique très active à leur surface et leur fragilité les rend très vulnérables aux aléas de la nature et des hommes. Une combinaison de facteurs naturels et anthropiques a provoqué une érosion hydrique intense qui s'est manifesté par une dégradation des sols et une diminution importante de leur productivité.

Notre étude porte sur l'évaluation de cette dégradation par la technique de la susceptibilité magnétique des particules du sol. Cette technique, rapide et peu chère, consiste à effectuer l'analyse des caractéristiques magnétiques naturelles des particules d'un sol dégradé et de les comparer avec celles d'un sol témoin proche bien développé et relativement stable.

Toutes les particules du sol possèdent à différents degrés un comportement magnétique mais l'utilisation des propriétés magnétiques naturelles des sols dans les études de la dégradation des sols est due essentiellement au comportement particulier des composés du fer qui contrôlent presque exclusivement l'ordre magnétique dans le sol.

La concentration des oxydes de fer, par altération, dans les sols méditerranéens a été démontrée par les auteurs qui ont étudié les altérations sous climat méditerranéen. (Sadiki, 1991) Lamouroux et Ségalen (1969) Paquet (1970) Le fer, une fois extrait des minéraux primaires de la roche mère par hydrolyse, se concentre dans l'altérite. Le fer s'intègre difficilement dans les phyllosilicates argileux secondaires, c'est pourquoi il se présente fréquemment sous forme libre d'oxydes et d'hydroxydes cryptocristallins ou cristallisés (hématites, limonite, goéteite, lépidocrite, magnétite, maghémite...) (Campy et Macaire, 1989). Vodyunitskiy (1981) avait suggéré que la magnétite peut prendre naissance dans les conditions ambiantes des sols. Actuellement plusieurs auteurs ont trouvé que l'hématite peut par réduction dans le sol se transformer en magnétite (Fe_2O_3) qui se réoxyde éventuellement en maghémite $\gamma(\text{Fe}_2\text{O}_3)$. Ces deux oxydes sont ferrimagnétiques et sont les principaux responsables du signal magnétique du sol (Marmet et Tabagh, 2001).

Dans une altérite, plusieurs auteurs ont montré une augmentation de la susceptibilité magnétique parallèlement à l'augmentation de la teneur en fer de la roche mère vers la surface. (Mullins, 1977; Thompson et Oldfield, 1986).

L'érosion hydrique détache entre autres particules les composés de fer. L'exploitation de la susceptibilité magnétique des particules du sols pour l'estimation de l'état de développement pédogénétique ou de dégradation des sols par l'érosion repose sur la comparaison des valeurs de la susceptibilité magnétique et de leur évolution en profondeur entre des sols stables et des sols dégradés par érosion ou, au contraire, alimentés par un apport de particules.

2. CARACTERISTIQUES DE L'AIRE D'ETUDE

Le bassin versant de l'oued Boussouab se situe dans le Rif oriental, à 40 km au nord de la ville de Taza. Il couvre une superficie de 25 220 ha. L'altitude varie de 625 m à 1622 m avec un pourtour montagneux encadrant un paysage collinaire. Il s'étend sur trois domaines structuraux: le Mésorif, le Prérif et l'avant-pays (Fig. 1):

Le Mésorif est dominé par une lithologie relativement friable composée de pélites sombres, de marnes claires, de calcaires marneux et de marnes alternant avec des calcaires à silex en petites barres de quelques décimètres. Le Prérif forme dans le secteur une bande orientée sud NE - SW. Dans sa partie interne, apparaît un flysch schisto-gréseux. Le Prérif externe, plus étendu, est formé par la Nappe pré-rifaine. C'est une série de marnes bleues, très puissante, relativement homogène. Sur ces formations allochtones se dépose des synclinaux perchés du Tortonien post-nappes, formés par une importante série gréseuse.

L'avant-pays est constitué par le massif calcaro-gréseux du Terni-Mezgout. Ce massif montagneux est séparé de la chaîne rifaine par le sillon sud-rifain qui est un bassin de comblement néogène. Les affleurements sont des conglomérats, des calcarénites et une épaisse série marneuse.

Le climat qui règne sur le bassin versant est de type semi-aride à aride. Les précipitations moyennes annuelles varient de 150 mm (Anguied au sud) au sud à 350 mm au nord. Les précipitations tombent le plus souvent sous forme d'orages violents et courts l'irrégularité du régime des pluies se traduit au niveau de l'écoulement des différents chenaux, généralement

torrentiel aux cours des événements pluvieux mais a sec quand il n'y a pas de pluie. Seul le collecteur principale (oued Boussouab est pérenne).

La végétation naturelle du bassin versant de l'oued Boussouab appartient à l'étage bioclimatique aride et semi-aride. Elle se présente sous forme de matorrals très dégradés sur les hauteurs. On y trouve le pin d'Alep (*pinus halepensis*), le genévrier (*juniperus communis*) et le thuya (*thuya orientalis*) ainsi que des reboisements d'eucalyptus. Sur les pentes plus faibles, les zones qui n'ont pas été défrichées pour l'agriculture, sont couvertes par l'alfa (*stypa tenassissima*) et des armoises du genre *Artémisia*. Le fond de vallée, en pente faible, est occupé par une céréaliculture à rendement très modeste.

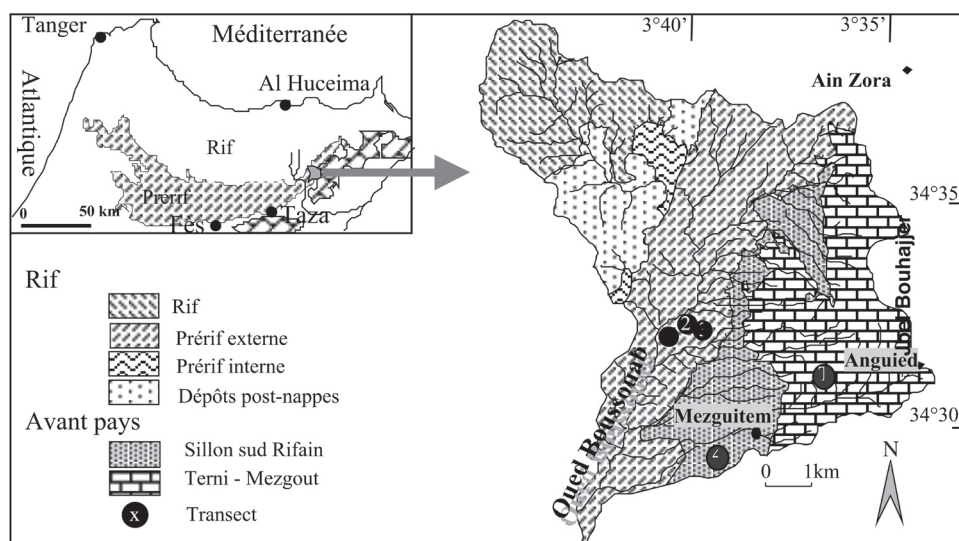


FIGURE 1

Localisation et cadre structural du bassin versant de l'oued Boussouab D'après la carte structurale du Rif au 1/500000 (Suter, 1980)

3. MATERIELS ET METHODES

3.1. Susceptibilité magnétique

La susceptibilité magnétique d'un grain traduit la facilité de ce grain à s'aimanter dans un champ magnétique faible appliqué. Elle caractérise le rapport de l'aimantation induite à ce grain lorsqu'on lui applique un champ magnétique de faible intensité et le champ qui la crée. Elle peut être volumique (K) ou massique (χ).

$$K = \frac{J}{H} \quad \text{et} \quad \chi = \frac{M}{H}$$

J et M: Aimantation réversible acquise respectivement par unité de volume et par unité de masse du corps placé dans le champ magnétique H.

