

EXPLOITATION DES MESURES MAGNÉTIQUES DANS L'ÉTUDE DE L'ÉTAT DE STABILITÉ DES SOLS: CAS DES BASSINS-VERSANTS ABDELALI ET MARKAT (PRÉRIF-MAROC)

*Faleh Ali*¹, *Bouhlassa Saïdati*² et *Carmelo Conesa García*³

Universidad de Rabat y Universidad de Murcia

RESUMEN

En el presente artículo se realiza un estudio de susceptibilidad magnética, aplicada a la evaluación de la erosión hídrica y la determinación de las fuentes potenciales de sedimentos en dos áreas vertientes del Prérif (Marruecos): las cuencas de AbdelAli y Markat. Como técnica de medición se emplea el susceptibilómetro Bartington tipo MS2, que crea un campo magnético alternativo débil y depende de las propiedades intrínsecas de la muestra (naturaleza mineralógica, concentración, tamaño y forma de las partículas sedimentarias...). Finalmente, con el fin de definir áreas de erosión y sedimentación en las cuencas vertientes estudiadas, se analiza de forma detallada la respuesta y susceptibilidad magnética de los suelos, en relación con su composición mineralógica y profundidad.

Palabras clave: erosión hídrica, fuentes potenciales de sedimentos, suelos, susceptibilidad magnética, Prérif, cuencas vertientes.

RÉSUMÉ

Dans cet article on fait un étude de susceptibilité magnétique appliquée à l'évaluation de l'érosion hydrique et la détermination des sources potentielles de sédiments dans deux bassins versants du Prérif (Maroc): les bassins de AbdelAli y Markat. Comme techniques de méditation on emploie un susceptibilomètre Bartington type MS2, créant un champ magnétique alternatif faible et en dépendant des propriétés intrinsèques de l'échantillon. À fin

Fecha de recepción: 23 de mayo de 2003. Fecha de aceptación: 19 de enero de 2004.

1 Département de Géographie, Saïs Fes, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Maroc.

2 Département des Sciences, Université Mohamed V, Rabat, Maroc.

3 Departamento de Geografía Física, Humana y Análisis Geográfico Regional, Facultad de Letras, Campus de La Merced. 30001 MURCIA (España). E-mail conesa@um.es

de définir les aires d'érosion et de sédimentation on dédie une spéciale attention à la réponse et la susceptibilité magnétiques des sols en relation avec leur composition minéralogique et profondeur.

Termes clef: érosion hydrique, sources potentielles de sédiments, sols, susceptibilité magnétique, Prérif, bassins versants.

INTRODUCTION

La prédominance de roches tendres, l'absence de végétation et la brutalité des pluies dans le Prérif, accélèrent l'érosion hydrique et favorisent le déclenchement de crues parfois catastrophiques, telles que celles survenues en Automne 1995 et 2000 au nord de Fès et de Taza et qui ont causé des dégâts humains et matériels importants. Ces crues charrient des quantités considérables de sédiments et les déposent dans les retenues lacs collinaires.

Au début des années 90, l'état a fait construire une dizaine de lacs collinaires sur des affluents de l'oued Ouergha en amont du barrage Alwahda et sur des affluents de l'oued Aknoul en amont du barrage Mohmed V. La capacité de chacun de ces lacs est de quelques dizaines de milliers de mètres cube d'eau recueillie sur des bassins versants de quelques hectares à quelques dizaines de kilomètres carrés.

La construction de ces lacs visait La protection de des retenues des barrage Alwahda et Mohmed V et la mise à la disposition de la population d'une ressource en eau pouvant servir aux besoins domestiques, à l'abreuvement du bétail et à la micro-irrigation. Ces lacs collinaires ont été perçus comme une ressource en eau supplémentaire qui contribuera au développement socio-économique local du milieu rural. Cependant le comblement rapide de ces lacs par les sédiments est allé à l'encontre du développement agricole attendu.

Dans le but de définir les zones sources de sédiments qui ont participé au colmatage des retenues, d'évaluer les variations spatiales des taux d'érosion et de classer les zones en fonction de leur degré de remaniement dans les bassins versants des oueds Merkat et Abdelalli, nous avons adopté la susceptibilité magnétique des particules des sédiments de la retenue et des sols des bassins versants comme méthode d'étude.

