

Analyse de la cohérence d'une simulation géographique de l'évolution des risques de dégradation physique des sols et d'une classification empirique de données de télédétection

D. ARROUAYS¹, C. KING², J.L. KICIN³, J. DAROUSSIN¹,
I. VION⁴, Y. LE BISSONNAIS¹

1. INRA, Unité de Science du Sol, SESCOF, 45160 Ardon, France.

2. BRGM, route de Concyr, 45000 Orléans, France.

3. INRA, Station de Bioclimatologie, BP 81, 33883, Villenave d'Ornon, France.

4. Terra Nova, 11 place de la Nation, 75000 Paris, France.

Résumé

Les taux de matière organique des sols cultivés sont une des composantes essentielles de leur fertilité physique et de leur sensibilité à la dégradation. Sur une région du sud-ouest de la France, ces taux ont une influence directe sur la sensibilité des sols à la battance, au ruissellement et à l'érosion ; ils peuvent ainsi être utilisés pour une cartographie de l'évolution des risques. La zone test couvre une surface de 8 000 ha, localisés sur des terrasses anciennes des gaves pyrénéens, dont la végétation forestière initiale a été progressivement défrichée pour la monoculture intensive du maïs-grain.

(i) Dans un travail précédent ; les teneurs initiales en matière organique des sols forestiers ont été déterminées. Puis, la combinaison d'un modèle de cinétique de décroissance de ces taux et d'une reconstruction de l'historique des défrichements nous a permis de produire des simulations cartographiques de l'évolution des stocks organiques, et des risques de dégradation qui y sont liés.

(ii) Dans cette étude, on étudie les réponses spectrales des sols nus, extraites d'une image Landsat Thematic Mapper. Une analyse discriminante de ces réponses permet de construire une classification empirique de la sensibilité à la dégradation physique des sols. Cette classification est validée par confrontation avec un jeu de données indépendant.

Les deux modèles géographiques (i) et (ii) sont ensuite combinés au sein d'un SIG ; les correspondances et les incohérences entre les deux prédictions sont cartographiées.

Les résultats montrent une bonne coïncidence entre les deux approches (environ 70 %). Une grille systématique de validation est appliquée pour expliquer les causes possibles de variation entre les deux prédictions. Les résultats de ce travail suggèrent que la télédétection peut constituer un outil intéressant pour cartographier les teneurs en matière organique des sols ; cette technique permet par ailleurs de valider la simulation spatio-temporelle de l'évolution des risques de dégradation dans ce contexte.

Nous réalisons ensuite une extrapolation à l'ensemble des terrasses du piémont pyrénéen afin de localiser les secteurs où un changement dans l'occupation des sols ou dans la gestion organique des parcelles doit intervenir afin de prévenir la chute des taux de matière organique et l'augmentation des risques d'érosion qui y est liée.

Abstract

Organic matter (OM) is an important component of soils because of its influence on susceptibility to physical degradation (slaking, crusting, run-off and erosion). On site in southwest France, OM has been shown to have a direct influence on soil degradation risk. OM exhibits a threshold value for degradation risk and may therefore be used for mapping degradation risk evolution. The test area covers 8.000 ha located on an ancient terrace of the Pyrenean streams, whose forests had been progressively cleared for continuous intensive corn cropping.

In a previous work, OM contents in forest soils were determined, then, combining a temporal model of OM decay under corn crops with an historical reconstruction of changes in land use enables us to produce computerized maps predicting organic pools classes from 1948 to 1992, and related maps of degradation risk.

In this work, spectral response from bare soils were extracted on a TM (200/30) scene. Using discriminant analysis of spectral response on a first set of plots whose OM contents were known, enabled us to build an empirical classification of bare soils degradation risk. This classification was validated by comparing predicted results with observed ones, on an independent systematical sampling grid.

Both geographical models were combined into a GIS tool, and correspondences and contradictions between the two predictions were studied.

Results indicated a good agreement (nearly 70%) between the two methods. A systematical network of sampling was applied to validate both methods and to explain the possible causes of variance between the two maps. Results indicated that remote sensing data can provide a useful tool to map soil degradation risk evolution, and can be used to validate independent spatio-temporal models of changes in soil degradation susceptibility in this context.

An extrapolation to a larger area was then realized, leading to an assessment of soil degradation risk evolution et the regional level. This study enabled us to localize areas where changes in land use or in organic management must be realized in order to prevent soils from drastic decays in OM level and from related increases in erosion risk.

1. Introduction

Les taux de matière organique des sols cultivés sont une des composantes essentielles de leur fertilité physique et de leur sensibilité à la dégradation (tassement, battance, « fatigue » des sols, etc.). Or il existe actuellement peu de techniques permettant leur analyse spatiale et leur cartographie. Les tests qualitatifs de terrain sont très peu fiables et précis, et l'extrapolation des résultats d'analyses ponctuelles 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, se surimpose à cette variabilité « naturelle », l'évolution liée à l'histoire culturale.

En Chalosse (sud-ouest de la France), en contexte limoneux et sous monoculture de maïs, les problèmes de dégradation physique des sols sont sous la dépendance principale de leur statut organique (ARROUAYS *et al.*, 1994). Les taux de matière organique diminuent rapidement avec l'ancienneté de la mise en monoculture (ARROUAYS et PELISSIER, 1994a). Dans ce contexte, il est intéressant d'une part d'évaluer les possibilités de la télédétection pour détecter ces taux, et d'autre part de développer des modèles déterministes au sein de systèmes d'informations géographiques, afin de permettre la cartographie de la variabilité spatiale et temporelle de cette caractéristique.

