

Utilisation de la couleur des sols pour l'évaluation de leur taux de matière organique.

Un test simple pour des sols limoneux du piémont pyrénéen.

Dominique ARROUAYS (*)

Isabelle VION (**)

RÉSUMÉ

Au sein d'un ensemble pédo-paysagique - les sols limoneux du piémont pyrénéen - nous testons la possibilité d'utiliser la couleur des sols, déterminée par comparaison avec la charte Munsell, pour évaluer les taux de matière organique d'échantillons de sols.

La couleur de 50 échantillons (fig. 1) de l'horizon labouré et de la couche 30 - 50 cm est déterminée à l'aide du code Munsell. Six observateurs réalisent ces déterminations indépendamment les uns des autres, sur des échantillons séchés à l'air et tamisés d'une part, puis réhumectés et pétris d'autre part (fig. 2).

Pour chacun des observateurs, la clarté Munsell est corrélée négativement avec le taux de carbone (fig. 3). Les coefficients de corrélation, et les pentes des régressions obtenues, sont du même ordre pour tous les observateurs. Cependant, les estimations visuelles de la clarté présentent une étendue moyenne de 0,7 unités. On note que la régression est améliorée si l'on ne retient, comme valeur de clarté, que la valeur dominante sur laquelle s'accorde la majorité des observateurs.

Un modèle global est proposé afin de prédire l'appartenance d'un échantillon à une classe de taux de carbone en utilisant la clarté (fig. 4 et 5).

Une validation de terrain est effectuée, sur un autre jeu de 62 échantillons dont les couleurs ont été déterminées au champ dans des conditions hydriques comparables (fig. 6). 81 % des échantillons s'avèrent correctement classés par le modèle établi à partir des données de laboratoire.

Pour ce contexte pédologique, il est donc possible de relier quantitativement la couleur des sols avec leur taux de matières organiques et de mettre au point un test permettant d'objectiver le jugement du pédologue en ce qui concerne l'évaluation visuelle de ce caractère. Ces résultats laissent également espérer des possibilités d'utilisation de données de télédétection.

TESTING SOIL COLOUR OBSERVATION FOR PREDICTING SOIL CARBON CONTENT. A simple test for loamy soils of french pyrenean piedmont.

The colour of soil samples from the tilled surface and 30 - 50 cm horizons of loamy soils in south west of France (fig.1) were observed and classified through the Munsell soil charts. The colour of 50 samples was independently measured in the laboratory by

(*) INRA SESCOF, antenne de Bordeaux, 33140, Pont de la Maye.

(**) Université Bordeaux I, Sciences de la terre, 33045 Talence.

6 observers using the MUNSELL SOIL COLOR CHARTS (fig. 2). For each observer, the Munsell value was correlated with carbon content (fig. 3). The correlation coefficients, and the slope of the regression curves were not significantly different between all the observers. However, visual estimations of the Munsell colour value by 6 observers for each of the 50 samples showed variations. A global model was proposed for predicting soil carbon content classes using the Munsell colour value (fig. 4 and 5). A field validation was realized, using another set of 62 field samples and colour determinations (fig. 6). 81 % of the field samples were correctly classified by using soil colour. In consequence, for this pedological context, the soil colours identified in the field according to the MUNSELL SOIL COLOR CHARTS could help the surveyor in classifying soil samples at different levels of organic matter .

INTRODUCTION

Il existe actuellement peu de tests simples de terrain permettant l'évaluation et l'analyse spatiale des taux de matière organique des sols cultivés. Même lorsque de nombreuses déterminations analytiques ponctuelles sont réalisées (par exemple LELEUX *et al.*, 1988), l'extrapolation de leurs résultats se heurte à deux difficultés majeures :

- Sous végétation naturelle, les variations dans l'espace peuvent être rapides, principalement liées au régime hydrique et à la végétation.

- Lors de la mise en culture, l'évolution liée à l'histoire culturale se surimpose à cette variabilité initiale.

La couleur des sols est un caractère relevé systématiquement dans les études cartographiques (SHIELDS *et al.*, 1965 ; JAMAGNE, 1967 ; SOIL SURVEY STAFF, 1975), et pris en compte dans de nombreux systèmes de classification [SHIELDS *et al.*, (1965) citent à ce propos la classification canadienne ; SEGALIN (1977), cite certaines classifications régionales], ainsi que dans un certain nombre de références du Référentiel Pédologique (BAIZE et GIRARD, 1992). L'étude de la couleur s'est développée principalement en relation avec les propriétés spectrales des sols et l'utilisation des données fournies par la télédétection (GIRARD et GIRARD, 1977 ; GERBERMANN et NEHER, 1979 ; KRISHNAN *et al.*, 1980, STONER *et al.*, 1980, HUETE *et al.*, 1984 ; GIRARD, 1985 ; COURAULT, 1986 et 1989 ; MELVILLE et ATKINSON, 1985 ; ESCADAFAL et POUGET, 1986). ESCADAFAL *et al.* (1988) ont montré que la couleur des sols déterminée sur le terrain permet de caractériser rapidement le comportement spectral du sol dans le domaine visible, et que sa fiabilité peut être bonne, si l'on s'entoure de certaines précautions (ciel clair, neutralité de l'environnement visuel, orientation de l'observateur au nord, heures de début et de fin de journées exclues).

En ce qui concerne l'utilisation opérationnelle de la couleur ou de la réflectance des sols pour la détermination des taux de matière organique, les études sont moins nombreuses, et nécessitent de se fixer dans un cadre pédologique précis.

Il a été montré que la matière organique des horizons cultivés est un constituant qui affecte leur réponse spectrale dès lors que son taux est supérieur à 1,5 %, et qui devient prépondérant pour des taux supérieurs à 3 - 4 % (FLAIG *et al.*, 1975 ; SCHREIER, 1977 ; GIRARD et BIALOUSZ, 1988).