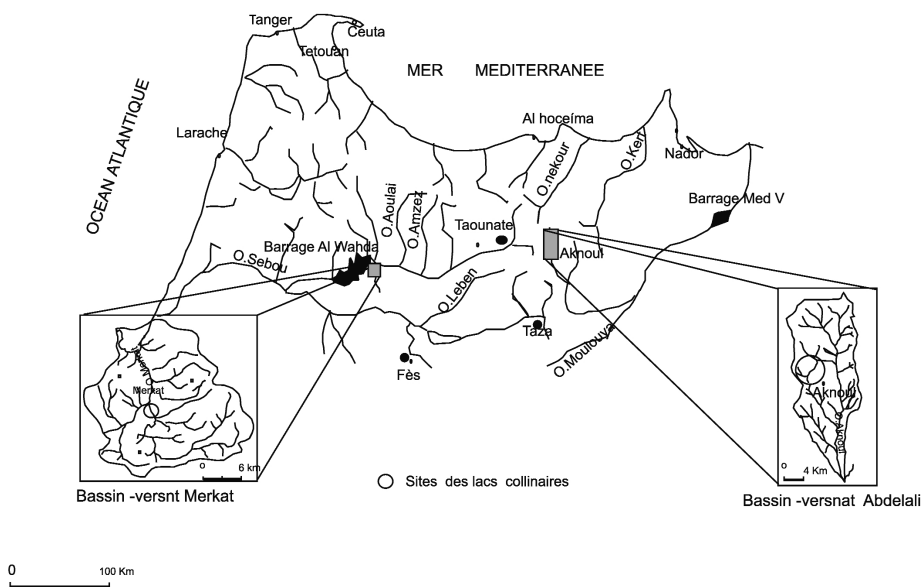
PRÉSENTATION DES SITES D'ÉTUDE

Cadre géographique

Pour appliquer les techniques de la susceptibilité magnétique dans l'évaluation de l'érosion hydrique et la détermination des sources potentielles de sédiments nous avons choisi deux sous bassins versants. Le premier se situe dans le domaine mésorifain au Nord de Taza et le deuxième dans le Prérif central au nord de Fès.

Le sous bassin versant de Merkat appartient à la partie méridionale du sillon externe de la chaîne rifaine. Il s'inscrit entre les bassins subsidés du Miocène post nappe du Moyen Ouergha et la ligne des sofs qui constitue la limite septentrionale du prérif central.

FIGURE 1
Situation des bassins-versants étudiés



La zone est couverte par trois grandes unités structurales:

- la Nappe préifaine qui se caractérise par la prédominance de matériaux tendres essentiellement marneux.
- les synclinaux de la nappe d'Ouezzane formée essentiellement par des marno-calcaires, des flyschs et des bancs gréseux,
- les formations du Miocène post-nappe constituées par une épaisse série marneuse couronnée par endroits par des bancs gréseux.

Le paysage morphologique est constitué essentiellement par un système de hautes et de basses collines, désignées par un réseau hydrographique dense. Les crêtes sommitales correspondent aux affleurements de grès, de marno-calcaires; alors que les basses collines sont façonnées dans les marnes et les flyschs.

Climat, végétation et occupation du sol

La zone, objet d'étude, se situe essentiellement dans l'étage bioclimatique aride supérieur à variante fraîche. Les moyennes annuelles des précipitations enregistrées dans les stations d'Aknoul et de l'Quartzagh sont respectivement de 471 mm et de 405 mm.

Le dépouillement des données pluviométriques relatives aux deux stations étudiées, a montré que les précipitations moyennes annuelles diminuent dans la direction ouest-est. En général, le maximum de ces moyennes pluviométriques se présente en février et

décembre pour les deux stations. Cependant, les précipitations les plus minimales (inférieures à 10 mm) sont enregistrées en juillet et août.

Dans le bassin versant de Abdelalli, la forêt forme des peuplements homogènes ou mixtes. Ils sont composés par une végétation naturelle et des reboisements. Les principales espèces forestières présentes sont: le Pin d'Alep ('*Pinus halepensis*'), la Thuya de berberie ('*Tetraclinis articulata*'), le Chêne vert ('*Quercus rotundifolia*'). Ces formations végétales sont dans un état très dégradé sous l'effet de l'action anthropique exercée par la population riveraine (coupes abusives).

Le bassin versant de l'oued Merkat est à vocation agricole. On distingue au niveau de l'utilisation du sol: i) des secteurs de cultures annuelles qui représentent plus de 75% de la superficie. Ils sont occupés par la céréales (blé dur, blé tendre, orge, avoine) et les légumineuses (fèves, pois chiche, petits pois, lentilles); ii) des secteurs d'arboricultures qui représentent le reste de la superficie du bassin. Ils sont formés essentiellement par l'olivier.

MÉTHODE D'ÉTUDE

La susceptibilité magnétique est la faculté d'un échantillon de s'aimanter sous l'application d'un champ magnétique faible (Thompson & Oldfield, 1986).

La susceptibilité magnétique exploitée dans cette étude est celle mesurée par un susceptibilomètre Bartington type MS2 créant un champ alternatif faible de l'ordre de 0.1mT. Elle dépend des propriétés intrinsèques de l'échantillon (nature minéralogique, concentration, taille et forme des grains).

L'échantillonnage et le carottage ont été effectués en se basant sur la carte des pertes en sol, résultat de la modélisation de l'érosion hydrique par l'équation universelle des pertes en sol de WISCHMEIER et SMITH (1978) intégrée dans un système d'information géographique (SIG-PAMAP). Cette carte synthétique nous a permis de distinguer 10 zones, présentant une combinaison unique des cinq paramètres qui contrôlent l'érosion (pente, agressivité climatique, érodibilité des sols, utilisation des sols et pratiques anti-érosives).