L'identification des constituants du sol et le suivi des changements de leurs caractéristiques de surface (humidité-rugosité) sont des domaines d'investigation abordés depuis longtemps dans le visible et le proche infrarouge. Pour ce qui est de la matière organique, il a été possible de mettre en évidence dans des conditions pédologiques précises des relations quantitatives entre la couleur et le taux de matière organique (par exemple, SHIELDS *et al.*, 1968, ARROUAYS et VION, 1993), ainsi qu'entre la réflectance et le taux de matière organique (GERBERMANN et NEHER 1979, KRISHNAN *et al.* 1980, ARROUAYS *et al.*, 1984, HENDERSON *et al.*, 1989, ARROUAYS et VION, 1993). Des études systématiques portant sur la sélection de bandes spectrales pour la classification des taux de matière organique se développent par ailleurs (par exemple, HENDERSON *et al.*, 1989).

En ce qui concerne la construction de modèles déterministes permettant la prédiction spatiale et temporelle de l'évolution des teneurs en matière organique des sols, les études sont moins avancées ; de très nombreuses études ponctuelles détaillées ont permis d'améliorer nos connaissances sur le *turnover* du carbone dans les sols et d'ajuster des cinétiques de dégradation (par exemple, CERRI *et al.*, 1985 ; MARIOTTI et BALESSENT, 1990 ; BALESSENT *et al.*, 1990 ; MARTIN *et al.*, 1990). cependant le passage à une approche

géographique sur de grands espaces n'a été que rarement effectué (citons cependant pour mémoire : PARTON et al., 1987 ; HUNTINGTON et al., 1988 ; GRIGAL et OHMANN, 1992 ; STONE et al., 1993). La raison principale est l'absence des données d'entrées nécessaires à la prise en compte de l'ensemble des facteurs contrôlant les teneurs en matière organique (climat, paramètres pédologiques, occupation du sol et histoire parcellaire...).

Les objectifs de cette étude sont :

- d'évaluer l'intérêt potentiel de l'utilisation d'images satellitaires pour cartographier ces taux dans un milieu caractérisé par une forte variabilité.
- d'utiliser cette cartographie pour valider (ou invalider) une tentative de simulation géographique de l'évolution de ces teneurs.

2. Matériel et méthode

2.1. Site

La zone test couvre une surface d'environ 8 000 hectares localisés sur la feuille I.G.N. au 1/25 000 d'Aire-sur-Adour. Elle se situe sur une terrasse ancienne limoneuse des gaves pyrénéens de morphologie très plane (Fig. 1). Le site choisi présente des sols pour lesquels le statut organique a une incidence directe sur la sensibilité du sol à la dégradation physique et peut ainsi servir de critère de cartographie de risques : sous végétation naturelle les sols sont des sols limoneux organiques profonds (ARROUAYS et al., 1992 ; ARROUAYS et PELISSIER, 1994b). Ces sols ont subi un défrichement intensif pour la monoculture de maïs grain depuis le début des années 60.

L'évolution de leur statut organique se caractérise par une chute brutale des taux lors des premières années de culture ; cette cinétique de dégradation a pu être ajustée selon des modèles de décroissance bi-exponentielle (ARROUAYS et PELISSIER, 1994a, ARROUAYS et al., sous presse). Elle peut conduire à une instabilité structurale traduite par des phénomènes de battance, de ruissellement et d'érosion ; Une analyse du comportement de ces sols sous pluie simulée en laboratoire a permis de mettre en évidence l'existence d'un seuil de teneur en C organique pour le comportement de ces sols (ARROUAYS et al., 1994).

2.2. Données satellitaires

2.2.1. Données

Les données de télédétection sont constituées par une image Landsat TM (200/30) du 21/04/84. A cette période, l'ensemble des parcelles destinées à la monoculture de maïs grain présentent des sols nus, et ont été pour la plupart labourées et préparées pour le semis. Cette homogénéité des interventions culturales est un critère important pour les hypothèses de comparaison.

