

Emploi de la télédétection pour l'étude de l'humidité des sols

L'humidité des sols est une donnée importante pour l'agronome, puisqu'elle conditionne l'alimentation en eau des plantes. Elle présente aussi un grand intérêt pour le pédologue dans la mesure où elle est un facteur de la composition de la solution du sol.

Dans tous les cas, ce qui importe le plus est la dynamique de l'eau dans le sol. Il en résulte que l'essentiel est de pouvoir suivre l'évolution dans le temps de l'humidité du volume-sol.

Si l'on veut apporter des informations utiles pour répondre à la question des relations: Sol et Eau, il est nécessaire de prendre en compte:

- 1) la répartition de l'eau en profondeur,
- 2) la répartition de l'eau spatialement,
- 3) l'évolution dans le temps de cette répartition.

LES APPORTS DE LA TÉLÉDÉTECTION

ELÉMENTS DIRECTEMENT DÉCELABLES

Selon les longueurs d'onde utilisées, les informations obtenues permettent d'obtenir des renseignements variables selon la profondeur.

Avec les *micro-ondes*, il est possible d'avoir des informations sur des épaisseurs variant du cm au m. Les recherches sont actuellement en cours. Mais les résultats obtenus sur le terrain, ne permettent pas encore de tirer des conclusions certaines, les réponses ne dépendant pas uniquement de l'humidité (fig. 1).

Avec l'*infra-rouge thermique*, on obtient une estimation de la conductivité thermique de la subsurface du sol. La conductivité thermique du sol est faible lorsqu'il est sec et plus forte lorsqu'il est humide. La

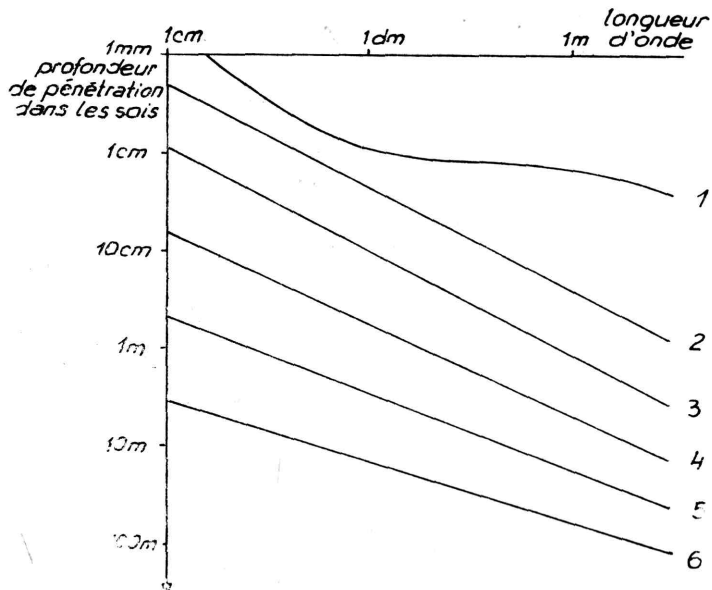


Fig. 1. Possibilité de lecture des sols par les radars (D'après ESRO, CR 137):
 1, 2 — eau de mer, 3 — sols noyés, 4 — limons humides, 5 — sols secs, 6 — sables secs

Rys. 1. Możliwość odczytania gleb przez radary (według ESRO, CR 137):
 1, 2 — woda morska, 3 — gleby zalane, 4 — wilgotne gleby gliniaste, 5 — gleby suche, 6 — suche piaski