La susceptibilité est définie par

$$M = K * H \text{ ou } J = \chi \cdot H$$

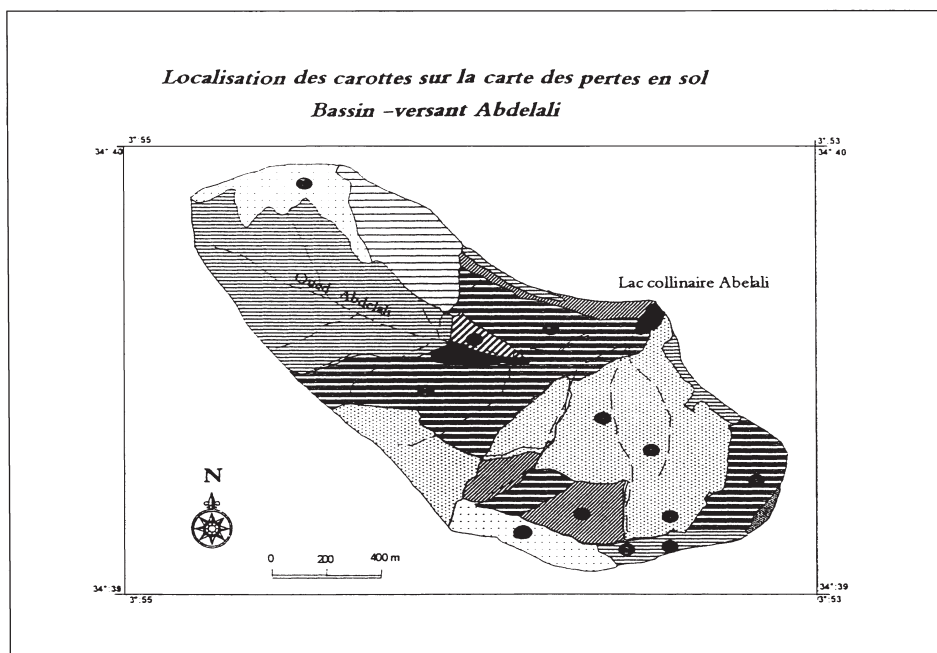
Où H est le champ magnétique appliqué, M et J sont respectivement les aimantations par unité de volume et de masse, K et χ sont respectivement les susceptibilités volumiques et massiques.

Le susceptibilomètre MS2 permet de mesurer la susceptibilité magnétique à deux fréquences 0,47 kHz et 4,7 kHz, conduisant respectivement aux susceptibilités à basse fréquence χ_{bf} et haute fréquence χ_{hf} . La susceptibilité à fréquence dépendante χ_{fd} est donnée selon Thompson & Oldfield (1986) par la relation:

$$\chi_{fd}\% = 100 \cdot (c_{bf} - c_{hf}) / c_{bf}$$

Ce paramètre dépend de la nature des tailles des grains magnétiques et des contributions des minéraux paramagnétiques et ferromagnétiques grossiers.

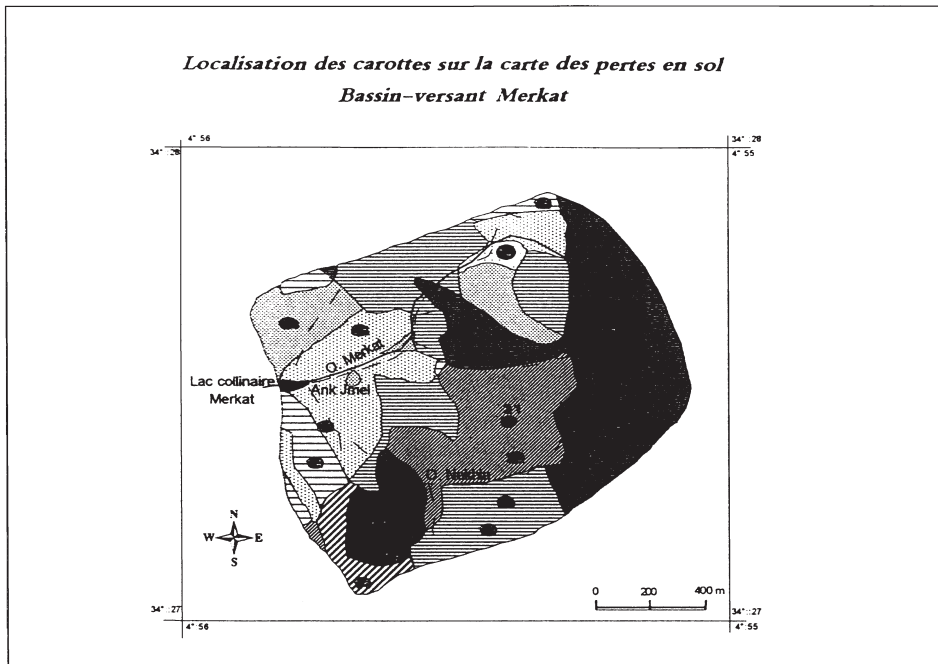
FIGURE 2
Localisation des carottes sur la carte des pertes en sol. Bassin versant Abdelali