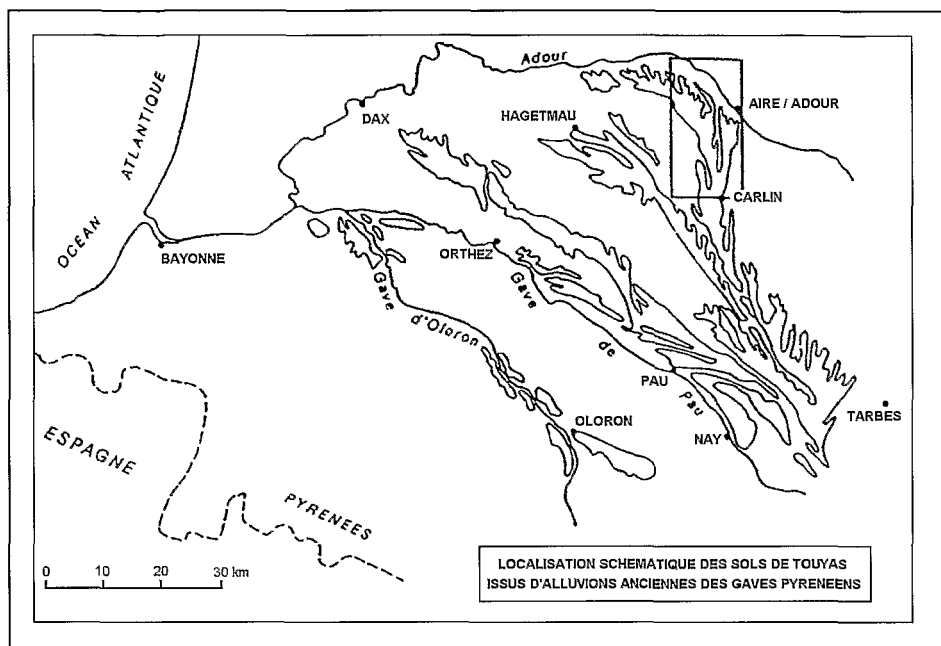


Figure 1. Situation géographique.

Les données sol concernent une détermination systématique des taux de matière organique (estimés par le carbone (Anne) multiplié par 1,74) et de la granulométrie (Robinson) de l'horizon de surface de parcelles cultivées réparties sur la base d'un quadrillage kilométrique systématique correspondant aux intersections des coordonnées Lambert III (Fig. 2). Pour chaque parcelle, 8 échantillons ont été prélevés dans un rayon de 100 mètres puis mélangés et aliquotés sur place. Au total, environ 90 parcelles ont été prélevées, et les résultats informatisés à l'issue d'une campagne de terrain effectuée en 1992.

La délimitation du paysage pédologique concerné par l'étude (terrasse ancienne des gaves pyrénéens) a été informatisée sous ARC/INFO.

2.2.2. Méthode de traitement

Elle se décompose en plusieurs étapes.

La constitution d'une base de données géoréférencées. La scène TM est corrigée géométriquement dans le référentiel Lambert III. Une classification de l'occupation du sol est réalisée selon l'algorithme du maximum de vraisemblance. Cette classification est utilisée pour masquer toutes les valeurs ne correspondant pas à des sols nus, seules valeurs radiométriques conservées pour l'analyse statistique. En parallèle, l'ensemble des données de terrain décrivant les limites de terrasse, la position des points de prélèvements et les résultats d'analyses de sol sont transférées, via ARC/INFO, dans la base de données. L'extraction des

réponses radiométriques des surfaces de sol prélevées correspond alors aux seuls pixels de sols nus sous l'emprise définie pour l'échantillonnage de terrain : un cercle de 100 mètres de rayon.

L'analyse statistique des relations entre les taux de matière organique et les luminances de sols nus. On effectue cette analyse sur deux lots :

- sur la moitié des points de la grille, on effectue une analyse discriminante des réponses spectrales sur la base du seuil de teneur en C (12.5 g.kg^{-1}),
- la validation des résultats obtenus est effectuée sur l'autre moitié des échantillons (ARROUAYS et al., 1995a).

Une classification des sols nus est ensuite générée sur l'ensemble du site en appliquant la règle identifiée sur les données de référence.

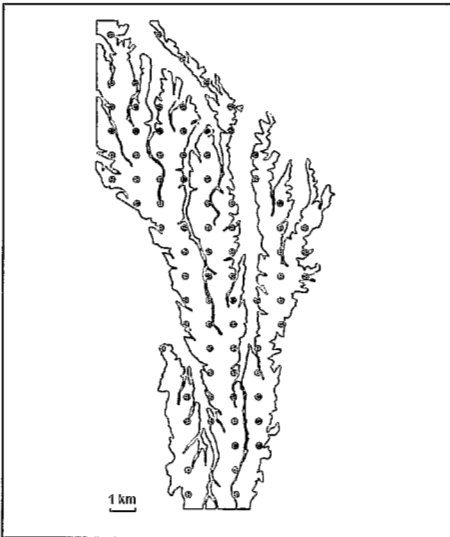


Figure 2. Réseau systématique des prélèvements.

2.3. Données d'entrée du modèle de simulation

La cinétique de disparition des matières organiques sous monoculture de maïs grain est modélisée selon le système d'équations proposé par ARROUAYS et al. (1995b). Ce système divise le stock organique en fonction de son origine (maïs ou forêt) et distingue au sein de chaque origine deux compartiments de cinétiques exponentielles de dégradation différentes.

L'historique des défrichements est reconstitué à partir de l'analyse de successions de photographies aériennes, de 1948 à nos jours. Ceci permet d'affecter à chaque parcelle une classe de date de mise en monoculture.

Les teneurs initiales en C des sols sous forêt sont appréhendées de deux façons :

- une première approximation considère une répartition homogène des teneurs initiales sur l'ensemble de la terrasse ; les teneurs initiales sont alors égales en tout point à la valeur moyenne observée sous forêt ;

- une deuxième approximation prend en compte l'existence d'un gradient amont/aval dans les teneurs (ARROUAYS et *al.*, 1995c), ainsi que l'influence de la pente locale ; en tout point de l'espace, une distribution théorique log-normale de ce paramètre est prédite en fonction de la position par rapport au gradient amont/aval. On recherche ensuite les 1 000 pixels les plus proches de ce point et l'on calcule son numéro d'ordre N dans la distribution statistique des pentes environnantes. La valeur $[1 - (N/1000)]$ est alors considérée comme la fonction de densité de probabilité des teneurs en C, ce qui permet de calculer une teneur en chaque point.