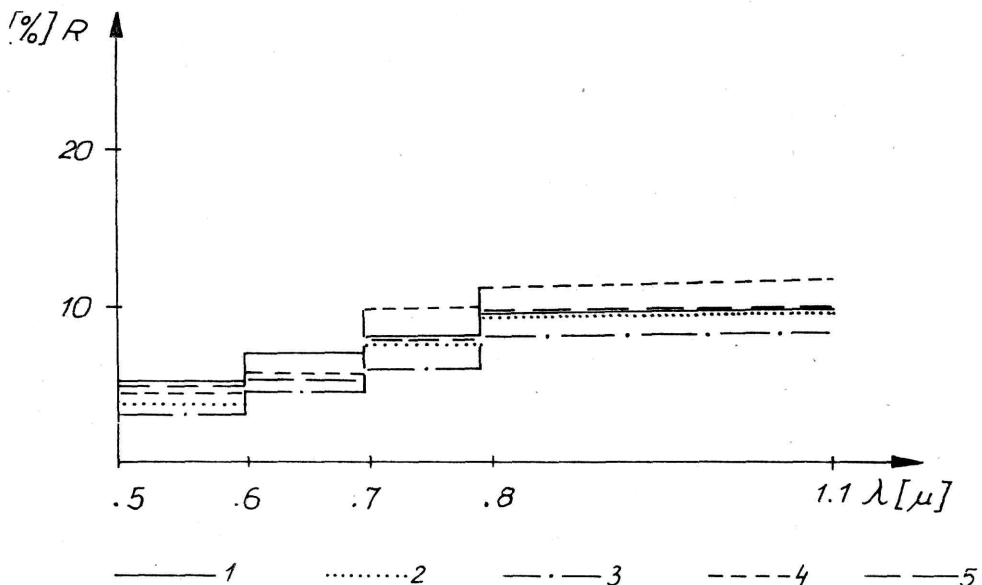


Fig. 2. Courbes de réflectance de sols organiques:

1 — surface rigoureuse (R), humidité (H) 4%, matière organique (M.O.) 4,2, 2 — R, H 18%, M.O. 3,3, 3 — R, H 16%, M.O. 4,1, 4 — surface lisse (L), H 16%, M.O. 4,1, 5 — L, H 18%; M.O. 3,3

Rys. 2. Krzywe odbicia gleb organicznych:

1 — ścisła powierzchnia (R), wilgotność (H) 4%, materiał organiczny (M.O.) 4,2, 2 — R, H 18%, M.O. 3,3, 3 — R, H 16%, M.O. 4,1, 4 — powierzchnie gładkie (L), H 16%, M.O. 4,1 5 — L, H 18%, M.O. 3,3