H: champ magnétique appliqué exprimé en Tesla dans le système international.

χ est la susceptibilité magnétique utilisée dans notre étude, elle est exprimée en m³/kg

La susceptibilité magnétique d'un grain dépend de sa composition chimique, de sa taille et de sa forme.

3.2. Susceptibilité magnétique à fréquence dépendante

Pour le même échantillon, on applique un champ faible avec deux fréquences. Les susceptibilités magnétiques mesurées sont respectivement la susceptibilité à basse fréquence χ_{lf} et à celle haute fréquence χ_{hf} .

La susceptibilité à fréquence dépendante χ_{fd} est définie par le rapport suivant:

$$\chi_{fd} = \frac{(\chi_{lf} - \chi_{hf})}{\chi_{lf}} \cdot 100$$

La susceptibilité magnétique à fréquence dépendante donne une idée sur la taille des particules du sol.

En basse fréquence, on obtient généralement des susceptibilités plus élevées qu'en haute fréquence pour le même volume de grains. A basse fréquence, le temps de mesure est suffisamment faible pour détecter la susceptibilité de tous les grains même ceux qui ont un temps de relaxation faible, comme les superparamagnétiques généralement très fins.

En haute fréquence le temps de relaxation des superparamagnétiques est plus faible que le temps de mesure, ainsi la contribution des ces derniers n'est pas mesurée et la susceptibilité est plus faible.

3.3. Echantillonnage du sol

Pour déterminer l'évolution verticale des minéraux magnétiques du sol, les prélèvements du sol se font sous forme de carottes de 30 centimètres de profondeur à l'aide d'un carottier de 7 cm de diamètre.

Dans une zone où affleure le même substrat et qui subit une même agressivité climatique, un mode d'échantillonnage qui tient compte des autres facteurs qui interviennent dans les redistributions des particules du sol par l'eau (la pente et l'occupation des sols) donnera une idée sur l'influence de ces facteurs dans le détachement et l'évacuation des particules magnétiques et par conséquent sur la dégradation des sols par érosion. Le prélèvement sous forme de transects composés de plusieurs carottes séparées par des intervalles réguliers de 10 mètres suivant la plus grande pente a été effectué dans la perspective d'observer les variations de la susceptibilité magnétique des sols le long de la pente d'un versant et avoir une idée sur les mouvements des particules magnétiques qui témoigneront des modalités de la géodynamique du versant.

Une série de quatre transects ont été prélevés (T1, T2, T3 et T4) sur des sols différemment dégradés. Ils se développent tous sur le même substrat; les marnes. Ils subissent la même agressivité climatique car leurs localisations et leurs altitudes sont très

voisines. Une carotte témoin (T) est prélevée sur le site le plus protégé (pente très faible, végétation dense) (Fig. 1).

Transects T1, T2 et T3

Les transects T1, T2 et T3 ont été prélevés à 6 km au nord ouest de la localité de Mezguitem sur une colline façonnée sur les marnes bleues grisâtres du Prérif (Fig. 2). Les transects T1 et T3 ont été prélevés sur une surface couverte par un manteau d'altération très mince (10 à 20 cm). Le substrat marneux affleure en plusieurs endroits. Le transect T2, par contre, a été prélevé sur un matériaux meuble de 2 à 3 mètres d'épaisseur (le substrat est visible au fond d'un ravin de plus de 3 m de profondeur). Sur le manteau d'altération se développe un sol peu évolué à tendance vertique de 30 à 40 cm de profondeur limono – argilo – sableux à structure grumeleuse fine. Le reste des caractéristiques est résumé dans le tableau I.

Transect T4

Il est localisé à 3 km à l'ouest de Mezguitem dans une région de ravinement généralisé en badlands. C'est un transect où nous avons prélevé 3 carottes dans les marnes miocènes du sillon sud rifain qui sont presque non altérées. La surface ressemble à celle observée au fond d'un ravin, 3 mètres en dessous de la surface du site des transect 2. La pente est régulière, elle est de 20°.

TABLEAU I
Caractéristiques géographiques des transects T1, T2 et T3

	T1	T2	T3	T4
Forme du versant	Concave	Concave	Convexe-concave	régulière
Pente (degré)	20° – 15°	15° - 10°	15° - 25° - 15°	20°
Occupation des sols	Jachère	Céréaliculture	Alfa moyennement dense	Terrain nu
Coordonnées géographiques	3° 40' 48''W 34° 32' 015''N	3° 40' 38''W 34° 32' 02''N	3° 40' 39''W 34° 31' 99 N	3° 41 W, 34° 28' 30»N
Altitude (milieu du transect)	836 m	832 m	847m	780m

Site témoin (T)

La carotte prélevée dans le site témoin servira de référence. Elle est destinée à mesurer les susceptibilités magnétiques dans un sol stable, non remanié. Nous avons choisi un matorral relativement dense avec une surface très herbacée en alfa et d'autres espèces. La pente est très faible (1 à 2°). Le substrat est un glacis terrasse limoneux sur lequel se