2.4. Comparaison de la classification de l'image TM et de la simulation

Les prédictions fournies par les deux approches sont combinées au sein du Système d'Informations Géographiques. Des cartes de cohérences sont construites et interprétées, le pourcentage de coïncidence est calculé et comparé au pourcentage théorique statistique.

3. Résultats

3.1. Analyse discriminante de l'image TM

3.1.1. Analyse

Les travaux en cours de LE BISSONNAIS montrent que pour ces sols il existe un seuil de teneur en C en deçà duquel la sensibilité à la battance augmente linéairement avec la diminution des teneurs. Sur le premier lot de points, nous avons classé les individus en fonction de ce seuil (groupe 1 = $C < 12,5 \text{ g.kg}^{-1}$; groupe 2 = $C \geq 12,5 \text{ g.kg}^{-1}$). Nous avons ensuite recherché la fonction discriminante des données TM permettant la meilleure discrimination entre les deux groupes. Le tableau 1 présente les résultats de cette analyse (d'après ARROUAYS et *al.*, 1995a). La figure 3 confronte la classification aux classes de teneurs réelles. Seules huit observations sur 43 sont mal classées, ce qui correspond à un pourcentage d'erreur de 18,6 %. La qualité de la discrimination suggère qu'un modèle empirique de prédiction spatiale des risques de dégradation peut être construit en utilisant cette fonction.

Tableau 1. Résultats de l'analyse discriminante sur les deux lots.

Corrélation canonique	Wilks lambda	χ^2	DF	Signif.	Centroïdes	
					1	2
0,692	0,521	24,77	6	0,0004	0,91	0,96

Erreurs de classification : sur le lot 1 = 18,6 %, sur le lot 2 = 20,5 %.

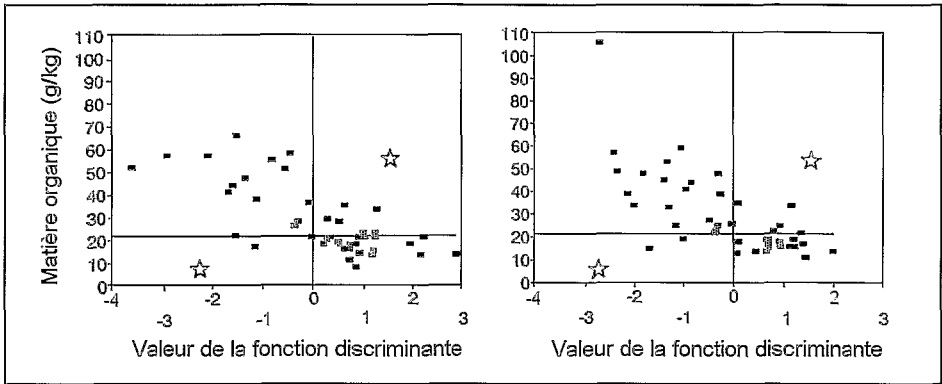


Figure 3 et 4. Classification par analyse discriminante et classes de teneur en C observées sur le lot 1 (à gauche). Validation sur le lot 2 (à droite). La barre horizontale figure le seuil de teneur en matière organique ; les quartiers figurés par une étoile représentent les erreurs de classification.