Dans quelques conditions pédologiques précises, en se limitant à une gamme de sols restreinte, il a parfois été possible de mettre en évidence des relations quantitatives entre réflectance et teneur en matière organique : par exemple ANDRONIKOV, 1958 ; GERBERMANN et NEHER, 1979 ; KRISHNAN *et al.*, 1980 ; ARROUAYS *et al.*, 1983.

La mise au point de tests simples de terrain pour l'évaluation des taux de matière organique a cependant été peu développée, en particulier en ce qui concerne l'utilisation du système Munsell (MUNSELL SOIL COLOR CHARTS, 1950), pourtant adopté par la majorité des pédologues. Ceci est d'autant plus surprenant que les systèmes codifiés de description sur le terrain (par exemple système STIPA, BERTRAND *et al.*, 1979 et 1984), incluent une évaluation de l'appartenance à une classe de taux de matière organique, évaluation qui s'effectue dans la pratique par une appréciation visuelle du pédologue : il s'agit donc bien d'un test de couleur, qui a parfois donné lieu à des traitements statistiques (GIRARD, 1983), mais qui a rarement été calibré pour permettre des évaluations quantitatives au sein d'un milieu donné.

Dans un contexte pédologique donné, caractérisé par une variabilité importante des taux de matière organique de l'horizon de surface combinée à une relative homogénéité granulométrique (ARROUAYS *et al.*, 1992), nous tentons d'établir et d'étalonner un test simple d'appréciation de la couleur sur le terrain afin de permettre l'affectation d'un échantillon à une classe de taux de matière organique.

I - MATÉRIEL ET MÉTHODE

1. Contexte pédologique

Le test est mis au point avec les sols limoneux plus ou moins humifères développés sur alluvions anciennes des gaves pyrénéens. Leurs caractéristiques générales ont été décrites dans deux publications récentes (ARROUAYS, 1992 ; ARROUAYS *et al.*, 1992).

Nous rappellerons ici succinctement les caractéristiques importantes qui ont conduit au choix de ces sols pour notre travail :

- ces sols présentent une importante variabilité parcellaire des taux de matière organique (dans l'échantillonnage retenu, les taux de carbone varient de 7 à 40 pour mille), liée à l'influence combinée d'une variabilité initiale sous végétation de landes originelles, et de la diversité des dates de mise en monoculture de maïs grain (ARROUAYS, 1991 ; ARROUAYS *et al.*, 1992).

- ils possèdent par ailleurs une assez grande homogénéité granulométrique des horizons de surface (taux de limons totaux de l'horizon de surface le plus souvent compris entre 55 et 80 %, taux d'argile en surface variant de 30 à 12 %, mais le plus souvent compris entre 20 et 12 % (CALLOT et JUSTE, 1971 ; ARROUAYS *et al.*, 1992). Cette homogénéité granulométrique permet de supposer *a priori* que les variations texturales auront peu d'effet sur la couleur des sols.

2. Échantillonnage

Vingt-cinq parcelles cultivées présentant une gamme importante de taux de matière organique, ont fait l'objet d'un prélèvement systématique de huit échantillons de deux

horizons prélevés à la tarière : l'horizon labouré LA, et la couche 30 - 50 cm. Pour chaque horizon, les huit prélèvements ont été mélangés dans un seau et aliquotés sur place. Nous disposons ainsi d'un lot de 50 échantillons ayant des taux de matière organique différents.

Les échantillons ont été séchés à l'air à 20°C, puis tamisés à 2 mm. Une aliquote a permis les déterminations du taux de carbone (méthode Anne) et de la granulométrie. Une autre aliquote a été utilisée pour la détermination de la couleur Munsell.

Les taux de carbone des échantillons représentent une gamme allant de 7 à 40 pour mille. La granulométrie des échantillons est représentée par leur position dans un triangle textural (Fig. 1). Les taux d'argile s'échelonnent entre 14 et 25 %, tandis que les taux de limons totaux sont compris entre 60 et 80 %.

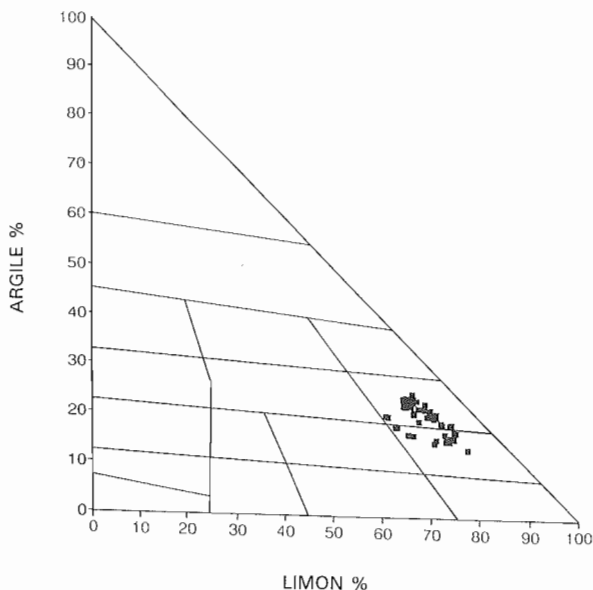


Figure 1 : Répartition des échantillons dans un triangle textural.
Granulometry of samples.

3. Détermination de la couleur

Six observateurs (notés A, B, C, D, E, F) ont réalisé la détermination des couleurs des échantillons, indépendamment les uns des autres.

La couleur à l'état sec de la terre fine, puis la couleur de l'échantillon réhumecté et pétri, ont été déterminées en laboratoire sous éclairage artificiel, par comparaison avec les plages de couleur de la charte Munsell.

On sait depuis longtemps (SHIELDS *et al.*, 1965) que les couleurs des sols ne coïncident que très rarement de façon parfaite avec les pastilles de la charte Munsell. Ainsi, il est classique pour les pédologues de procéder à une interpolation entre ces dernières. Aussi, les déterminations ont-elles été effectuées par interpolation lorsque les

observateurs l'ont jugé nécessaire, en se limitant toutefois à des variations de 0,5 unités en valeur de clarté et de pureté. Cette pratique est critiquable car il n'y a pas linéarité entre les couleurs des différentes pastilles. Elle est cependant en accord avec les usages en vigueur de la plupart des pédologues, ainsi qu'avec les recommandations du Soil Survey Staff (1975).