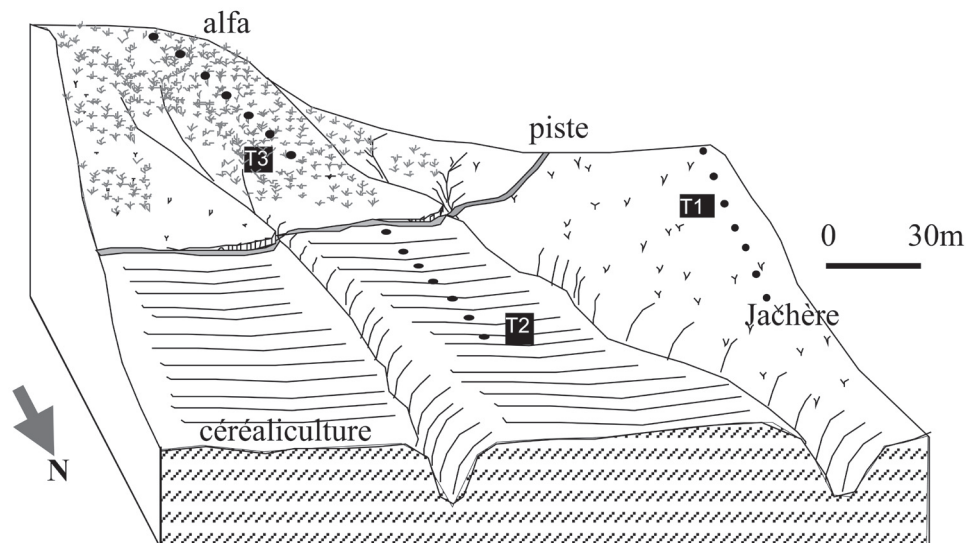


FIGURE 2
Situation des transects T1, T2 et T3

développe un sol brun rougeâtre de 60 à 70 cm. Le profil pédologique montre nettement un passage progressif des limons roses vers un horizon de surface où sur les 50 premiers centimètres, il est brun, riche en matière organique. Les analyses granulométriques de ce sol montrent un enrichissement en limon et sable fin.

3.4. Mesures de la susceptibilité magnétique

3.4.1. Préparation des échantillons

Chaque carotte de 30 cm de long a été découpée en 6 tranches de 5 cm d'épaisseur. Les échantillons ainsi obtenus ont été séchés dans une étuve à 40 °c puis pesés. Ensuite chaque tranche de la carotte est désagrégée dans un mortier puis tamisée dans un tamis à maille de 2 mm (Fig. 3).

3.4.2. Mesures magnétiques

Pour mesurer les susceptibilités magnétiques, une quantité d'environ 10g de l'échantillon est comprimée (pour éviter les mouvements des particules) dans un flacon de 10 ml de volume conçu pour ces mesures. Le flacon est placé dans un susceptibilimètre de type Bartington à sonde MS2B créant un champ magnétique alternatif de l'ordre de $0,1\mu\text{T}$ à deux fréquences; à basse fréquence (0,47 kHz) et haute fréquence et (4,7 kHz), conduisant respectivement aux susceptibilités à basse fréquence χ_{lf} et haute fréquence χ_{hf} .

Pour chaque échantillon, trois mesures de susceptibilité sont faites:

- mesure du bruit de fond avant introduction de l'échantillon (BF_1);
- mesure de la réponse de l'échantillon sous l'effet d'un champ magnétique (M);
- mesure du bruit de fond après enlèvement de l'échantillon (BF_2).

La magnétisation corrigée M_0 de l'échantillon est calculée par la formule:

$$M_0 = M - \frac{BF_1 + BF_2}{2}$$

La susceptibilité magnétique χ est définie par: $\chi = M_0 / M_e$
 M_e est la masse de sol (en kg)

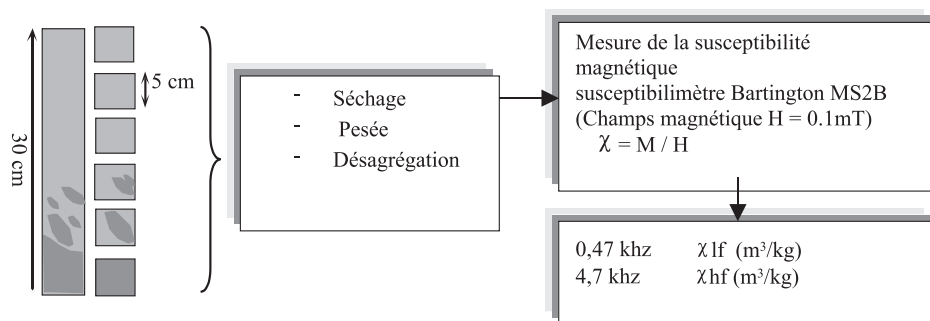


FIGURE 3

Mode opératoire des mesures de la susceptibilité magnétiques

4. ANALYSES ET INTERPRETATIONS DES RESULTATS

Sur les marnes grises du Prérif, trois transects ont été étudiés (T1, T2 et T3), chacun pour une occupation de sol différente. Le transect T1 prélevé sur un sol maintenu en Jachère pendant plusieurs années, il n'est exploité que très exceptionnellement à cause du faible rendement lié à la pauvreté de son sol. Le transect T2 prélevé sur un sol cultivé intensivement par une céréaliculture, le transect T3 sur un versant occupé par une formation alfatière moyennement dense. Un quatrième transect a été prélevé sur les marnes grises du Miocène post-nappe du sillon sud rifain (transect T4) sur un terrain nu et stérile.

4.1. Le sol du site témoin

Les échantillons de la carotte témoin montre une augmentation progressive des susceptibilités magnétiques du bas vers le haut. Elle varie de $167,34 \cdot 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$ à $255,87 \cdot 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$ (Fig. 4) (Tab. II). Cette évolution croissante caractérise des sols stables non remaniés

qui conservent intactes les transformations chimiques et pédogénétiques qui s'y opèrent. A l'opposé, les sols labourés montre une répartition anarchique des composés magnétiques. Cette répartition est due au mélange et au remaniement causé par le travail du sol.

TABLEAU II
Susceptibilité magnétique de la carotte témoin

Profondeur (cm)	χ_{lf} ($10^{-8}m^3/kg$)
0 – 5	255,87
5 – 10	220,12
10 – 15	217,37
15 – 20	191,97
20 – 25	171,58
25 – 30	167,34
Moyenne	204,04

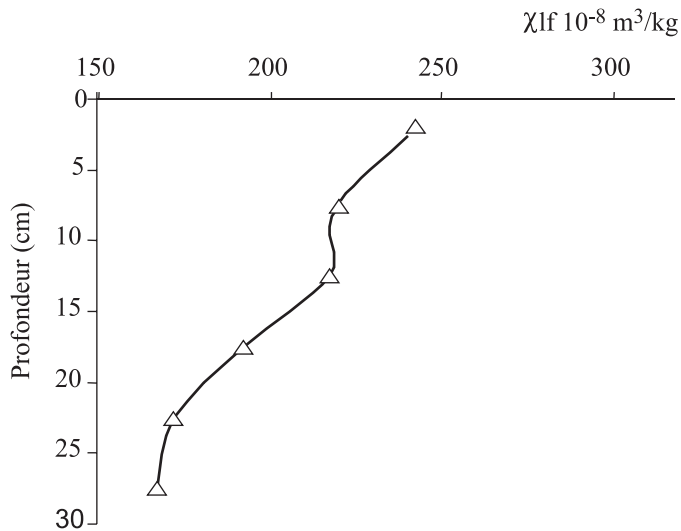


FIGURE 4
Variation de χ_{lf} en fonction de la profondeur pour la carotte témoin

4.2. Les sols sur marnes

Toutes les carottes prélevées sur les marnes montrent une moyenne de susceptibilité magnétique faible variant entre $4,91 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ et $36,78 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$. Elles sont très faibles par rapport à celles mesurées dans la carotte témoin. Cette grande différence est due au substrat qui fournit les éléments magnétiques, le glaciis terrasse étant une formation alimentée par un versant calcaire qui fournit beaucoup de terra rossa riche en fer. Cependant l'examen des sols sur marnes montre des variations de la susceptibilité magnétique d'une carotte à l'autre dans le même transect aussi bien concernant les moyennes que l'évolution en profondeur (Tabl. III).