3.1.2. Validation

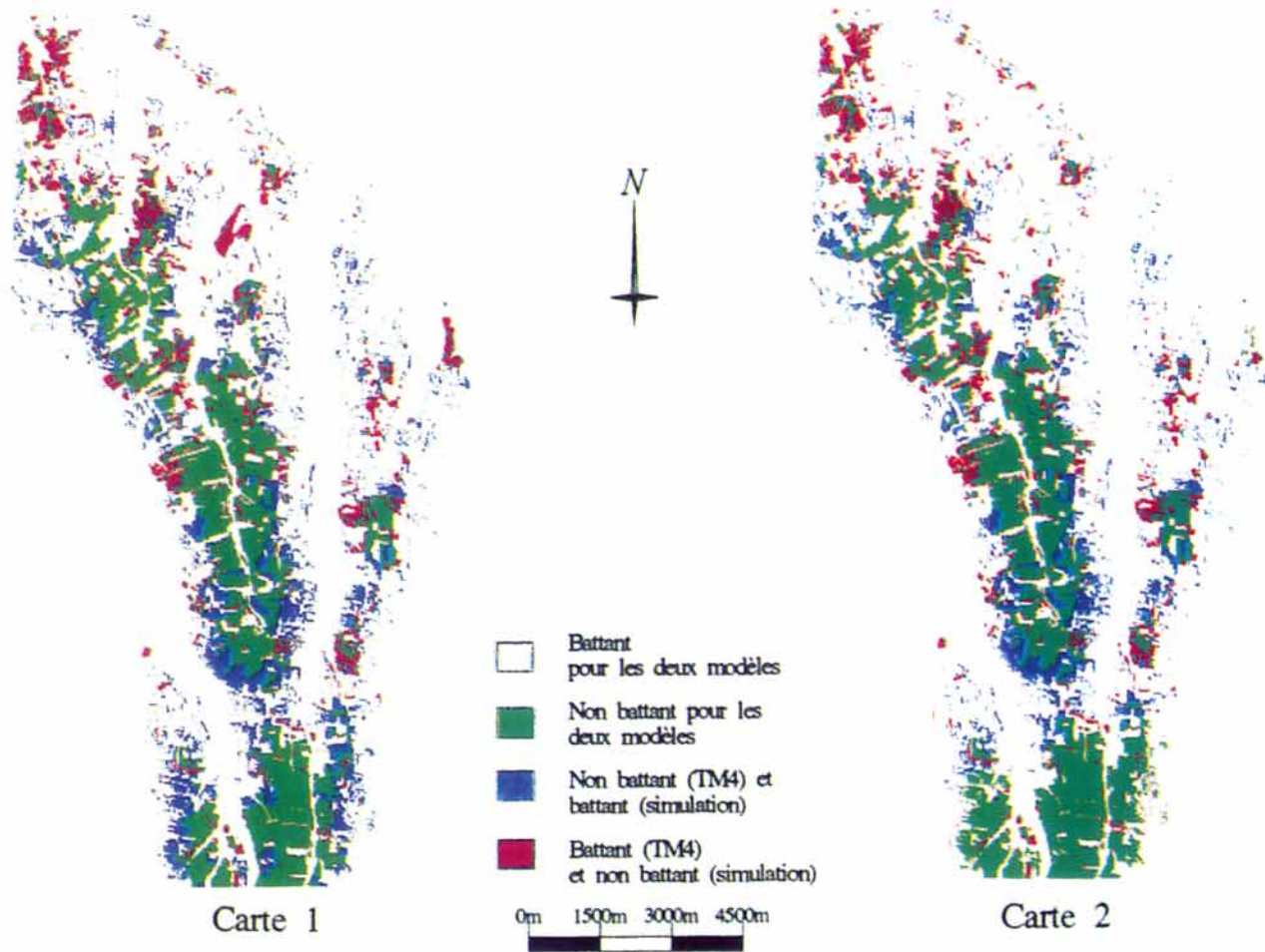
L'objectif de telles analyses est généralement de fournir une méthode pour prédire le groupe auquel un nouvel individu est susceptible d'appartenir. Afin de valider notre approche pour une cartographie opérationnelle, nous avons appliqué cette fonction discriminante sur les données TM du deuxième lot. La figure 4 montre les résultats de la classification prédite en fonction des teneurs réelles en C. On observe un pourcentage d'erreur de 20,5 %, tout à fait comparable au pourcentage obtenu avec le lot 1.

3.2. Simulation

La simulation de l'évolution des taux de carbone fondée sur un taux initial fixe permet d'expliquer 69 % de la variance des taux réels (ARROUAYS et al., 1994). L'application du seuil de comportement permet de construire une carte d'estimation des risques de battance actuels sur la terrasse, localisant ainsi les zones où des mesures préventives sont à envisager. L'intérêt de cette approche réside également dans la possibilité de réaliser des simulations prospectives de l'évolution de ces risques.

L'intégration du modèle de répartition des taux initiaux en fonction des gradients régionaux et de la pente améliore très légèrement la qualité des prédictions des teneurs actuelles, dont la variance est expliquée pour plus de 74 %. Ainsi, cette prise en compte de l'organisation des teneurs initiales semble améliorer légèrement les résultats de la validation statistique.

Planche II. Analyse de la classification des sols battants et non-battants suivant le modèle utilisé (p. 437).



3.3. Cohérence géographique des deux approches

3.3.1. Simulation fondée sur un taux initial fixe

Nous avons superposé les cartographies générées (sur la base du seuil de 12,5 % C en $g.kg^{-1}$) par notre simulation spatiale et par l'analyse discriminante des données TM. Nous avons ainsi obtenu une carte de cohérence des deux méthodes (carte 1, planche 11). On observe une assez bonne coïncidence entre les deux prédictions, puisque plus de 68 % de la surface de la carte correspondent à des secteurs prédits de façon identique. Connaissant le pourcentage de surface affecté à chaque classe pour chacune des deux méthodes, un simple calcul probabiliste nous indique que ce pourcentage de coïncidence devrait être de l'ordre de 50 % si les deux types de classements n'étaient pas corrélés. Nous pouvons par conséquent considérer que l'approche par télédétection est cohérente avec la simulation spatiale proposée.

Notons que la répartition des erreurs ne paraît pas s'effectuer totalement au hasard ; au contraire, il semble exister un gradient sud-nord. Par rapport au modèle issu de la télédétection, notre simulation spatiale présente une tendance à la surestimation des teneurs au Nord, et à la sous-estimation au Sud. Pour vérifier de façon quantitative cette impression visuelle, nous avons procédé au traitement géographique suivant : la terrasse a été découpée en bandes horizontales parallèles larges d'un kilomètre ; sur chacune de ces bandes, nous avons calculé le pourcentage des deux types d'erreur par rapport à leur total. La figure 5 illustre l'évolution de ce pourcentage en fonction du gradient sud-nord.