Un observateur, choisi au hasard (E), a réalisé trois répétitions de ses observations.

4. Validation de terrain

Afin de valider sur le terrain les lois mises en évidence en laboratoire, nous avons repris des données de couleurs déterminées sur le terrain par différents pédologues, pour des sols similaires mais sur des sites différents, au cours des étés 1989 et 1992. A ces périodes d'observation, les observateurs ont déterminé la couleur de la terre fine dans des conditions d'humidité comparables à un séchage à l'air. Ces échantillons ont donné lieu à une mesure du taux de carbone par la méthode Anne. Nous pouvons ainsi juger si les relations établies en laboratoire se vérifient lorsqu'on les applique sur le terrain, dans des conditions d'humidité comparables.

II - RÉSULTATS

1. Étendue des valeurs observées

Toutes les déterminations de couleur se situent dans la teinte 10 YR de la charte Munsell. L'ensemble des échantillons concernés se caractérise donc par une teinte spécifique, par ailleurs très fréquente dans les horizons de surface des sols des climats tempérés.

La répartition des valeurs de clarté et de pureté des échantillons séchés à l'air et réhumectés est représentée par la figure 2.

Les échantillons séchés à l'air se caractérisent par une classe largement dominante de pureté (3). Ce caractère ne semble donc pas permettre un étalement satisfaisant de la population étudiée, vis-à-vis de notre problématique : en effet, plus de 60 % des échantillons sont regroupés dans la même classe, ce qui est en contradiction avec notre objectif qui vise à utiliser la couleur pour prédire l'appartenance à différentes sous-classes au sein d'une gamme étendue de taux de carbone. On observe par contre un étalement important des valeurs de clarté de ces échantillons.

La réhumectation des échantillons provoque un décalage des valeurs de clarté vers des valeurs plus basses, ce qui est logique (compte tenu des effets connus de l'humidité sur la réflectance spectrale des sols), mais également un regroupement de plus de la moitié de la population sur la valeur de clarté la plus faible (3). Différents auteurs avaient déjà noté que ces sols, le plus souvent très sombres à l'état humide, s'éclaircissaient assez fortement en séchant (CALLOT et JUSTE, 1971 ; ARROUAYS, 1992). Ce groupement dans une classe de clarté faible s'accompagne d'un étalement plus important en ce qui concerne la pureté de la couleur.

Au vu de l'ensemble des histogrammes, c'est donc la clarté des échantillons séchés à l'air qui présente le meilleur étalement de la population étudiée.

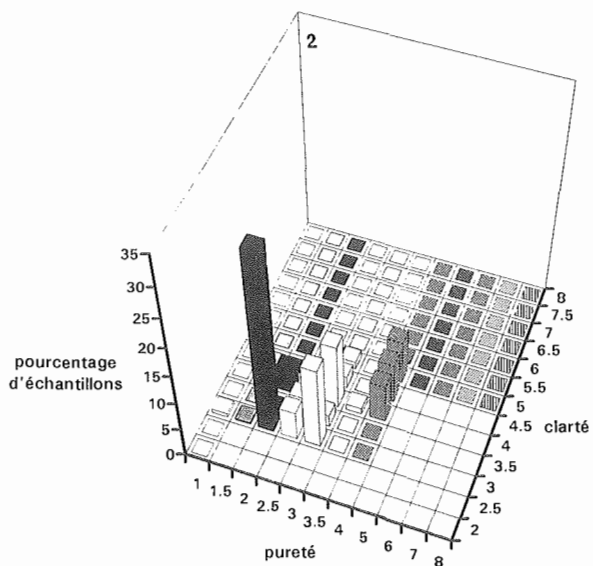
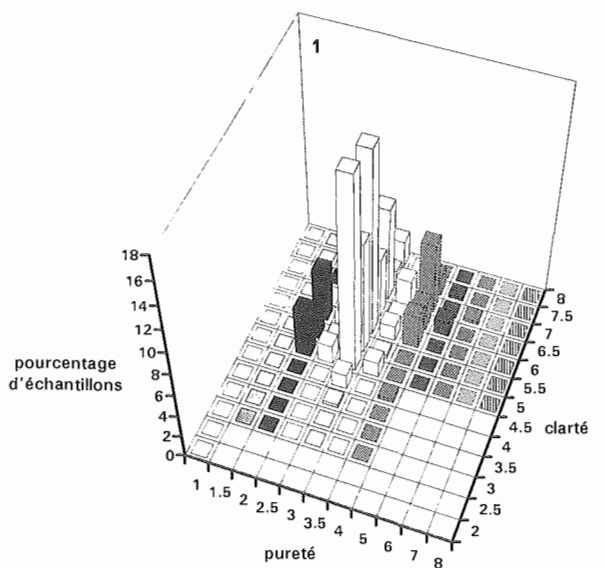


Figure 2 : Répartition des valeurs de clarté et de pureté des échantillons séchés à l'air (1) et réhumectés (2).

Frequency of bi-dimensional histograms of samples Munsell value and chroma. Air-dried (1) wetted (2).

2. Relations couleur - taux de matière organique

Nous avons étudié séparément les relations entre les valeurs de clarté et de pureté et les taux de carbone, pour les échantillons séchés à l'air et réhumectés, afin de juger quelle humidité permettait la meilleure discrimination. Nous avons également testé différents indices comme par exemple la somme de la clarté et de la pureté [comme cela a été proposé par GIRARD et GIRARD (1977)], ainsi que des indices traduisant le changement de couleur entre les deux états hydriques. Aucun de ces différents essais ne donne de meilleurs résultats que la clarté des échantillons séchés à l'air utilisée seule. A titre d'exemple, nous présentons dans le tableau I les coefficients de corrélation entre des valeurs de carbone et différentes données de couleur (clarté, pureté et somme clarté + pureté des échantillons secs et réhumectés, rapport et différence des clartés des échantillons secs et réhumectés). Les coefficients les plus élevés sont obtenus avec la clarté des échantillons séchés à l'air. Aussi nous limiterons nous dans la suite de l'article à l'étude de ce caractère, en relation avec les taux de carbone.