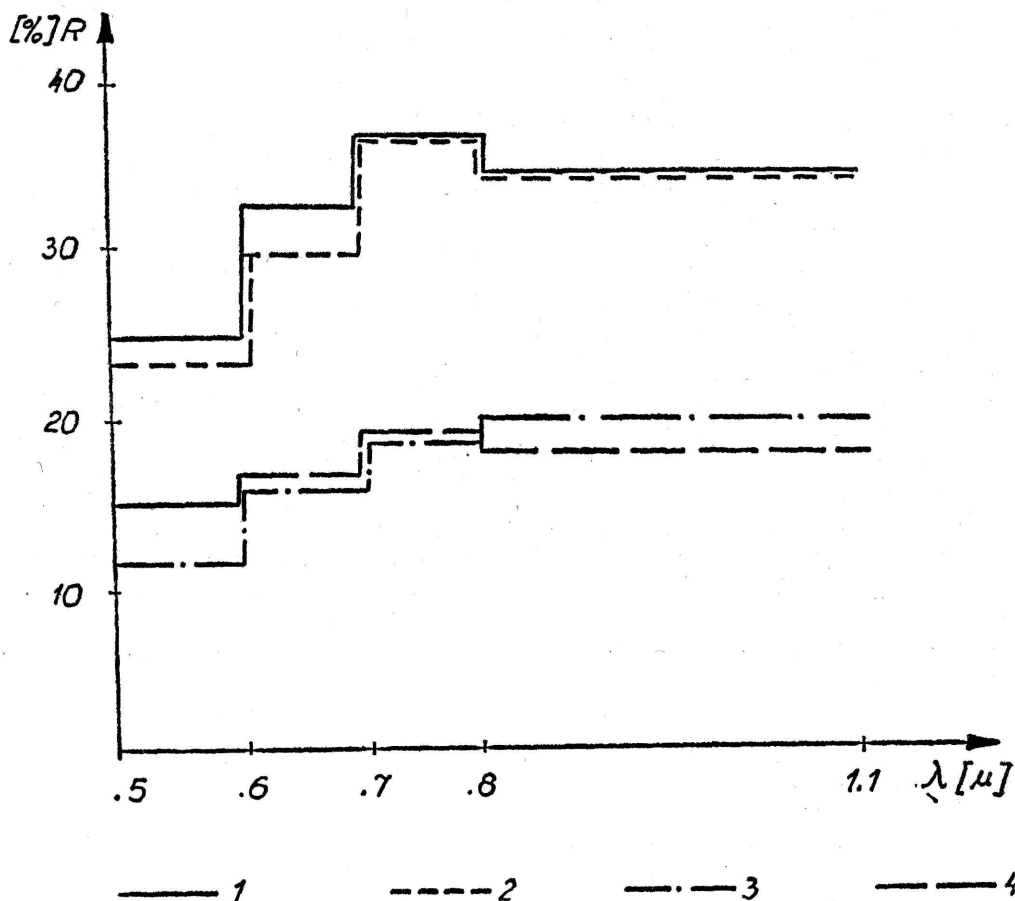


Fig. 3. Courbes de réflectance de sols peu organiques:

1 — L, H 3%, M.O. 1,3, 2 — L, H 14%, M.O. 1,3, 3 — R, H 14%, M.O. 0,7; 4 — R, H 14%, M.O. 1,3

Rys. 3. Krzywe odbicia gleb małoorganicznych:

1 — L, H 3%, M.O. 1,3, 2 — L, H 14%, M.O. 1,3, 3 — R, H 14%, M.O. 0,7, 4 — R, H 14%, M.O. 1,3

conductivité varie aussi avec la porosité du sol. Pour être interprétées correctement, il est nécessaire de comparer les mesures dans diverses longueurs d'ondes, ou en fonction du temps (réponses de jour, de nuit, etc.).

Avec le *visible* et le proche *infra-rouge*, les réponses concernent uniquement la surface du sol. Ici, plusieurs facteurs importants interviennent. Ce sont: le taux en matière organique, la rugosité, l'ensemble des facteurs liés à l'humidité: porosité, texture, structure.

Des travaux effectués sur le terrain ont montré (Białousz, Girard, 1978) que:

— Si le taux en matière organique est fort (supérieur à 3—5%) et entraîne une faible clarté de la couleur (clarté < 4 pour le Code Munsell), l'état de rugosité du sol et son humidité n'interviennent prati-

quement pas sur la réflectance, celle-ci ne dépassant pas 20% dans le visible ou le proche infra-rouge (800—1100 nm) (fig. 2).

Dans le cas où la teneur en matière organique est moyenne, ou faible:

— Si la rugosité est différente entre divers types de sol, c'est elle qui apparaît, et non pas les différences d'humidité (fig. 3).

— Pour un même sol, ayant la même rugosité, s'il est humide, la réflectance est plus faible que s'il est sec (fig. 4).

En fait, sur le terrain, les quatre facteurs structuraux du sol, texture, porosité, et humidité sont liés. Pour différencier l'effet humidité de l'effet texture, il faudrait obtenir des données de réflectance dans les bandes d'absorption de l'eau: 1450 nm et 2400 nm. Or, ces deux bandes ne sont pas accessibles du fait de l'absorption atmosphérique. La seule solution restante semble être celle concernant les bandes à 950 nm et 1150 nm.

Pour comprendre comment intervient la structure du sol et sa porosité, il est nécessaire de comparer les réponses du même sol en fonction