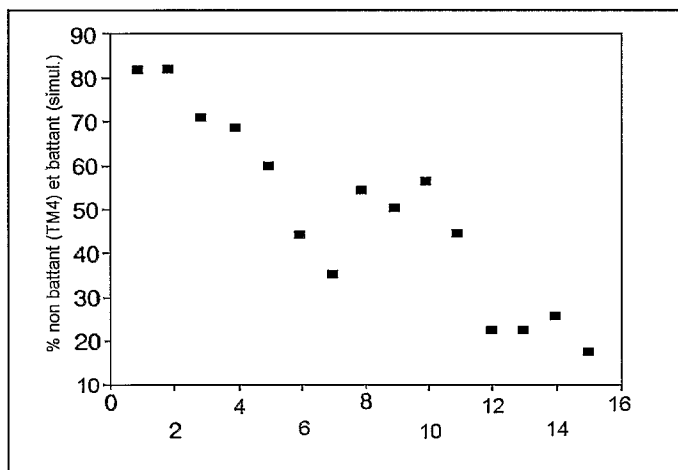


Figure 5. Evolution du pourcentage relatif des types d'incohérences [(non battant TM4 et battant simulation) / (total des zones incohérentes)] entre les deux approches en fonction du gradient nord-sud.

Nous avons également recherché quelle était la répartition des erreurs en fonction des classes de date de défrichement. Les parcelles les plus anciennement défrichées (avant 1948) sont le plus souvent prédites comme battantes par les deux méthodes.

Toutefois, la majorité des incohérences concernant ces parcelles est localisée sur des secteurs plats, au sud de la terrasse ; il s'agit de parcelles qui sont prédites comme battantes par notre simulation, mais non par l'analyse discriminante des données TM. Nous pouvons supposer que leur taux initial sous forêt était plus élevé que celui retenu pour cette validation.

A contrario, les parcelles défrichées après 1948 présentent très peu d'incohérences de ce type. Ces dernières sont de nature inverse : certaines parcelles sont prédites comme non battantes par notre simulation, mais comme battantes par l'analyse discriminante. La majorité des surfaces concernées par ce type d'incohérence se trouve au nord de la terrasse. Les zones qui présentent ce comportement correspondent essentiellement à des secteurs où, d'une part, la morphologie de la terrasse est très disséquée, traduisant des phénomènes d'érosion intenses, et où, d'autre part, les teneurs initiales en C devraient être les plus faibles, compte tenu du gradient régional et de l'importance des pentes. Ce gradient n'est pas pris en compte par la simulation fondée sur des taux initiaux identiques pour l'ensemble de la terrasse.

La mise en évidence de la nature et de la répartition des incohérences suggère donc qu'une prise en compte de l'organisation spatiale des stocks initiaux sous forêt est susceptible d'améliorer la simulation.

3.3.2. Simulation prenant en compte la répartition des taux initiaux

La même approche a été conduite en intégrant le modèle de répartition des teneurs initiales. Le pourcentage de coïncidence passe à 73 %, ce qui représente un léger gain par rapport à l'approche précédente. L'examen de la carte 2 (Planche 11) et l'étude de la répartition des types d'incohérence montrent que ce sont essentiellement les zones du sud de la terrasse qui voient leur pourcentage de coïncidence amélioré. En prenant en compte le gradient régional et l'effet de la pente, les zones planes du sud de la terrasse présentent des teneurs initiales plus fortes, et ne sont donc pas encore à des niveaux de teneur en C inférieurs au seuil que nous avons défini. A l'opposé, on note très peu d'amélioration en ce qui concerne le nord de la terrasse, si ce n'est pour quelques parcelles, pour lesquelles l'intégration de l'effet du gradient régional et de la pente conduit à des teneurs prédites qui passent en dessous du seuil critique. Au nord de la terrasse, les zones d'incohérence figurées sur les cartes 1 et 2 (Planche 11) paraissent ainsi quasi similaires. Bon nombre de ces zones correspondent à des parcelles défrichées assez anciennement. Plusieurs hypothèses peuvent être émises concernant le maintien de ces incohérences :

- les teneurs initiales ont pu être sous-évaluées ;
- le seuil que nous avons retenu correspond à un ordre de grandeur déterminé par des mesures de laboratoire ; celui-ci a pu également être sous-évalué ;
- d'autres phénomènes peuvent se surajouter à l'évolution temporelle par minéralisation, comme par exemple le déclenchement de phénomènes d'érosion lorsque les teneurs en C deviennent faibles et que la pente est suffisante ;
- une part des incohérences peut être liée à la superposition géométrique des cartes ou à des classifications différentes de l'occupation du sol par les deux méthodes.

4. Discussion

A la lumière des résultats obtenus, trois questions peuvent être discutées ou approfondies :

- le choix d'une analyse des réponses spectrales en luminance seulement (et non en réflectance),
- la portée de la méthode retenue pour proposer un modèle prédictif,
- l'importance des incohérences liées au croisement géométrique des informations.

4.1. Analyse des réponses en luminance

L'objectif visé par ce type d'étude est opérationnel ; il s'agit d'utiliser le pouvoir de discrimination de données satellitaires pour la détection du taux de matières organiques. Nous ne cherchons pas à modéliser la réponse spectrale de ces sols et nous n'envisageons pas de retour aux données de spectroscopie en laboratoire. C'est pourquoi nous avons travaillé en luminance.

Nous n'avons pas recouru à des corrections atmosphériques puisque, sur une seule date d'observation, c'est la variabilité spatiale des sols qui est étudiée : dans ce cas, les corrections atmosphériques ne modifieraient pas les résultats. Celles-ci pourraient présenter par contre un intérêt dans le cadre d'un suivi multitemporel. De telles corrections seraient par conséquent envisageables dans le cas d'une comparaison multitemporelle pour analyser la décroissance des taux de matières organiques.