Unités	Carottes	Pentes	Lithologie	Sols	Utilisation des sols
■ (8-9-10) >100 T/H/An	9 8	>35 >35	Marno-calcaire pélites et schistes	Substrat nu Sols calcimagnésiques	Inculte Matorrale dégradé- parcours
▨ (7) 50-100 T/H/An	5 12 T	>35 15-25	Marno-calcaire Marno-calcaire	Sols peu évolués Sols peu évolués	Boisements-forêt Matorrale dense
▧ (6) 35-50 T/H/An	11	>35	Marno-calcaire	Sols peu évolués	Matorrale dégradé- reboisement
▩ (5) 20-35 T/H/An	1	>35	Marne + Marno-calcaire	sols minéraux bruts	Boisement dégradé- parcours
▪ (4) 15-20 T/H/An	2	>35	Marno-calcaire	sols minéraux bruts	Boisement dégradé- parcours
▫ (3-2) 7-15 T/H/An	10 T 4 3	15-25 15-25 15-25	Marno-calcaire Marno-calcaire Marno-calcaire	Sols peu évolués Sols peu évolués Sols peu évolués	Matorrale claire Cé é les Cé é les
▬ (1) < 7-15 T/H/An	13	<15	Marno-calcaire	Sols calcimagnésiques	Cé é les
■ Retenu du lac	6	<15	Marno-calcaire	sols minéraux bruts	Inculte

T: parcelles témoins

FIGURE 3
Localisation des carottes sur la carte des pertes en sol. Bassin versant Merkat



Unité s	Carottes	Pentes en %	Lithologie	Sols	Utilisation des sols
(8-9-10) >100 T/H/An	28	32	Marnes	Sols Minéraux bruts	Inculte
	27	32	Marnes	Sols Minéraux bruts	Inculte
	17	23	Marnes	Régosols	Inculte
	18	25	Marnes	Régosols	Inculte
(7) 50-100 T/H/An	16	31	Marno-calcaire	Sols bruns calcaires	Céréales et légumineuses
(6) 35-50T/H/An	21	18	Marno-calcaire	Sols bruns calcaires	Céréales et légumineuses
	22	15	Marne- sableuse	Virtisols	Céréales et légumineuses
(5) 20-35 T/H/An	19	18	Marnes	Virtisols	Oliviers+ céréales
	20	15	Marnes	Virtisols	Oliviers+ céréales
	24 T	13	Marnes	Virtisols	Doum
(4) 15-20 T/H/An	14	23	Marno-calcaire	sols calcimagnésiques	Céréales et légumineuses
	15	15	Marno-calcaire	sols calcimagnésiques	Céréales et légumineuses
(3-2) 7-15 T/H/An	25	23	Marno-calcaire	sols calcimagnésiques	Céréales et légumineuses
	26	14	Marno-calcaire	sols calcimagnésiques	Céréales et légumineuses
(1) < 7-15 T/H/An	23 T	14	Marno-calcaire	sols bruns calcaires	Doum

T: parcelles témoins

Pour se départir de ces dernières, Foster, Evan & Heller (1994) ont introduit le paramètre du facteur Fc% qui se définit comme suit:

$$Fc\% = 100 \cdot ((\chi_{bf} - \chi_{hf}) / \chi_{bf} - \chi_p)$$

χ_p est la susceptibilité due aux minéraux paramagnétiques et ferromagnétiques grossiers.

L'exploitation de la variation de $\Delta\chi = \chi_{bf} - \chi_{hf} = f(\chi_{bf})$ pour une série d'échantillons des sols, nous a permis de déterminer les familles de la minéralogie magnétique et la taille moyenne des grains. L'évolution de la susceptibilité magnétique en fonction de la profondeur des profils pédologiques va nous permettre de caractériser le comportement magnétique de l'horizon superficiel qui est étroitement lié à l'état de dégradation ou stabilité des sols.

ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Interdépendance ($\chi_{bf} - \chi_{hf}, \chi_{bf}$): Sous bassin AbdelAli

La courbe représentative de $\Delta\chi = \chi_{bf} - \chi_{hf} = f(\chi_{bf})$ de la fraction des sols supérieure à 2mm des profils est linéaire avec une bonne corrélation ($R^2 = 86\%$) (figure 4). Ce qui indique que le sol du site AbdelAli présente une seule population du point de vue minéralogie magnétique. La réponse magnétique des sols semble dominée par leur minéralogie ferromagnétique (s.l) avec des concentrations et une taille de grains magnétiques variables.

Cette population peut être divisée en trois classes:

- Une classe constituée principalement des échantillons qui présentent des valeurs de susceptibilité faibles, inférieures à $30 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ (cercles vides). Elle correspond aux profils prélevés sur des pentes élevées ($P \geq 25\%$).
- Une deuxième classe d'échantillons caractérisée par des valeurs relativement élevées de la susceptibilité (cercles pleins). Elle correspond aux profils prélevés sur des terrains de culture et/ou sur des pentes faibles ($P \leq 15\%$).
- La dernière classe constituée particulièrement des échantillons de la retenue, aux susceptibilités très faibles (triangles pleins).

A $\chi_{bf} - \chi_{hf} = 0$, $\chi_{bf} = \chi_p = 9 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$. Cette valeur indique une contribution des minéraux paramagnétiques et ferromagnétiques grossiers non négligeable voire considérable au signal magnétique.

Le coefficient directeur de la courbe de tendance représente le facteur Fc% moyen de la population. Il est de l'ordre de 11%, ce qui révèle la prédominance de grains monodomaines mD à probablement superparamagnétiques SP.