TABLEAU III

Susceptibilité magnétique moyenne des carottes prélevées sur les sols marneux du Prérif

T1		T2		T3		T4	
carottes	$\chi_{lf} 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$	carottes	$\chi_{lf} 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$	carottes	$\chi_{lf} 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$	carottes	$\chi_{lf} 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$
C 1	6,29	C 8	21,51	C 21	14,64	C34	6,06
C 2	6,34	C 9	36,78	C 20	7,62	C 35	4,76
C 3	4,91	C 10	33,74	C 19	10,57	C36	7,33
C 4	8,65	C 11	34,45	C 18	10,93		
C 5	10,10	C 12	11,61	C 17	11,24		
C 6	5,74	C 13	8,17	C 16	18,77		
C 7	9,86	C 14	17,71	C 15	15,47		
moyenne	7,41	moyenne	23,42	moyenne	12,75	moyenne	6,05

4.2.1. Transect T1

Les 7 carottes (C1 – C7) du transect T1 montrent deux types d'évolution de la susceptibilité magnétique à basse fréquence dans les 30 premiers centimètres de profondeur (Fig. 5). Toutes les carottes montrent une susceptibilité magnétique faible pour les profondeurs supérieures à 15 cm avec une évolution en dents de scie caractéristique des sols perturbés et remaniés par le labour. Sur les 15 cm de surface les 3 carottes de l'amont (C1, C2 et C3) ont la même évolution qu'en profondeur, mais les 4 carottes de l'aval montrent une augmentation de presque le double.

La forme de la plus grande pente du versant du transect T1 et le fait de laisser le sol en Jachère plusieurs années de suite ont eu certainement une influence sur les redistributions des particules magnétiques de ce sol. La pente est légèrement concave, elle est de 20° pour les trois premières carottes, elle diminue jusqu'à 15° pour les 4 carottes de l'aval.

Ceci a probablement contribué à une érosion plus intense de la zone amont en pente relativement forte suivie d'un colluvionnement vers la zone en pente faible marquée dans les 15 centimètres de surface par une augmentation de la susceptibilité magnétique qui serait due au transfert entre autres particules des composés de fer de la partie amont. Une pédogenèse plus marquée en aval grâce à la pente plus faible peut aussi expliquer l'augmentation de la susceptibilité magnétique. Les deux processus peuvent aussi coexister.

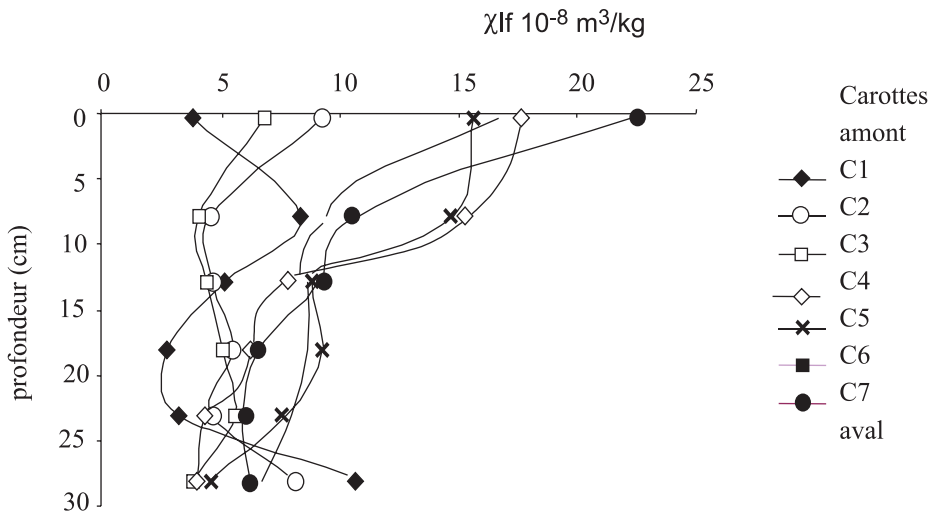


FIGURE 5
Variation de χ_{lf} en fonction de la profondeur pour le transect T1

4.2.2. Transect T2

Les 7 carottes (C8 – C14) du transect T2 se trouvent sur une pente légèrement concave. Elle passe de 15° pour les quatre premières carottes à 10° pour les trois carottes de l'aval. Elles montrent des susceptibilités magnétiques à basse fréquence moyennes supérieures à celle du transect T1 (Tab. III). En profondeur, les 3 carottes de l'aval (C12, C13 et C14) montrent une susceptibilité faible et une augmentation dans les 10 à 15 centimètres de surface semblable à celle des carottes de l'aval du transect T1 (Fig. 6). Les 3 carottes de l'amont montrent une susceptibilité élevée par rapport à celles de l'aval sur toute la colonne de sol prélevée, avec une distribution en dents de scie caractéristique des sols labourés.

L'augmentation de la susceptibilité dans l'horizon de surface de la partie aval du transect T2 est probablement due au colluvionnement et au transport par ruissellement en nappes des particules provenant du haut du transect qui montre des susceptibilités de cet ordre de grandeur plutôt que par une pédogenèse plus avancée car cette augmentation est nette à partir de la tranche 10 – 15 cm.

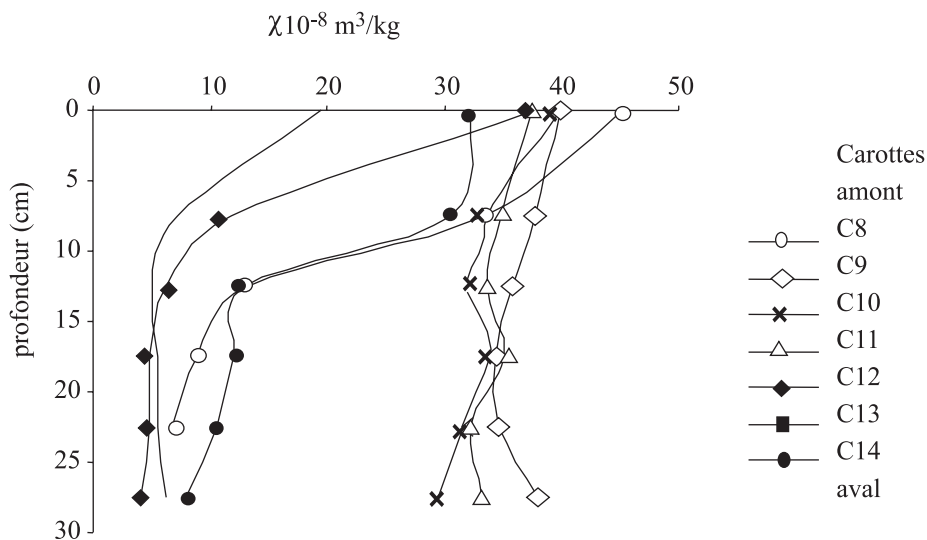


FIGURE 6

Variation de χ lf en fonction de la profondeur pour le transect T2

Un autre facteur appuie cette hypothèse c'est le fait que ce transect se trouve juste à l'aval du versant à alfa où a été prélevé le transect T3 et qui montre un colluvionnement important à sa base qui s'épaissit certainement dans la partie amont du transect T2 et s'amincit dans la partie aval. Les carottes de l'aval atteignent le sol en place qui montre des susceptibilités faibles inférieures à $10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$, proches de celle mesurées dans le transect T1 qui est un sol très pauvre.