4.2. Portée de la méthode

Les objectifs de l'analyse discriminante n'ont pas une vocation explicative ; il s'agit uniquement de pouvoir prédire le taux de matières organiques dans un contexte donné. Nous devons alors supposer que notre échantillonnage est représentatif de l'ensemble des liaisons entre les différents paramètres.

Ainsi, une connaissance cartographique préalable du milieu est indispensable afin de couvrir la gamme des situations pédologiques possibles ; toute tentative d'application des résultats à d'autres unités pédologiques serait entachée d'erreur.

Il existe également d'autres sources de variation que nous n'avons pas pu appréhender : humidité du sol, variabilité de l'état structural de surface. Cependant, dans le cas présent, il est fort probable que la teneur en C est corrélée positivement aux caractéristiques hydriques des sols (ARROUAYS et JAMAGNE, 1993). Il est également très probable que la variabilité de l'état structural de surface est corrélée aux teneurs en C, comme le laissent supposer les travaux de LE BISSONNAIS. En d'autres termes, nous sommes dans une situation pédologique particulière où les caractéristiques organiques, hydriques et structurales convergent en accentuant les discriminations. Ceci est probablement la raison pour laquelle nous observons une si bonne détection lorsque nous réalisons une analyse discriminante sur la base du seuil de comportement.

L'analyse de la cohérence spatiale des informations permet de relativiser les prédictions produites par l'une et l'autre des deux méthodes (simulation, et classification TM). Les surfaces dont les prédictions ne coïncident pas représentent ainsi les secteurs où une incertitude subsiste quand à la prévision du comportement des sols.

4.3. Incohérences liées au croisement géographique des informations

On peut se demander si une part des incohérences n'est pas simplement due au croisement géométrique des informations, en particulier en ce qui concerne l'occupation du sol. En effet, nous superposons une classification de l'occupation du sol, générée sur une image de télédétection en format « raster », avec une délimitation parcellaire et une classification de l'occupation du sol réalisée sur photographies aériennes en format « vecteur ».

Pour tenter d'appréhender cette source d'erreur, nous avons cartographié les zones d'incohérences présentant une différence dans la classification de l'occupation des sols (sols nus / autres), par les deux méthodes.

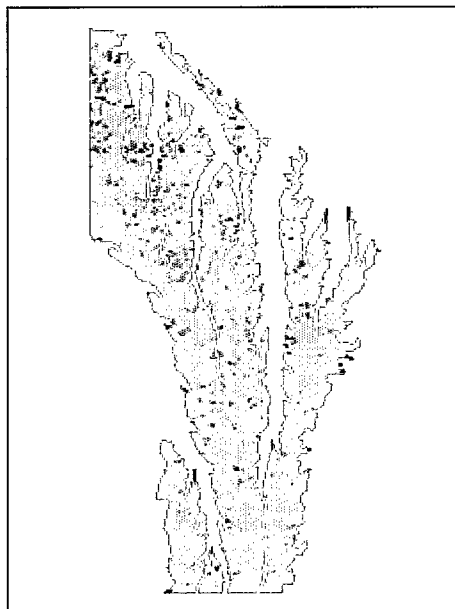


Figure 6. Carte des incohérences de classification dans l'occupation du sol.

La figure 6 présente le résultat de cette cartographie. On constate que 138 hectares — considérés comme non battants par la simulation et comme battants par la classification TM — relèvent de cette différence dans l'affectation de l'occupation du sol ; ceci représente environ 10 % des incohérences de ce type. Ces surfaces sont en moyenne de petite taille. Les quelques surfaces importantes correspondent à des parcelles dont la classification de l'occupation du sol par Thematic Mapper n'est pas exacte. On peut aussi remarquer

l'existence de quelques linéaments, qui correspondent à des routes, chemins et limites parcellaires. On peut enfin observer qu'il existe également un gradient pour la fréquence de ce type d'erreurs ; celles-ci sont plus nombreuses au Nord du secteur, où les parcelles sont en moyenne de plus petite taille, et où la densité des habitations et du réseau routier est plus importante.

Conclusion

Les objectifs de ce travail étaient :

- d'évaluer l'intérêt potentiel de l'utilisation d'images satellitaires pour cartographier ces taux dans un milieu caractérisé par une forte variabilité,
- d'utiliser cette cartographie pour valider (ou invalider) une tentative de simulation géographique de l'évolution de ces teneurs.

Le milieu étudié présente deux atouts majeurs pour tester le potentiel d'appréciation quantitative d'un constituant du sol par la télédétection :

- de morphologie très plane, il permet d'abstraire les effets directionnels,
- la variabilité majeure exprimée à la surface du sol dépend du taux de matières organiques.

Dans ces conditions, nous avons établi un modèle prédictif robuste, mais non explicatif. Le débouché concret et opérationnel de ce type d'étude est bien évidemment le passage à l'approche cartographique pour proposer une carte d'estimation du taux de matières organiques, ou, en appliquant un seuil de comportement, une carte des risques de battance. Nous l'avons construite par application directe de l'analyse discriminante sur l'ensemble des données satellitaires de sols nus.

Cette carte a été comparée à une approche cartographique beaucoup plus déterministe du même phénomène, fondée sur des données indépendantes mais plus difficilement accessibles : répartition des taux initiaux, historique des défrichements, modèle temporel de dégradation de la matière organique. On constate une grande similitude dans l'extension des zones à faible taux de matières organiques, qui présentent donc les plus forts risques de dégradation physique. **Nous avons ainsi pu vérifier la cohérence spatiale des estimations produites par notre modèle et par le traitement d'une image de télédétection.** L'analyse de la cohérence spatiale des informations permet également d'associer un niveau d'incertitude aux prédictions produites par l'une et l'autre des deux méthodes (simulation, et classification TM).