Tableau I : Corrélations couleur-taux de carbone. 1 : clarté (sec) ; 2 : pureté (sec) ; 3 : clarté (humide) ; 4 : pureté (humide) ; 5 : somme clarté + pureté (sec) ; 6 : somme clarté + pureté (humide) ; 7 : rapport clarté (sec) / clarté (humide) ; 8 : différence clarté (sec) - clarté (humide).

Soil colour/carbon content correlations. 1 : value (dried) ; 2 : chroma (dried) ; 3 : value (wetted) ; 4 : chroma (wetted) ; 5 : value + chroma (dried) ; 6 : value + chroma (wetted) ; 7 : value (dried) / value (wetted) , 8 : value (dried) - value (wetted).

Observateurs	corrélations (r^2) couleur - taux de carbone							
	1	2	3	4	5	6	7	8
A	0,77	0,53	0,58	0,51	0,64	0,57	0,04	0,06
B	0,73	0,47	0,61	0,48	0,61	0,49	0,12	0,11
C	0,74	0,52	0,55	0,53	0,59	0,59	0,07	0,08
D	0,60	0,44	0,54	0,57	0,53	0,47	0,06	0,07
E	0,70	0,51	0,49	0,43	0,63	0,53	0,09	0,10
F	0,66	0,45	0,52	0,49	0,62	0,56	0,03	0,05

seuil de signification à 1 % = 0,35

Nous présentons dans la figure 3 les relations obtenues par les 6 observateurs. On constate sur tous les graphiques une relation négative entre la clarté et le taux de carbone, avec toutefois un étalement important des valeurs de carbone observées pour une même classe de clarté (Cf. plus loin, les erreurs standard d'estimation du taux de carbone).

Nous avons calculé les coefficients de corrélation et testé différents modèles de régressions (linéaires, log, x^2) entre les valeurs de clarté (Val) notées par les différents utilisateurs et les taux de carbone (C). Ce sont les régressions linéaires qui ont permis d'obtenir le meilleur pourcentage de variance expliquée. Celles-ci s'écrivent comme suit :

(A) C = 55 - 5,8. Val r = -0,88

(B) C = 57 - 6,1. Val r = -0,85

(C) C = 54 - 5,8. Val r = -0,86

(D) C = 63 - 6,9. Val r = -0,77

(E) C = 59 - 6,3. Val r = -0,84

(F) C = 64 - 7,1. Val r = -0,81

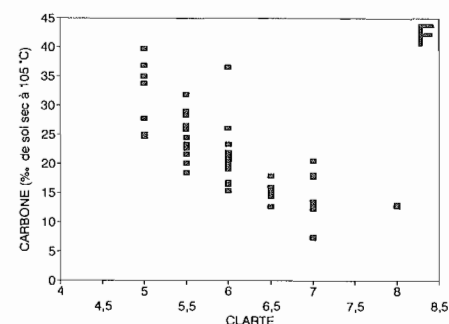
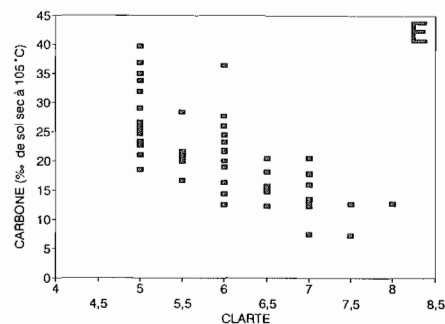
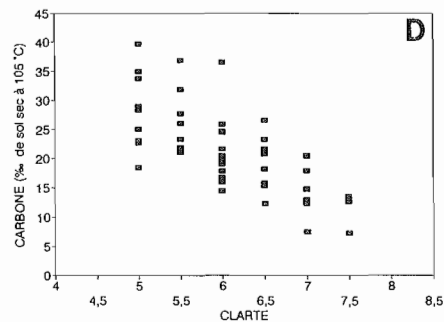
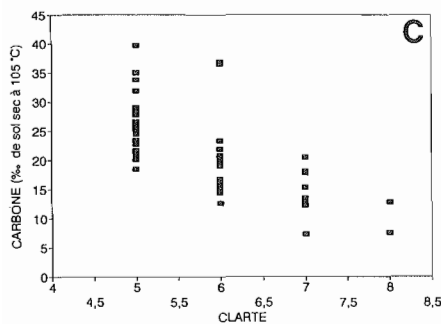
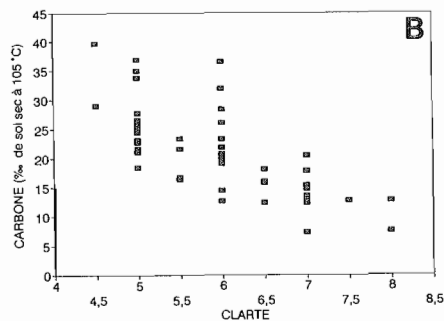
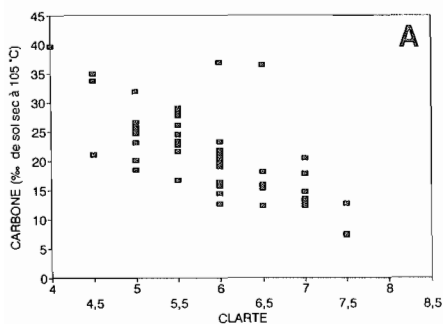


Figure 3 : Relations clarté des échantillons séchés à l'air / taux de carbone, observateurs A, B, C, D, E et F.

Munsell value of air-dried samples versus carbon content (observers A, B, C, D, E, F).