Les trentes centimètres de profondeur des carottes C9, C10 et C11 n'ont pas atteint le sol en place mais seulement les colluvions. La carotte C8 prélevée tout à fait à l'amont du transect T2 à 1m de la piste montre une évolution particulière. En profondeur, la susceptibilité est comparable aux carottes de l'aval mais dans les dix centimètres de surface il y a une augmentation importante. Cette évolution est certainement due à une perturbation liée à la construction de la piste.

4.2.3. Transect T3

Les 7 carottes (C15 – C21) du transect 3 ont été prélevées sur un versant en pente irrégulière. Du sommet au pied du versant on passe d'une forme convexe à une forme concave. La pente est de 15° en haut du versant, elle se raidit rapidement jusqu'à 25° puis fléchit progressivement au pied du versant jusqu'à 15° .

Le versant est couvert par une formation herbacée formée exclusivement par l'alfa. C'est un site naturel où l'action humaine se limite à la dégradation du couvert végétal par le pâturage, mais pas à la perturbation du sol en profondeur.

Du haut du versant vers le bas, on constate sur la partie convexe une diminution brusque de la susceptibilité magnétique moyenne des carottes (C21-C20). Elle augmente ensuite progressivement (Tab. III). Cette variation de la susceptibilité magnétique moyenne des sols le long du transect évolue dans le même sens que la variation de la topographie. La pente passe en moins de 10 m (C 21 à C 20) de 15 à 25°.

La susceptibilité magnétique moyenne a chuté de presque la moitié (de $14 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ à $7 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$). Dans les cinq premiers centimètres La diminution est encore plus flagrante. Elle diminue de $30 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ à $6 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$. Plus bas la pente diminue progressivement jusqu'à 15°. La susceptibilité magnétique croît de nouveau jusqu'à atteindre une valeur proche de celle du sommet.

Le transect T2 qui est le prolongement sur le même versant du transect T3 montre des susceptibilités qui confirment l'évolution de ce dernier. La susceptibilité magnétique moyenne des carottes continue à augmenter dans la partie amont du transect T2.

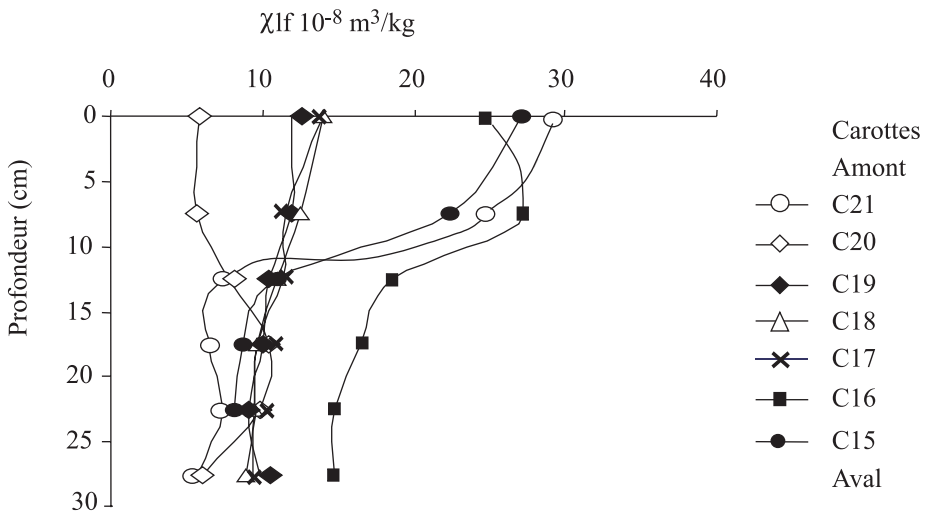


FIGURE 7

Variation de $\chi \text{ If}$ en fonction de la profondeur pour le transect T3

En profondeur, les courbes d'évolution de la susceptibilité magnétique montrent des allures intéressantes et donne une idée sur la dynamique superficielle des sols.

La carotte C21 du sommet du versant présente des susceptibilités magnétiques faibles en profondeur mais elles augmentent à partir de 15 cm. Les carottes du milieu (C20 à C17) montrent une évolution plutôt constante. Les susceptibilités magnétiques mesurées sur les deux carottes de l'aval montrent une augmentation vers la surface.

Au sommet, il ne peut y avoir d'apport de particules. L'enrichissement en composés magnétiques dans les quinze centimètres de surface est certainement dû à une altération et pédogenèse du substrat marneux relativement protégé par la formation alfatière. Dans les carottes du milieu de versant la pente devient plus forte et pourrait expliquer la diminution des composés magnétiques et l'allure relativement raide des courbes d'évolution de la susceptibilité magnétique car les particules magnétiques sont évacuées vers le bas de versant au fur et à mesure de leur formation. L'aspect des courbes de l'aval (C15 et C16) montre un début d'accumulation des particules, ce qui confirme l'évolution le long du transect T2 qui se trouve quelques mètres plus en aval.

4.2.4. Transect T4

Les carottes du transect T4 ont été prélevées sur un régosol, dans une zone de bad lands. C'est un sol très peu évolué qui correspond aux premières phases d'altération des marnes du Miocène post nappe du sillon sud rifain. Le sol est nu, stérile où ne poussent presque pas de végétaux. La pente est de 20°. Les susceptibilités magnétiques mesurées sur ce transect sont les plus faibles que l'on a rencontré sur un substrat marneux. Elles sont comparables à celles mesurées en profondeur pour les transects T1 et T3 (Fig. 8).