La corrélation linéaire du $\chi_{bf} - \chi_{hf} = f(\chi_{bf})$ de la fraction des sols inférieure à 2 mm de tous les profils indique aussi une même population minéralogique. La valeur de χ_p de l'ordre de $3.3 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, reflète une contribution négligeable des minéraux paramagnétiques et ferromagnétiques grossiers. La grande différence entre les valeurs de χ_p relatives aux

FIGURE 4

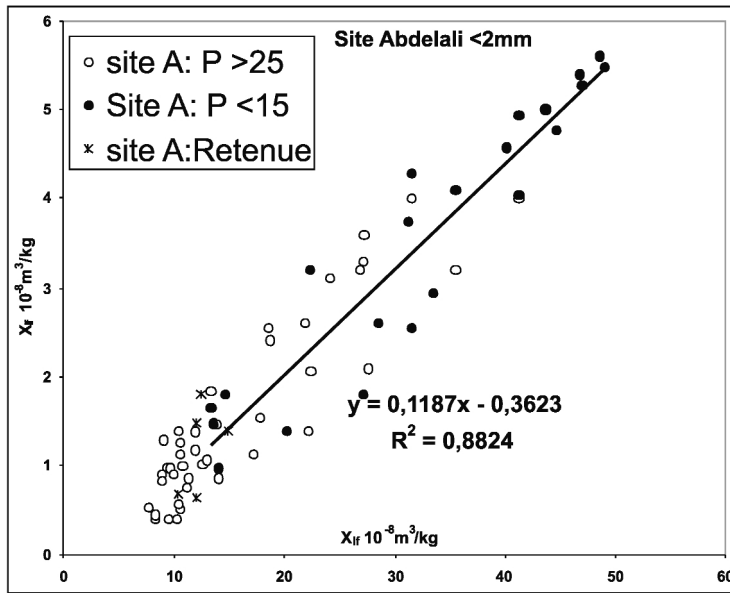
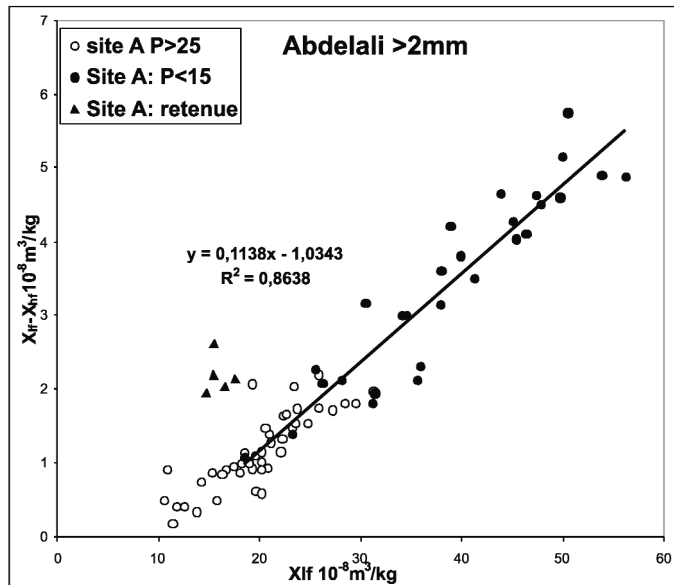
Variation de $\chi_{bf} - \chi_{hf}$ en fonction de χ_{bf} de la fraction des sols inférieure à 2mm

FIGURE 5

Variation de $\chi_{bf} - \chi_{hf}$ en fonction de χ_{bf} de la fraction des sols supérieure à 2mm

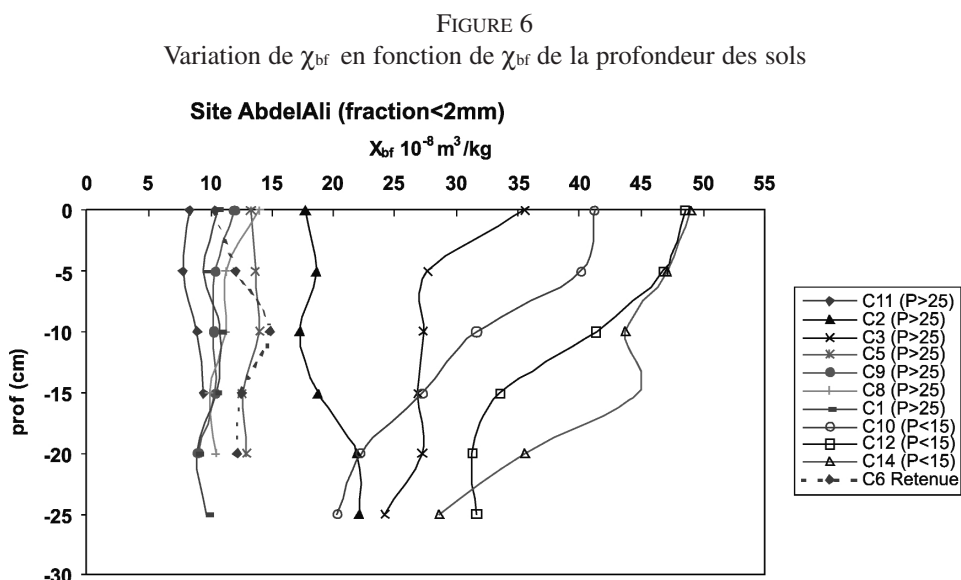
fractions des sols supérieures et inférieures à 2 mm, reflète l'importance des minéraux paramagnétiques marno-calcaires dans les profils de sols.