Ce résultat satisfaisant suggère que la télédétection peut constituer un outil cartographique de la matière organique des sols. Un voie de recherche future, pour en affiner les clés de spatialisation sur la région, serait la combinaison, au sein d'un système de type « expert », de notre outil de simulation, de données de télédétection de sols nus, et d'un modèle simulant les effets de l'érosion.

Remerciements

Les recherches présentées ici ont bénéficié de financements de la part du CNES dans le cadre de l'appel d'offre SPOT4/MIR et du Ministère de l'Environnement dans le cadre du programme Eclat.

Bibliographie

- ARROUAYS D., JAMAGNE M. (1993). « Sur la possibilité d'estimer les propriétés de rétention en eau de sols limoneux lessivés hydromorphes du sud-ouest de la France à partir de leurs caractéristiques de constitution », *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 79, (1), 111-121.
- ARROUAYS D., VION I. (1993). « Utilisation de la couleur des sols pour l'évaluation de leur taux de matière organique. Un test simple pour les sols limoneux du piémont pyrénéen », *Science du Sol*, 31, 1-16.
- ARROUAYS D., PELISSIER P. (1994a). « Changes in carbon storage in temperate humic loamy soils after forest clearing and continuous corn cropping in France », *Plant Soil*, 100, 215-223.
- ARROUAYS D., KING C., VION I. (1994a). « Détection de variations du taux de matière organique de parcelles sous cultures intensives pour une cartographie des risques de dégradation des sols. Evaluation de l'apport spécifique de la bande MIR », *Proc. Six. Symp. Int. Mesures Physiques et Signatures en Télédétection*, Janvier 1994, Val d'Isère, France, pp. 601-609.
- ARROUAYS D., PELISSIER P., KING D., LE BISSONNAIS Y. (1994b). « Changes in carbon storage in humic soils after forest clearing and continuous corn cropping in France. A geographical study for a reliable estimation of global carbon release in a small natural area », *Proc. 15th World Congress of Soil Science*, Acapulco, Mexico, Vol 9, Supplement, 221-234.
- ARROUAYS D., KICIN J.L., PELISSIER P., VION I. (1994e). « Evolution des stocks de carbone des sols après déforestation : Analyse spatio-temporelle à l'échelle d'un paysage pédologique », *Etude et Gestion des Sols*, 1(2), 7-15.
- ARROUAYS D., VION I., KICIN J.L. (1995a). « Spatial analysis and modeling of topsoil carbon storage in temperate forest humic loamy soils of France », *Soil Science*, 159:191-198.
- ARROUAYS D., KING C., VION I., LE BISSONNAIS Y. (1995b). « Detection of soil crusting risks related to low soil organic carbon contents by using discriminant analysis on Thematic Mapper data », *Geocarto International*, (sous presse).
- ARROUAYS D., BALESSENT J., MARIOTTI A., GIRARDIN C. (1995d). « Modelling organic carbon turnover in temperate forest soils converted to corn cropping by using ^{13}C natural abundance measurements », *Plant and Soil*, 173:191-196.
- BALESSENT J., MARIOTTI A., BOISGONTIER D. (1990). « Effect of tillage on soil organic carbon mineralization estimated from ^{13}C abundance in corn fields », *J. Soil Science*, 41, 587-596.
- CERRI C., FELLER C., BALESSENT J., VICTORIA R., PLENECASSAGNE A. (1985). « Application du traçage isotopique naturel en ^{13}C à l'étude de la dynamique de la matière organique dans les sols », *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 300, 423-428.

- GERBERMANN A.H., NEHER D.D. (1979). « Reflectance of varying mixtures of clay soil and sand », *Photog. Eng. rem. Sens.* 45, (8), 1145-1151.
- GRIGAL D.F., OHMANN L.F. (1992). « Carbon storage in upland forest of the Lake States », *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 56, 935-943.
- HENDERSON T.L., SZILAGYI A., BAUMGARDNER M.F., CHEN C.T., LANDGREBE D.A. (1989). « Spectral band selection for classification of soil organic matter content », *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53, 1778-1784.
- HUNTINGTON T.G., RYAN D.F., HAMBURG S.P. (1988). « Estimating soil nitrogen and carbon pools in a Northern hardwood forest ecosystem », *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52, 1162-1167.
- KRISHNAN P., ALEXANDER J.D., BUTTLER B.J., HUMMEZ J.W. (1980). « Reflectance technique for predicting soil organic matter », *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44 (6) 1282-1285.
- MARIOTTI A., BALESDENT J. (1990). « ¹³C natural abundance as a tracer of soil organic matter turnover and paleoenvironment dynamics », *Chem. Geol.* 84, 317-319.
- MARTIN A., MARIOTTI A., BALESDENT J., LAVELLE P., VUATTOUX R. (1990). « Estimate of organic matter turnover rate in a savannah soil by ¹³C natural abundance », *Soil Biol. Biochem.* 22, 517-523.
- PARTON W.J., SCHIMEL D.S., COLE C.V., OJIMA D.S. (1987). « Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands », *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51, 1173-1179.