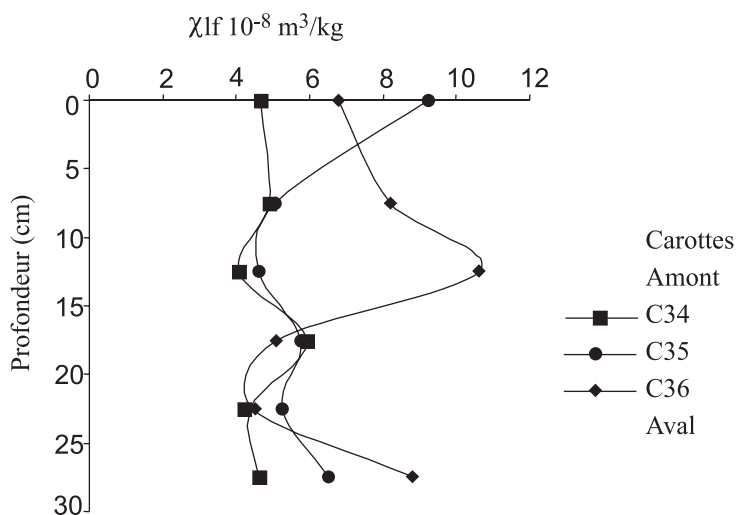


FIGURE 8

Variation de χ_{lf} en fonction de la profondeur pour le transect 6

5. DISCUSSION DES RESULTATS

5.1. La susceptibilité magnétique, marqueur de l'évolution pédogénétique

Les corrélations entre les différentes susceptibilités magnétiques mesurées à différentes profondeurs du sol développé sur le même substrat pour les quatre transects ont permis de lever légèrement le voile sur les conditions qui favorisent ou entravent l'évolution pédogénétique dans ce secteur.

Les composés de fer fournis par le substrat marneux sont en faibles quantités aussi bien pour les marnes du Prérif que celles du Miocène post nappes du sillon sud rifain. Ils sont généralement ennoyés dans une matrice carbonatée, c'est pourquoi les susceptibilités magnétiques sont généralement très faibles par rapport à la carotte témoin, cependant leur répartition dans le paysage peut donner une idée sur les conditions de pédogenèse et de redistribution des particules du sol.

Le sol du transect T4 est très peu évolué, il montre le stade le moins altéré des marnes. Ceux des autres transects sont plus évolués, plus meubles et montrent des structures grumeleuses fines. Les susceptibilités magnétiques mesurées dans les différents sols montrent que le transect T4 présente les plus faibles susceptibilités magnétiques mesurées sur les sols développés sur marnes et qu'on retrouve les valeurs mesurées sur ce sol à la base des sols en place dans les zones les plus érodées des transects T1, T2 et T3. On observe donc une augmentation des susceptibilités magnétiques des sols les moins évolués vers les sols les plus évolués.

Cette augmentation se fait d'une manière progressive lorsqu'il s'agit d'un sol qui n'a pas subi de remaniements d'origine anthropique et d'une façon anarchique si le sol a été travaillé et ses constituants mélangés sur 15 à 20 centimètres de profondeur.

Le sol du transect T2 est le mieux développé des sols qui se développent sur les marnes. Il montre les caractéristiques pédologiques d'un «Tirs» de quelques décimètres d'épaisseur. En parallèle, il atteint les valeurs de la susceptibilité magnétique les plus grandes. Son exploitation intensive pour la céréaliculture a mélangé ses horizons de surface et ne permet pas de voir l'évolution naturelle croissante en susceptibilité magnétique du sol.

5.2. La susceptibilité magnétique, marqueur de la géodynamique de surface

L'homogénéité des marnes et le travail des sols rendent difficile la distinction d'un matériau marneux altéré en place ou d'un colluvionnement de cette altérite. La susceptibilité magnétique a permis de faire la différence et de montrer que la pente apparaît comme l'un des facteurs principaux qui contrôlent la pédogenèse et l'érosion (Fig. 9). On remarque que les transects T1 et T3 montrent que leurs deux pentes ont évolué de la même façon. L'évolution est plus marquée pour le transect T3 à cause de la pente plus forte.

Le sommet du versant à alfa (transect T3) est couvert par le sol en place le mieux évolué et le moins contaminé par des apports extérieurs. C'est aussi la zone la moins pentue. L'équivalent de cette partie sur le transect T1 n'a pas été mesurée.

Dans la partie médiane du transect T3 où la pente est la plus forte, on assiste à une dégradation nette du sol, la susceptibilité magnétique moyenne de la carotte passe de 14,64

à $7,62 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$. L'équivalent de cette zone sur le transect T1 correspond aux carottes C1, C2 et C3. Dans ces deux zones on enregistre des susceptibilités magnétiques comparables à celles mesurées sur le transect T4.

Dans la partie aval des transects T1 et T3, l'adoucissement de la pente est du à un colluvionnement qui s'épaissit de plus en plus vers l'aval des deux transects comme en témoignent les susceptibilités magnétiques de plus en plus élevées surtout dans les 15 cm de surface. Ceci est confirmé par les mesures réalisées sur le transect T2 qui est le prolongement vers l'aval du transect T3. Ils sont séparés par une piste (Fig. 2) qui mène à une mine de sel gemme et dont l'exploitation est très récente (une dizaine d'années)

Dans la partie amont du transect T2, les carottes C8, C9, C10 et C11 montrent des susceptibilités magnétiques élevées. La teneur en minéraux magnétique évolue dans le même sens que l'aval du transect 3. On pourrait donc dire que les carottes de 30 centimètre de profondeur prélevées n'atteignent pas le sol en place. Elles ne pénètrent que dans les colluvions qui sont plus épais que celle de l'aval du transect T3.

L'évolution en profondeur de la susceptibilité magnétique est en dents de scie caractéristique des sols labourés ne permet pas de conclure à une pédogenèse plus avancée