Les porteurs d'aimantation, particulièrement de nature ferromagnétique, sont plutôt monodomaines. Les valeurs élevées de F_c excluent la présence d'assemblage de minéraux magnétiques multidomaines. Cette situation peut être le résultat d'un processus d'érosion-déposition-érosion mais aussi d'une transformation pédogénétique ou chimique locale qui n'est favorisée que par des conditions particulières de stabilité des sols (sous forêt ou matorral dense ou des terrains de cultures bien aérés de pentes très faibles). La faible taille des grains magnétiques traduirait donc le phénomène d'érosion que subit le bassin et que l'observation enregistre les valeurs de susceptibilité enregistrée sur les profils de sédiments prélevés dans la retenue, aussi bien pour les fractions de sols supérieures qu'inférieure à 2 mm concordent parfaitement avec celles des sols des sites 1, 8, 9, 5, 11 et 10 de pentes élevées > 25 . Elles indiquent ainsi les sources des sédiments.

Les faibles $D_c = c_{bf} - c_{hf}$ associées aux faibles valeurs de c_{bf} enregistrées dans les sédiments de retenue dénotent un dépôt de porteurs magnétiques monodomaines plutôt que superparamagnétiques, fortement dilués par une matrice para et diamagnétique. Ces constatations ne sont pas en faveur d'un transport lent des sédiments par ruissellement, mais de phénomène d'érosion sévère et brutale en nappe probablement.

Evolution de la susceptibilité χ_{bf} en fonction de la profondeur des sols: Sous bassin AbdelAli

L'analyse de la figure 6 représentant la variation de la susceptibilité en fonction de la profondeur des sols met en évidence deux groupements de profils magnétiques:



Des profils croissants de susceptibilités relativement élevées, de bas en haut des colonnes des sols. Cette évolution qui reflète une augmentation des teneurs en minéraux ferromagnétiques (s.l) indique que ces sols sont le siège d'une transformation chimique ou pédogénétique. Ces mécanismes traduisent une relative stabilité des sols.

Un deuxième groupe de profils des sols, qui présentent de susceptibilités faibles, de l'ordre de celle de substratum marno-calcaire, quasi - constantes le long des colonnes de sols.

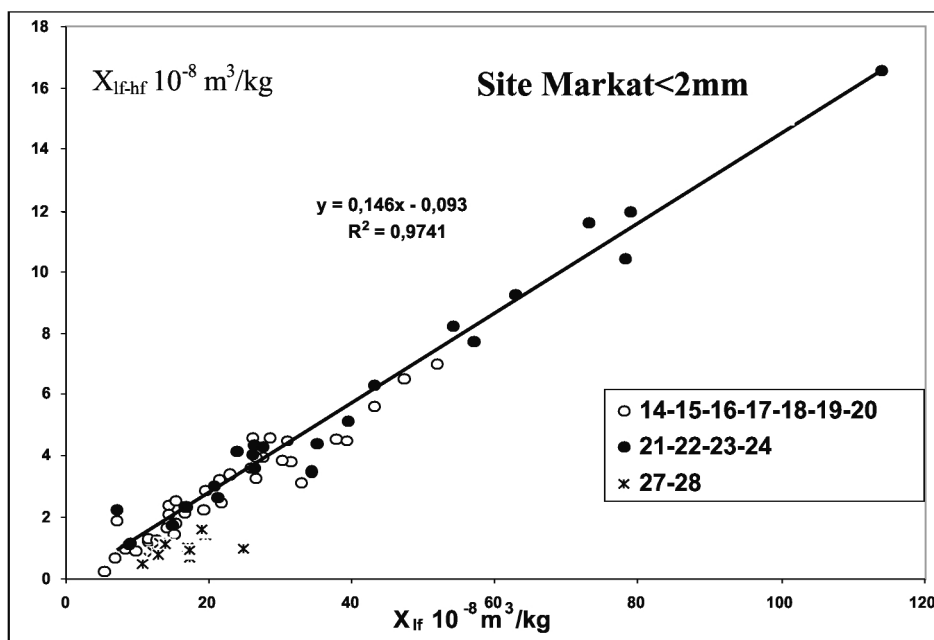
Les profils de susceptibilités de ces sols encadrent celui du sédiment prélevé dans la retenue. Ces résultats témoignent de la forte érosion dans les sites correspondant aux profils. Ils constituent une preuve de l'ablation presque totale des sols. Ils désignent par ailleurs les zones sources de sédiments qui envasent la retenue.

Interdépendance ($\chi_{bf} - \chi_{hf}$, χ_{bf}): Sous bassin Markat

La variation linéaire de $\Delta\chi = \chi_{bf} - \chi_{hf} = f(\chi_{bf})$, dans les fractions de sol de granulométrie inférieure à 2mm (figure 7) indique: i) Une population minéralogique homogène dans tout le sous-bassin; ii) une taille de minéraux magnétiques plutôt monodomaine, avec un coefficient Fc très élevé voisin de 14%; et iii) une réponse magnétique dominée par la minéralogie ferromagnétique (s.l).