Les erreurs standard d'estimation de C varient de 4,8 à 5,4 selon les régressions. Les erreurs standard d'estimation des pentes de ces régressions sont toutes comprises entre Association Française pour l'Etude du Sol - www.afes.fr - 2010

0,85 et 1. Compte tenu d'un écart maximal entre ces six pentes de 1,3 (de 5,8 à 7,1), et d'un écart maximal de 10 entre les constantes (de 54 à 64), ces régressions peuvent être considérées comme équivalentes.

L'utilisation d'une régression linéaire en fonction de la clarté permet d'expliquer de 60 à près de 80 % de la variance de la couleur (on obtient ces chiffres en élevant au carré le coefficient de corrélation r), selon les différents observateurs. Compte tenu du fait que nous établissons des relations entre une valeur continue (carbone), et une valeur nécessairement discrète (clarté), ce pourcentage de variance expliquée peut être considéré comme satisfaisant.

3. Variabilité des mesures de couleur

Nous avons étudié la répétitivité des observations en comparant les affectations des échantillons entre les 6 observateurs, ainsi qu'entre 3 déterminations effectuées par un même observateur à des dates différentes.

3.1 Variabilité inter-observateurs

Nous avons étudié la fréquence d'affectation par les 6 observateurs de chacun des échantillons à une valeur de clarté dominante. Le tableau II visualise la proportion d'échantillons qui ont été classés dans la même valeur de clarté par les 6 observateurs, ou par 5 observateurs sur 6 ou 4 sur 6, etc. Si une parfaite coïncidence entre les 6 observateurs reste rare (8 % des cas, soit seulement 4 échantillons), on observe néanmoins une assez bonne répétitivité entre les différentes observations : ainsi, dans 98 % des cas, au moins un observateur sur deux affecte une même valeur de clarté à l'échantillon. Un indice global de concordance peut être établi en sommant les produits des deux valeurs de chaque colonne : globalement, les observateurs s'accordent dans 68 % des cas.

Tableau II : Fréquence d'affectation des échantillons dans la même classe dominante de clarté. 6 observateurs.

Frequency of estimations, for the observed dominant Munsell value. 6 observers.

fréquence d'affectation des échantillons dans la même classe dominante de clarté (6 observateurs)	6/6	5/6	4/6	3/6	2/6
pourcentage d'échantillons correspondant à cette fréquence	8 %	32 %	22 %	36 %	2 %

Il reste à noter que si l'on affecte à chaque échantillon la valeur dominante parmi les 6 déterminations (ou en cas de désaccord partagé la moyenne des observations, 3 observateurs affectant la valeur x et trois autres la valeur y), l'équation de régression change peu, mais le coefficient de corrélation augmente sensiblement, étant de -0,93. Ceci semble signifier qu'il est préférable de faire réaliser les déterminations par plusieurs observateurs : ceci est facilement réalisable en laboratoire, mais constitue néanmoins une contrainte majeure en ce qui concerne les observations de terrain.

Nous avons également étudié l'étendue entre les valeurs extrêmes affectées par les six observateurs à chacun des échantillons. Celle-ci est de 0,5 dans 50 % des cas, de 1 dans 36 % des cas, et de 1,5 dans 6 % des cas.

Ces résultats apparaissent relativement conformes à ceux cités dans différentes études, en particulier celles de SHIELDS *et al.* (1965), MELVILLE et ATKINSON (1985), et ESCADAFAL *et al.* (1988).

3.2 Reproductivité pour un observateur

En ce qui concerne les trois répétitions réalisées par un même observateur (Tableau III), celui-ci retrouve strictement la même valeur dans 52 % des cas, et ne détermine trois valeurs différentes que dans 6 % des cas. De même qu'au § 3.1, on construit un indice de concordance en sommant les produits des deux valeurs de chaque colonne. Ainsi, globalement, les répétitions concordent pour 82 % des observations. L'étendue entre les valeurs extrêmes est également plus réduite que pour les 6 observateurs, puisqu'elle est nulle dans 52 % des cas, égale à 0,5 dans 40 % des cas, et de 1 dans 8 % des cas, soit pour 4 échantillons seulement. Différentes notations du même observateur apparaissent donc plus fidèles que la succession de notations d'observateurs différents.

Tableau III : Fréquence d'affectation des échantillons dans la même classe dominante de clarté. 3 répétitions d'un même observateur.

Frequency of estimations, for the observed dominant Munsell value. 3 repetitions for 1 observer.

fréquence d'affectation des échantillons dans la même classe dominante de clarté (3 répétitions, 1 observateur)	3/3	2/3	3 affectations différentes
pourcentage d'échantillons correspondant à cette fréquence	52 %	42 %	6 %

4. Étalonnage et intervalle de confiance d'un test utilisant la clarté

Compte tenu de la fidélité de notation que nous avons observée entre les différentes déterminations, ainsi que de la stabilité des différentes relations clarté/taux de carbone, nous pouvons considérer à présent l'ensemble des 6 x 50 observations, et réaliser par valeur de clarté le calcul de la moyenne et de l'écart-type des valeurs de carbone, afin d'obtenir un test général, assorti d'une évaluation d'un intervalle de confiance. Nous avons également calculé la médiane et les quartiles des taux de carbone, pour chaque classe de clarté.

La figure 4 présente la régression globale du taux de carbone en fonction de la clarté, plus ou moins l'écart-type, ce qui correspond à un intervalle de confiance pour 64 % de la population. Cette valeur de l'ordre de 2/3 est en effet classiquement retenue comme une valeur fréquente de pureté des unités cartographiques (RAGG et HENDERSON, 1980 ; EDMONDS et LENTNER, 1986 ; THOMAS *et al.*, 1989 ; WALTER et

AUROSSEAU, 1991 ; DALAL-CLAYTON et ROBINSON, 1992). Sur le même graphique, nous avons porté la valeur moyenne de taux de carbone observée pour chaque classe de clarté.