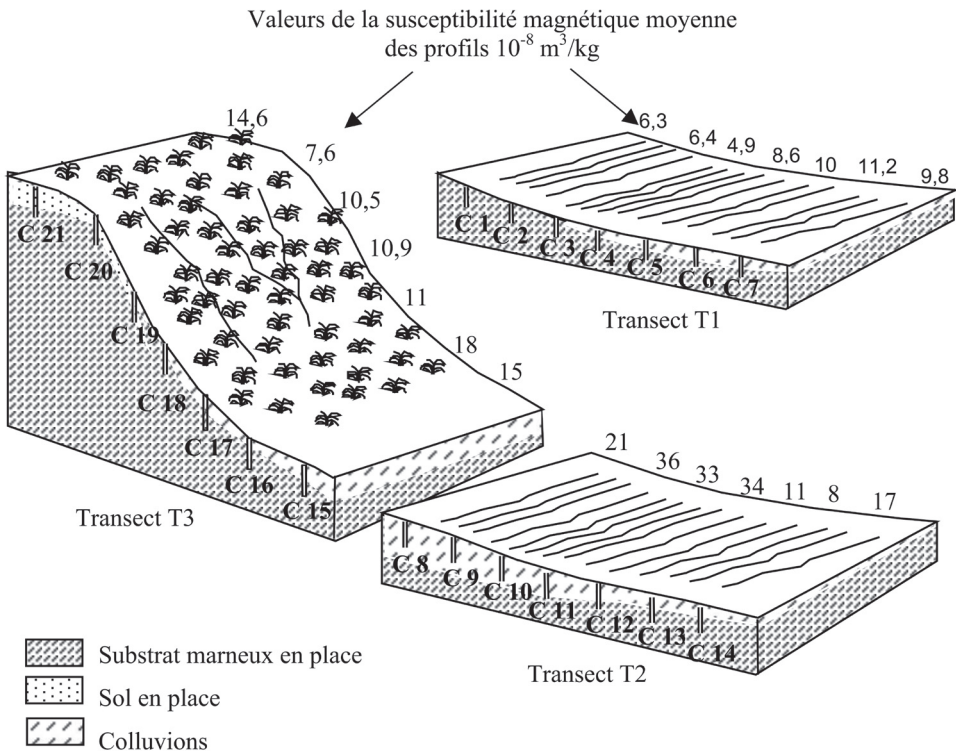


FIGURE 9

Erosion et colluvionnement marqué par la susceptibilité magnétique des transects T1, T2 et T3.

qu'à simplement, un colluvionnement. L'examen des carottes de l'aval du transect T2 nous montre qu'il s'agit surtout d'un colluvionnement car dans les carottes C12, C13, et C14, les valeurs de la susceptibilités magnétiques sont faibles en profondeur et élevées dans les 15 centimètres de surface ce qui prouve que les colluvions s'amincissent jusqu'à 10 - 15 cm.

Dans cette portion du transect, l'équivalent des susceptibilités magnétiques des échantillons profond sont celles mesurées sur le transect T4, ce qui montre qu'on atteint les phase les moins altérées des marnes mais l'augmentation brusque à partir du 15 à 10 cm montre bien un sol allochtone.

6. FACTEURS INFLUENÇANT LA REDISTRIBUTION DES PARTICULES

Pour les sols sur substrats marneux, les susceptibilités magnétiques sont généralement faibles du fait vraisemblablement de la faible teneur en fer du substrat marneux et de la dilution par la matrice carbonatée. Les teneurs demeurent inférieures à $45 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$. Cependant, même dans cet ordre de grandeur, leur évolution verticale et horizontale permet de témoigner sur l'évolution de la géodynamique de surface et de déterminer les facteurs responsables des redistributions de particules. Le substrat des sols et l'agressivité climatiques étant constant sur tous les transects, essayons de voir l'effet de la pente et de l'utilisation des sols sur les redistributions des particules.

6.1. Effet de l'occupation des sols

La figure 10 illustre l'influence de l'occupation des sols sur l'intensité de la susceptibilité magnétique mesurée dans 30 cm de profondeur des sols sur marnes. Nous avons pris comme exemple dans la figure surtout des sols qui subissent un ablation par l'érosion hydrique et non une alimentation de l'amont, c'est pourquoi nous n'avons intentionnellement pas utilisé les résultats du transect T2 qui montre des susceptibilités magnétiques élevées car le colluvionnement qui s'y produit alimente la surface du sol par les minéraux magnétiques qui se forme à l'amont et peut fausser les résultats quand à l'interprétation de l'état de dégradation.

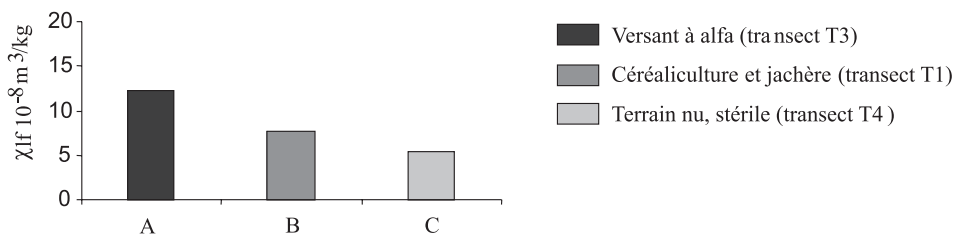


FIGURE 10
Variations de χ_{lf} en fonction des valeurs de C sur les sols marneux

Le terrain nu (T4) montre les plus faibles susceptibilités magnétiques. C'est le sol le plus dégradé. L'état de dégradation par l'érosion hydrique a atteint un stade où même le substrat est érodé. Le sol du transect T1 est parfois exploité pour la céréaliculture. Il est moins dégradé que celui de T4. Le sol du transect 3, bien que se trouvant sur une pente plus forte que les deux autres est mieux conservé car protégé par une couverture herbacée naturelle (alfa). Ceci montre l'effet protecteur de la végétation naturelle.

6.2. Effet de la pente

Sur le substrat marneux, la susceptibilité magnétique du sol en place diminue avec l'augmentation de l'inclinaison de la pente. Cette constatation n'a été possible que sur quelques portions des transects (partie amont du transect T1 et T3) car le colluvionnement des marnes sur les versants ne permet pas de suivre l'état d'évolution des sols en place.

Les variations de la susceptibilité magnétique sur un versant à pente irrégulière montre bien l'effet de la pente sur l'érosion et la redistribution des particules du sol. Les susceptibilités magnétiques mesurées sur des sols développés sur des colluvions n'indiquent pas réellement l'état de développement pédogénétique des sols ou de leur dégradation car ce sont des sols qui sont constamment alimentés par les particules issues du transport par ruissellement en nappe des zones en amont du versant. Il y a donc sur ces sols un mélange de minéraux magnétiques issus de transformations chimiques sur place et d'autres allochtones (cas du transect T2).

Les susceptibilités magnétiques mesurées sur ces sols ont des ordres de grandeurs équivalents sur toute la profondeur de la carotte (cas des carottes de l'aval du transect T3 et de l'amont du transect T2 ainsi que celles du milieu du transect T1). Quand les colluvions sont moins épaisses que la profondeur de la carotte, on assiste à une augmentation brusque de la susceptibilité magnétique à partir de la base de ces colluvions.

CONCLUSION

La mesure des susceptibilités magnétiques des constituants des sols le long à différents niveaux du profil pédologique s'est révélée être une technique qui fournit des informations importantes sur divers aspects de la géodynamique de surface. Elle nous a permis mettre en évidence dans le bassin versant de l'oued Boussouab plusieurs points fondamentaux dans la géologie de surface, particulièrement sur la stabilité des sols et sur la géodynamique de la surface.

Les sols stables, non remaniés et non érodés, montrent une évolution croissante de la susceptibilité magnétique de la roche mère vers la surface. Plusieurs facteurs agissent sur l'intensité des susceptibilités magnétiques mesurées et sur leur évolution dans le profil du sol:

La nature du substrat influe surtout sur la quantité des minéraux ferromagnétiques (sens large) dans le sol mais pas sur l'évolution pédogénétique.