FIGURE 7

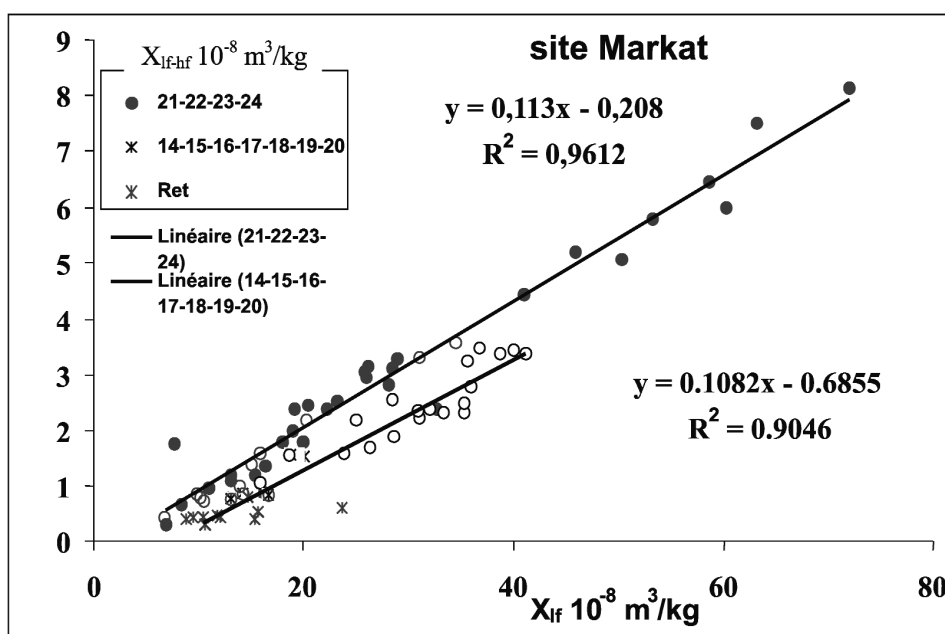
Variation de $\chi_{bf} - \chi_{hf}$ en fonction de χ_{bf} de la fraction des sols inférieure à 2mm



Les sols sous - forêt ou couvert de doum (cercles pleins) se distinguent des sols cultivés (cercles vides). Ces derniers présentent des susceptibilités plus faibles liées à la dilution par les opérations de labour des minéraux magnétiques par les horizons profonds des sols.

L'analyse des $\Delta\chi = \chi_{bf} - \chi_{hf} = f(\chi_{bf})$ des fractions de sols de granulométrie supérieure à 2mm, conduit à la distinction de deux corrélations linéaires (avec des coefficients de corrélation R^2 très élevés) entre les différents profils: une droite qui regroupe l'ensemble des profils sous-forêt ou doum (cercles pleins) et une autre autour de laquelle se distribuent les points relatifs aux sols cultivés.

FIGURE 8
Variation de $\chi_{bf} - \chi_{hf}$ en fonction de χ_{bf} de la fraction des sols supérieure à 2mm



Les coefficients directeurs élevés des ces droites (>10%) confirment la taille monodomaine des matériaux magnétiques déjà mise en évidence dans les fractions < 2mm. Les deux droites définissent des c_p respectivement égaux à $1,8 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ et $6,4 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$. Cette dernière valeur montre l'importance des fractions para, diamagnétique et ferromagnétiques grossiers dans le comportement magnétique des sols cultivés et justifie le phénomène de dilution des ferromagnétiques (s.l.) dans ces sols.

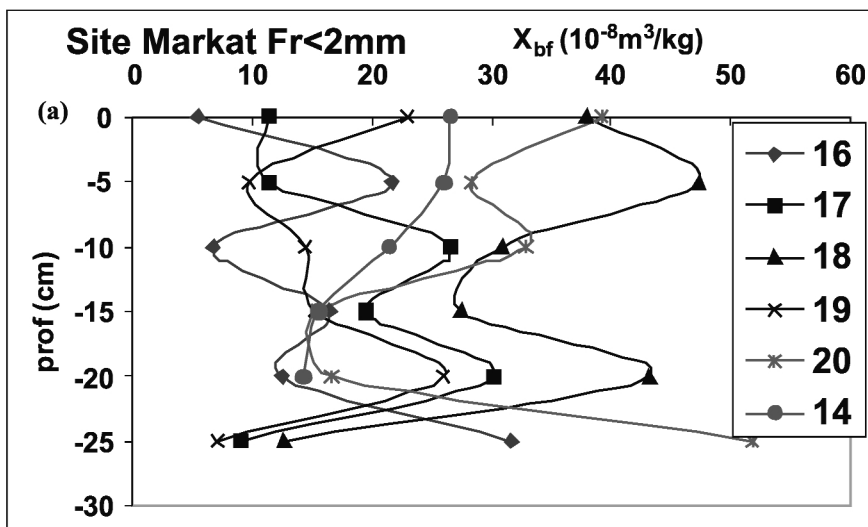
Evolution de la susceptibilité χ_{bf} en fonction de la profondeur des sols: Sous bassin Markat

La variation de la susceptibilité en fonction de la profondeur des sols (Figure 9 a) permet de distinguer deux groupements des profils magnétiques:

- Le premier groupement constitué des profils sous culture, de faible susceptibilité, montre des variations de χ_{bf} en dents de scie, dues aux labours qui assure le mélange des horizons de sols.