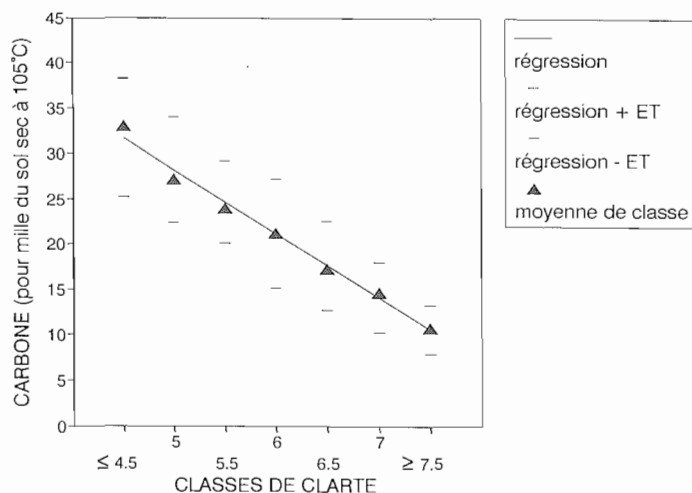


Figure 4 : Relation globale clarté des échantillons séchés à l'air/taux de carbone. Régression et écart-type, et valeurs moyennes de carbone des classes de clarté.

Global relation between Munsell value of air-dried samples and carbon content. Regression, means and standard deviations of carbon content for each value class.

La régression globale s'écrit :

$$\text{Carbone} = -7.(\text{Clarté} - 7,5) + 10,6 \pm c$$

Le coefficient c représente l'intervalle de confiance et varie en fonction de la classe de clarté retenue, de 2,65 (clarté supérieure ou égale à 7,5), à 6,5 (clarté inférieure ou égale à 4,5).

Compte tenu du faible nombre de déterminations de clarté égale à 4 ou supérieure à 7,5 (8 valeurs au total, sur 300 déterminées) nous avons regroupé les valeurs extrêmes comme indiqué sur la figure 4. On constate que les classes de taux de carbone se chevauchent largement pour des clartés distinctes de 0,5. Seuls des écarts de 2 points en clarté permettent de distinguer des populations dont l'intervalle de confiance ne se recoupe pas. Il apparaît donc impossible d'obtenir un nombre important de classes disjointes de taux de carbone.

Globalement, le test en laboratoire semble cependant permettre d'affecter correctement dans deux cas sur trois (64 %), un échantillon à une classe de taux de carbone d'étendue comprise entre 5,3 et 13 pour mille (valeurs extrêmes de deux fois l'écart-type des taux de carbone au sein des populations de clartés identiques).

Nous présentons également sur la figure 5 la même régression, et les valeurs correspondant à la médiane et aux quartiles des populations de taux de carbone par classe de clarté.

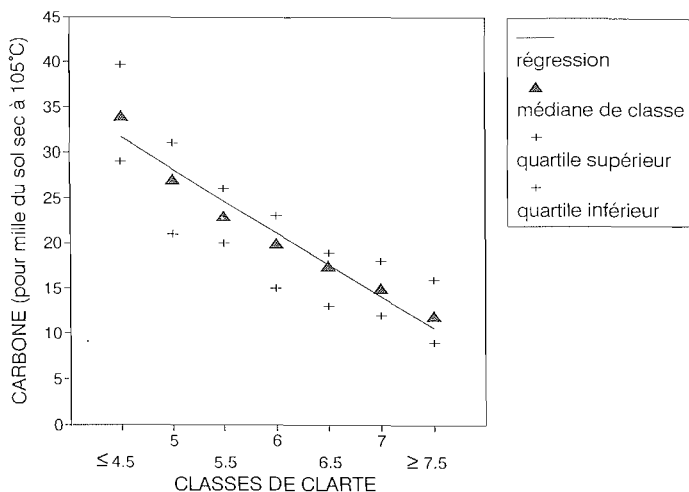


Figure 5 : Relation globale clarté des échantillons séchés à l'air/taux de carbone. Régression, valeurs médianes et quartiles des taux de carbone des classes de clarté.

Global relation between Munsell value of air-dried samples and carbon content. Regression, median and quartiles values of carbon content for each Munsell value class.

III - VALIDATION, DISCUSSION

1. Validation de terrain

Nous avons représenté sur la figure 6, les 62 valeurs de clarté notées en période estivale par différents pédologues au cours des années 1989 à 1992, sur les premiers horizons de profils ayant séché, ainsi que les déterminations des taux de carbone correspondants. Nous avons également figuré la position des deux courbes encadrant l'intervalle de confiance défini au § II-4.

14 échantillons sur 62 sortent de cet intervalle, soit une proportion d'échantillons correctement classés de plus de 81 %.

2. Discussion

Il convient de relativiser la portée des résultats obtenus.

D'une part les classes de taux définies ne sont pas disjointes, d'autre part l'amplitude des variations des taux au sein d'une même classe en limite la portée pratique. En effet, même en se limitant à un intervalle de confiance de l'ordre de 70 %, l'amplitude des classes représente une valeur moyenne de l'ordre de 10 pour mille en taux de carbone, ce qui est assez important. Si l'on désire affecter les échantillons à des classes disjointes, seulement 3 classes peuvent être définies par l'utilisation de la couleur.

Cette approche présente néanmoins un intérêt dans le milieu étudié, qui est caractérisé par des gammes de taux de carbone très étendues. Elle offre de plus au pédologue une possibilité de rendre moins subjective l'appréciation des taux de matière organique qu'il effectue couramment d'après des caractères visuels - et donc par la couleur - mais pour lesquels il ne dispose généralement pas d'un étalonnage précis lui permettant d'objectiviser son jugement.