Les substrats contenant peu de fer dans leurs minéraux primaires donneront, par altération, peu de minéraux ferromagnétiques et même si le fer se concentre par la solubilité sélective d'autres éléments chimiques sous les conditions naturelles du climat méditerranéen, dans les profils stables, les composés magnétiques qui se forment verront leur magnétisme dilué par la quantité de matière peu magnétique dans la quelle ces composés sont dispersés. Bien que la quantité des minéraux magnétiques est différente d'un substrat à un autre la comparaison de l'évolution des susceptibilités magnétiques d'un profil relativement moins dégradé avec celui d'un profil érodé sur le même substrat, permet d'estimer l'état de dégradation du sol érodé.

La pente est l'un des facteurs principaux qui favorisent ou entravent l'évolution des composés du fer. Sur une pente forte les composés de fer sont constamment érodés avec les autres particules ce qui ne permet pas une concentration de ces derniers dans le sol et par conséquent leur évolution vers des minéraux de forte susceptibilité. Le transect T2, prélevé sur un versant à pentes multiples, montre que les valeurs moyennes de la susceptibilité magnétique épousent la forme et le degré des pentes.

Un couvert végétal bien dense permet une meilleure protection du sol et une évolution plus poussée des composés de fer. L'occupation des sols agit sur l'évolution des composés de fer. Sous végétation naturelle (matorral et alfa), les sols non perturbés montre une évolution progressivement croissante, alors que les sols cultivés montrent une évolution en dents de scie et généralement des valeurs plus faible.

La susceptibilité magnétique des particules du sol est donc liée à l'état de dégradation ou de développement des sols. Les facteurs qui agissent sur la susceptibilité magnétique sont ceux là même qui agissent sur la pédogenèse, c'est pourquoi c'est un marqueur appréciable de la stabilité des sols.

La susceptibilité magnétique des sols donne une idée sur les redistributions des particules fines du sol par le ruissellement diffus. Les particules sont érodées de leur emplacement initial mais si elles ne sont pas prises en charge par l'écoulement linéaire et ne sont pas évacuées jusqu'aux cours d'eau, elles génèrent de véritables formations de versants qui sont le siège d'une pédogenèse mais les sols sont constamment rajeunis par de nouveaux apports de l'amont par une érosion en nappes. Ces formations ont fossilisé les sols qui se sont développé sur les matériaux autochtones. Dans ces formations de versant, on trouve des susceptibilités élevées par rapport au sol sous-jacent ou bien, par rapport à celui de l'amont du versant.

Un carottage plus profond sur les formations colluviales permettrait de reconstituer l'histoire sur un laps de temps beaucoup plus important et dévoilerait le voile sur la relation existant entre les colluvions et les sols autochtones qui ont été fossilisés. Un sol en place plus stable sur le même substrat pourrait fournir une référence de comparaison plus précise. Une détermination de la nature des minéraux magnétiques et une recherche sur les mécanismes de leur formation apporterait certainement d'autres informations intéressantes sur la pédologie et la géodynamique de surface des affleurements rocheux.

La méthode magnétique confirme l'impact négatif et néfaste de l'action humaine qui par le défrichement et les pratiques culturales perturbe et fragilise le sol et contribue à sa dégradation.

Remerciements

Les auteurs de l'article remercient le professeur Saïdati BOUHLASSA responsable du Laboratoire de radiochimie de la Faculté des Sciences de Rabat pour les analyses de la susceptibilité magnétique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CAMPY, M. & MACAIRE J.J. (1989) «Géologie des formations superficielles». Edition Masson. 424p.
- DEARING, G.A. (1979) «The application of magnetic measurements to studies of particulate flux in lake-watershed ecosystems». PhD thesis. University of Liverpool.
- FALEH, A. (2004). «Evaluation qualitative et quantitative et modélisation spatiale de l'érosion hydrique dans les bassins versant d'Aknoul et Merkat (Pré-rif central et oriental)». Thèse d'Etat, Faculté des Lettres et des Sciences humaines d'Oujda, 372p. (en arabe).
- FALEH, A., BOUHLASSA, S., SADIKI, A. & CARMELLO, C-G. (2005) «Exploitation des mesures magnétiques dans l'identification des sources de sédiments; cas du bassin versant d'Abdelali (Rif oriental, Maroc)». *Zeitschrift für Geomorphologie* n° 49, pp. 309-320. Germany
- LAMOUREUX, M. & SEGALIN, P. (1969) «Etude comparée des produits ferrugineux dans les sols rouges et bruns méditerranéens du Liban». *Sci Sol*, 1, p.63-75.
- MARMET, E. & TABAGH, A. (2001) «les propriétés magnétiques du sol; origine, caractéristiques et perspective pour l'étude de l'évolution du paysage». 3è Colloque GEOFCAN, 25 – 26 septembre à Orléans.
- MOUKCHANE, M. (1999) «Contribution à l'étude de l'érosion hydrique dans le Rif occidental. Applications des méthodes expérimentales du ¹³⁷Cs et de la susceptibilité magnétique aux bassins versant Nakhla, Elhachef et Smir». Thèse d'état Faculté des Sciences de Tétouan, Maroc, 260p.
- MULLINS, C. E. (1977) «Magnetic susceptibility of soil and its significance in soils sciences: A review». *J. Soil Sc.* 28 pp 233 – 238.
- PAQUET, H. (1970) «Evolution géochimique des minéraux argileux dans les altérations et les sols des climats méditerranéens tropicaux a saisons contrastées». *Mem. Serv. Carte géol. Als. Lorr.* 30, 212p. Strasbourg.
- SADIKI, A. (1991) «Evolution superficielle des granites et des basaltes de la régions de Boumia (Haute Moulouya, Maroc). Impact sur la sédimentation fluviale récente et actuelle». Thèse de 3^e cycle, Univ. Sidi Mohamed Ben Abdallah, Fès, 198p.
- SADIKI, A. (2005) «Estimation des taux d'érosion et de l'état de dégradation des sols dans le bassin versant de l'oued Boussouab, Maroc nord oriental: application du modèle empirique (USLE), de la technique du radio-isotope ¹³⁷Cs et de la susceptibilité magnétique». Thèse Doctorat d'Etat. Université Mohamed Premier, Oujda, 320 p.
- THOMPSON R. & OLDFIELD F. (1986) «Introduction to environmental magnetism». George Allen et Unwin (ed), Londres. 227p.

- THOMPSON, R., BATTARBEE, R. W., O'SULLIVAN, P. E., & OLDFIELD F. (1975) «Magnetic susceptibility of lake sediments». *Limnol. Oceanogr.* 20, pp 287 – 698.
- VODYUNITSKIY, YU. N. (1981) «Formation of ferromagnetics in sod-podzolic soil». *Pochvovedenye*, n°5, pp. 114-122.
- WALLING, D.E., PEARTY, M. R., THOMPSON, R. & OLDFIELD, F. (1979) «Suspended sediment sources identifying magnetic measurements». *Nature*, 281, pp. 110-113.