Les valeurs exceptionnellement élevées enregistrées en profondeur dans les profils 16 et 20 peuvent être expliquées par une dissolution - lessivage des minéraux ferromagnétiques (s.l), suivie d'une migration des ions ferreux plus mobiles et leur concentration en profondeur. Ce comportement est fort probablement lié à la couverture arboricole.

FIGURE 9 (a)
Variation de χ_{bf} en fonction de la profondeur des sols

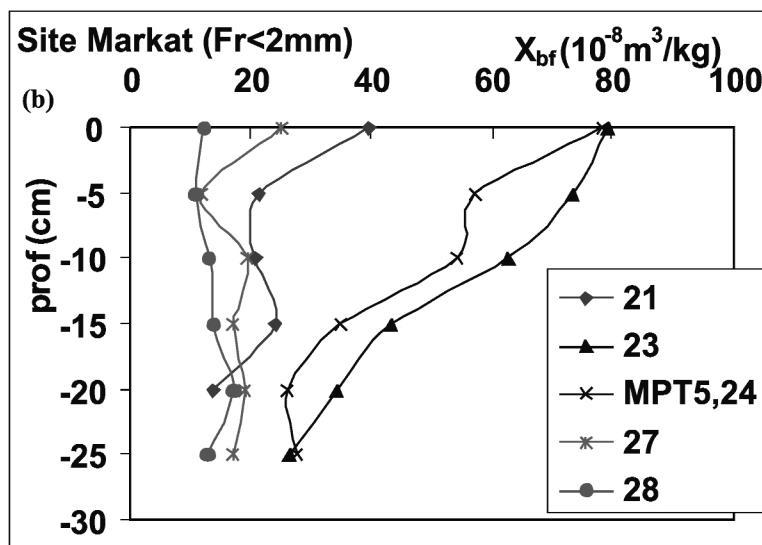


Les variations en dents de scie dans les 25 premiers centimètres des profils dénotent bien un état de remaniement des sols cultivés, soumis aux érosions hydrique et mécanique successive aux opérations de labour. Par contre une augmentation monotone de la susceptibilité dans les 25 premiers centimètres, témoignerait d'une formation progressive de matériaux ferromagnétiques (s.l) tel que la maghémite favorisée par l'aération des sols et les changements brusques de climat. C'est le cas probablement du site cultivé 14, qui dénote une pratique culturale plutôt stabilisatrice des sols.

- Les sols sous forêt représentés par les profils 23 et 24 montrent une légère augmentation de bas en haut du profil reflétant une transformation chimique des minéraux du substratum en minéraux ferromagnétiques (s.l) (figure 9b). Ces sols seraient le siège de transformations chimiques qui traduisent des situations de relative stabilité des sols.
- Les sols sous doum représentés par les profils 21, 27 et 28 ont des susceptibilités de l'ordre celles du substratum (Figure 9 b). Ils sembleraient faiblement remaniés.

FIGURE 9 (b)

Variation de χ_{bf} en fonction de χ_{bf} de la profondeur des sols du site Markat



Les profils de susceptibilités enregistrés suggèrent une fixation des sols par ces arbustes plutôt qu'un développement local des sols qui n'est en tout cas pas traduit par les variations de la susceptibilité.

CONCLUSIÓN

Les mesures de la susceptibilité magnétique dans les bassins-versants Abdelali et Merkat, ont permis une estimation qualitative du degré du remaniement des sols et une classification des unités morphopédologiques en fonction de leur degré de dégradation. En distinguant des milieux instables sources de sédiments et milieux stables qui se caractérisent par un pédogenèse avancée.

L'exploitation de ces mesures magnétiques a permis d'identifier la nature et la taille et les domaines des grains magnétiques. En se basant sur ces paramètres on a pu localiser les sites d'érosion et les sites de dépôts ainsi que le rôle de l'intervention humaine dans la

morphodynamique actuelle surtout dans les premiers vingt cinq centimètres par l'érosion mécanique et le labour répété.

Les résultats de la classification des milieux en fonction de la variation des valeurs de la susceptibilité magnétique se calquent sur ceux obtenus par la carte de l'érosion potentielle issue de l'intégration de l'équation universelle des pertes en sol de WISCHMEIER et SMITH (1978) dans un système d'information géographique.

BIBLIOGRAPHIE

- Wischmeier, W. A. and D. D. Smith (1978): *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. U. S. Department of agriculture, agricultural handbook n° 537, p. 58.
- Thompson, R. F. Oldfield, (1986): *Introduction to environmental magnetism*. George Allen & Unwin, London.
- Forster, Th.; Evans, M. E.; Heller, F. (1994): *The frequency dependence of low field susceptibility in loess sediments*. Geophys D. J. 118, pp. 636-642.