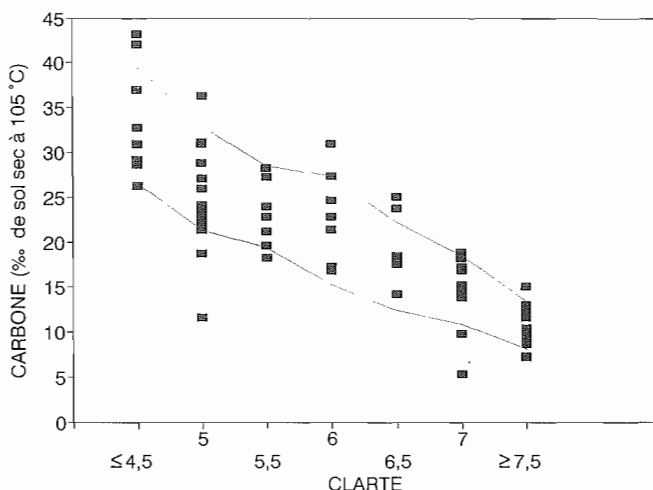


Figure 6 : Position des échantillons de validation de terrain par rapport aux intervalles définis par la relation établie en laboratoire.

Munsell value and carbon content of field validation samples.

Il convient toutefois de s'entourer de précautions préliminaires à l'utilisation systématique de ce test. En effet, nous avons montré que les relations obtenues étaient nettement améliorées en ne retenant que les valeurs de clarté notées par la majorité des observateurs. Ceci montre qu'une amélioration peut être obtenue en faisant réaliser les déterminations par plusieurs personnes, comme le recommandent MELVILLE et ATKINSON (1985). En effet, certains individus sont susceptibles de présenter des anomalies plus ou moins fortes de la vision des couleurs ainsi que des gammes de perception plus ou moins larges, comme le signalent KOWALSKI (1978), DELORME (1982), et plus récemment à propos des sols, MELVILLE et ATKINSON (1985), et ESCADAFAL *et al.* (1988).

Il convient enfin de limiter strictement la portée de ce test au milieu pédologique ayant servi à son établissement. D'une façon générale, de nombreux caractères permanents (texture, calcaire, fer, etc.) et conjoncturels (humidité, rugosité) sont en effet susceptibles d'affecter la couleur des sols, pouvant notamment conduire à des phénomènes de convergence (GIRARD, 1985 ; KING, 1983 et 1985). Dans notre étude, l'élaboration du test est facilitée par le fait qu'un seul paramètre (taux de carbone) varie de façon notable. D'autres travaux (ARROUAYS *et al.*, 1983), ont montré dans d'autres milieux des variations plus complexes, liées à des gradients conjoints d'humidité, de quantité et de qualité de la matière organique.

CONCLUSION

Ce travail montre que dans certaines conditions pédologiques précises, il est possible de relier la couleur des sols au carbone organique, et d'établir des tests permettant d'utiliser la couleur Munsell, traditionnellement utilisée par les pédologues, pour affecter un échantillon au sein d'une large gamme de classes non disjointes de taux de matières organique, ou de trois classes disjointes.

On obtient alors un outil simple, dont nous avons toutefois indiqué les limites, ainsi que les précautions d'utilisation. Il faut souligner à ce propos que la nécessité de recourir à plusieurs déterminations est en pratique difficilement conciliable avec les impératifs de terrain. Cependant, dans le cas présent, la donnée "couleur du sol" saisie sur le terrain, associée à l'étalonnage que nous avons réalisé, peut permettre d'objectiver le jugement du pédologue en ce qui concerne l'évaluation des teneurs en matière organique.

Il a été montré ailleurs (ESCADAFAL *et al.*, 1988) que la couleur des sols observée sur le terrain était très bien corrélée à son comportement spectral dans le visible. Ceci permet d'espérer des possibilités d'utilisation de la télédétection pour l'évaluation des taux de carbone de surface de cette vaste unité de pédopaysage, sous réserve que d'autres caractères (humidité, rugosité par exemple) soient relativement constants ou varient corrélativement aux taux de carbone. Un travail est actuellement mené dans ce sens, sur ces sols limoneux du piémont pyrénéen.

Remerciements : Nous tenons à remercier ici, Véronique GAILLARD, Jean-Luc KICIN, Christophe ORAZIO et Jean-Pierre LAGOUARDE, pour leur aimable participation à la détermination des couleurs en laboratoire, ainsi que messieurs M.C. GIRARD et D. RIGHI, pour leurs critiques constructives du manuscrit.

Reçu pour publication : Mars 1993

Accepté pour publication : Avril 1993

BIBLIOGRAPHIE

- ANDRONIKOV V. L., 1958 - The spectral reflectance of some soil types of the forest steppe. *Izvestija Akad. S.S.S.R.*, Ser. Geogr., **3**, 93-97.
- ARROUAYS D., 1991 - Dynamique spatiale de défrichement, utilisation des sols et statut organique. Un modèle géographique d'évolution au sein d'un paysage pédologique. *In : Gestion de l'espace rural et système d'information géographique*. Florac. Ed. INRA. 99-108.

- ARROUAYS D., 1992 - Veracrisols. In : *Référentiel Pédologique*, BAIZE et GIRARD Ed, INRA, Paris, 171-174.
- ARROUAYS D., GUYON D., RIOM J., 1983 - Différenciation par l'humidité et la matière organique de deux sols sableux à partir de données radiométriques et photographiques. In : *Signatures spectrales d'objets en télédétection*. Bordeaux, Sept. 1983. 81-89.
- ARROUAYS D., BAIZE D., HARDY M., 1992 - Les sols de touyas issus d'alluvions anciennes des gaves pyrénéens. Intégration au référentiel pédologique. *Sci. sol*, **30**, (4), 227-247.
- BAIZE D., GIRARD M.C., 1992 - *Référentiel Pédologique. Principaux sols d'Europe*. INRA Paris, 222 p.
- BERTRAND R., FALIPOU P., LEGROS J.P., 1979 - *Notice pour l'entrée des descriptions et analyses de sols en banque de données*. Document IRAT-INRA, Montpellier. SES n° 487. 136 p.
- BERTRAND R., BONNERIC P., FALIPOU P., LEGROS J.P., NAVARRO R., 1984 - *STIPA : Système de transfert de l'information pédologique et agronomique*. Notice. 2 volumes. A.C.C.T., Paris, 83 et 136 p.
- CALLOT G., JUSTE C., 1971 - Caractérisation des sols humifères acides développés sur les alluvions anciennes des gaves pyrénéens. *Sci. Sol*, (2), 5-26.
- COURAULT D., 1986 - *Modélisation du comportement spectral de la surface du sol. Etude intraparcellaire*. D.E.A. de Science des sols, INA-PG, Paris, 102 p.
- COURAULT D., 1989 - *Étude de la dégradation des états de surface du sol par télédétection. Analyses spectrales, spatiales, et diachroniques*. Thèse de Doct. INA PG. Paris, 239 p.
- DALAL-CLAYTON D.B., ROBINSON D.A., 1992 - An assessment of the success of a geomorphologically based reconnaissance soil survey in eastern Zambia. *Geoderma*, **34**, 213-230.
- DELORME A., 1982 - *Psychologie de la perception*. Interéditions, Paris, 421 p.
- EDMONDS W.J., LENTNER M., 1986 - Statistical evaluation of the taxonomic composition of three mapping units in Virginia. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **49**, (2), 394-401.
- ESCADAFAL R., POUGET M., 1986 - Luminance spectrale et caractères de la surface des sols en région aride méditerranéenne (Sud Tunisien). *I.T.C. Journal*, n° 19, 23 p.
- ESCADAFAL R., GIRARD M.C., COURAULT D., 1988 - La couleur des sols : appréciation, mesure et relations avec les propriétés spectrales. *Agronomie*, **8** (2), 147-154.
- FLAIG W., BEUTEZ SPACHER H., RIETZ E., 1975 - Chemical composition and physical properties of humic substances in soil component. Vol. 1. Organic components. Ed. GIESEKING JE, Springer Verlag. NY, 213 p.
- GERBERMANN A.H., NEHER D.D., 1979 - Reflectance of varying mixtures of clay soil and sand. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* **45** (8) 1145-1151.
- GIRARD M.C., 1983 - *Recherche d'une modélisation en vue d'une représentation spatiale de la couverture pédologique. Application à une région des plateaux jurassiques de Bourgogne*. Thèse (Docteur es Sciences). Sols (12), 430 p.
- GIRARD M.C., 1985 - Télédétection de la surface du sol. In : *Applications de la télédétection à l'agriculture*. Colloques INRA, **32**, 177-193.

- GIRARD M.C. BIALOUSZ S., 1988 - Caractéristiques spectrales des sols en fonction de leurs propriétés. In : *Pédologie et télédétection*, 3^{ème} colloque AISS Varsovie. Prace Komisji Naukowych polskiego towarzystwa gleboznawczego (105), 138-147.
- GIRARD M.C., GIRARD C.M., 1977 - Télédétection de la surface du sol. In : *Soil survey remote sensing*. Colloque Int. AISS, Rome, 55-64.
- HUETE A., POST D.F., JACKSON R.D., 1984 - Soil spectral effect on 4 space vegetation discrimination. *Remote sensing Environ.*, **15**, 155-165.
- JAMAGNE M., 1967 - Bases et techniques d'une cartographie des sols. *Ann. Agron.*, **18**, Hors série, 142 p.
- KING C., 1983 - Les qualités spectrales des sols nus : analyse de spectres radiométriques acquis sur le terrain dans le Bassin Parisien. In : *Signatures spectrales d'objets en télédétection*, 2^{ème} colloque Int. Bordeaux, Ed. INRA, 253-254.
- KING C., 1985 - *Étude des sols et des formations superficielles par télédétection*. Thèse INA PG, Paris, 200 p.
- KOWALISKI P., 1978 - *Vision et mesure de la couleur*. Masson, Paris, 197 p.
- KRISHNAN P., ALEXANDER J.D., BUTTLER B.J., HUMMEL J.W., 1980 - Reflectance technique for predicting soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* **44** (6) 1282-1285.
- LELEUX A., AUROUSSEAU P., ROUDAUT A., 1988 - Synthèse cartographique régionale à partir de données d'analyses de terre. *Sci. Sol*, **26** (1), 29-40.
- MELVILLE M.D., ATKINSON G., 1985 - Soil colour : its measurement and its designation in models of uniform colour space. *J. Soil Sci.*, **36**, 495-512.
- MUNSELL COLOR COMPANY, 1950 - *Munsell soil color charts*. Baltimore, 7 pl.
- RAGG J.M., HENDERSON R., 1980 - A reappraisal of soil mapping in an area of southern Scotland. Part I : The reliability of four soil mapping units and morphological variability of their dominant taxa. *J. Soil Sci.*, **31**, (3), 559-572.
- SEGALEN P., 1977 - *Les classifications des sols*. Revue critique. Orstom, Bondy, 175 p.
- SHIELDS J.A., St ARNAUD R.J., PAUL E.A., CLAYTON J.S., 1965 - Measurement of soil color. *Can. J. of Soil Sci.*, **46**, 83-90.
- SCHREIER H., 1977 - Prévion des états chimiques des sols au moyen de mesures spectrales effectuées en laboratoire, sur le terrain et par voie aérienne. In : *4^{ème} Symposium Canadien sur la Télédétection*. Québec. 106-112.
- SOIL SURVEY STAFF, 1975 - *Soil taxonomy - a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. USDA Handbook Number 436. United States Department of Agriculture, Washington, D.C.
- STONER E.R., BAUMGARNER M.F., BIEHL L.L., ROBINSON B.F., 1980 - *Atlas of soil reflectance properties*. L.A.R.S., Purdue University, 75 p.
- THOMAS P.J., BAKER J.C., SIMPSON T.W., 1989 - Variability of the Cecil Map unit in Appomattox County, Virginia. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **53**, 1470-1474.
- WALTER C., AUROUSSEAU P., 1991 - Un élément de la précision des cartes pédologiques : la variabilité des propriétés du sol au sein des unités cartographiques. In : *Gestion de l'espace rural et système d'information géographique*. Florac. Ed. INRA. 277-293.