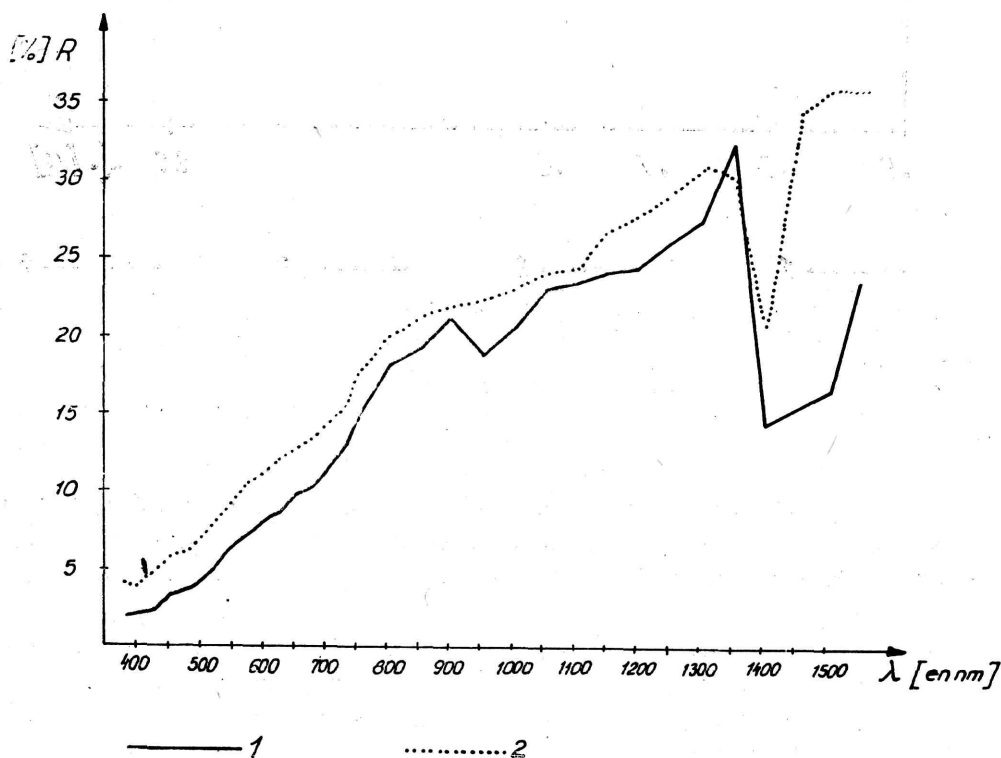


Fig. 4. Courbes de réflectances d'un sol, à deux taux d'humidité: sol limoneux calcaire:

1 — humidité 17,5%, 2 — humidité 2,8%

Rys. 4. Krzywe odbicia gleby o dwóch wskaźnikach wilgotności: gleby gliniastowapiennej

1 — wilgotność 17,5%, 2 — wilgotność 2,8%

des diverses périodes hydriques du sol dans l'année. Une telle étude permettrait de séparer ce qui est dû à l'humidité propre du sol et à ses composantes structurales, texturales et porales.

Il serait ainsi possible de déterminer quelle est la répartition de l'eau en profondeur, par l'évolution dans le temps des réponses dans les diverses bandes spectrales.

Par cette approche, l'étude de la répartition spatiale de l'eau impose que tous les sols soient nus sur l'ensemble de la zone étudiée. Comme c'est très peu probable en zones cultivées, celles où l'intérêt de l'étude de l'humidité est évidente, il faut passer par une autre voie: celle des éléments indirectement décelables.

ELÉMENTS INDIRECTEMENT DÉCELABLES

Le sol s'inscrit dans un paysage, une morphologie. Cette dernière peut donner des informations utiles en ce qui concerne l'humidité du sol. Il en va de même pour la végétation qui se développe sur le sol.

1. La Morphologie — La surface du sol

L'étude de la surface du sol, par exemple: battance, rugosité, types de ruissellement, aménagements du modèle par l'homme, couvertures végétales, pierrosité... et l'étude des pentes, des formes morphologiques

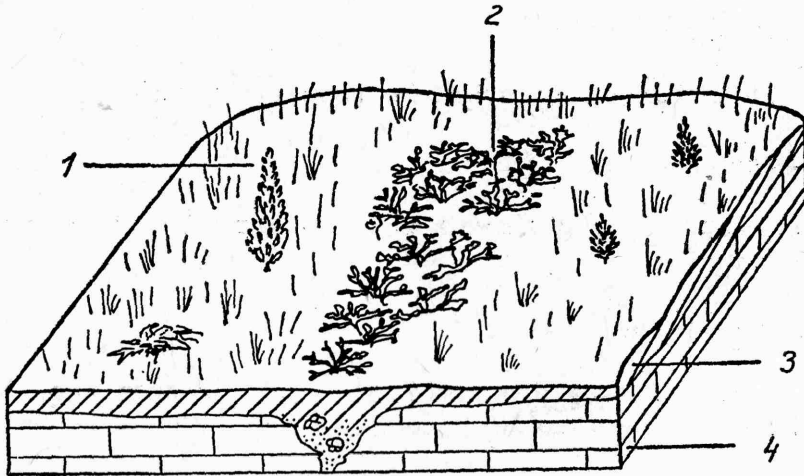


Fig. 5. Influence de la nature du sol sur la répartition de certaines espèces végétales:

1 — pelouse à *Bromus erectus* et *Juniperus communis*, 2 — lande à *Calluna vulgaris*, 3 — matière organique, 4 — calcaire dur

Rys. 5. Wpływ natury gleby na rozmieszczenie pewnych gatunków roślinności: 1 — trawniki z występującymi *Bromus erectus* i *Juniperus communis*, 2 — wrzosowisko z występującymi *Calluna vulgaris*, 3 — materiał organiczny, 4 — wapień skalisty

et leurs dynamiques, permet de cerner la dynamique de l'eau externe au sol, et aussi parfois, la dynamique interne.

2. La végétation

La végétation par l'alimentation de ses racines et par son mode de développement, est capable de „lire” ce qui se passe dans la profondeur du sol, jusqu'au niveau de son enracinement. On peut, de cette façon, obtenir des renseignements concernant la profondeur du sol, la texture, la porosité, la perméabilité, le calcaire, le pH. La végétation donne aussi des indications sur l'extension spatiale des phénomènes (fig. 5).

Conclusion

Les données de la télédétection doivent pouvoir être assez nombreuses pour qu'on puisse espérer alimenter un modèle (à construire par le pédologue), qui donnerait une approche de la distribution temporospatiale de l'humidité des sols.

LES ÉLÉMENTS DU MODÈLE DE LA CIRCULATION DE L'EAU

Il comporte trois ensembles: l'alimentation, les pertes en eau, la rétention.

A. L'ALIMENTATION

L'eau qui arrive au sol provient de diverses origines:

1. Les précipitations

On ne dispose pas d'éléments pour les apprécier directement par télédétection.

2. La submersion

Des images prises à diverses dates peuvent donner une idée sur l'extension des submersions ainsi que sur leur dynamique.

3. Le ruissellement

Il peut être apprécié à partir d'interprétations effectuées sur des documents stéréoscopiques, ainsi que par certains effets: divers à partir d'interprétations effectuées sur des documents stéréoscopiques, ainsi que par certains effets: divers types d'érosions ou d'apports.

4. Les transferts latéraux internes

Il est nécessaire d'avoir une connaissance sur le drainage latéral du sol (porosité, perméabilité, texture, structure) pour évaluer ces transferts. L'évaluation sera facilitée par des données de pente, et de distribution spatiale des formes morphologiques, facilement détectables sur les photographies. Des documents pris à diverses dates sont aussi très utiles.

5. Les nappes phréatiques

Leur apport d'eau est visible par l'intermédiaire des racines des végétaux qui peuvent utiliser ainsi une réserve en eau ne provenant pas du sol directement. Seuls des documents donnant l'information spatiale sont intéressants. Les photographies aériennes et les images satellites sont satisfaisantes.

B. LES PERTES EN EAU

Les pertes en eau se font par le haut: évapotranspiration, ou par le bas: infiltration, ou latéralement.

1. Evapo-transpiration

Des recherches sont en cours actuellement pour essayer de la déterminer, par l'intermédiaire de modèles, en se basant sur les réponses de la bande de l'infra-rouge thermique.

2. Infiltration ou drainage vartical

Elle dépend en grande partie de la perméabilité du sol ainsi que de la porosité et de la nature du substrat ou des formations superficielles. Ces derniers peuvent être interprétés à partir d'images satellites dans la bande $0,4 \mu\text{m}$ — $1,1 \mu\text{m}$, et de photographies aériennes.

3. Transferts latéraux internes ou drainage latéral (voir plus haut).

4. Ruissellement (voir plus haut).

C. LA RÉTENTION

Plusieurs facteurs interviennent dans la rétention en eau d'un sol. Ils sont presque toujours en relations les uns avec les autres.

1. L'épaisseur du sol

Les micro-ondes de l'ordre du mètre devraient permettre d'avoir une appréciation globale sur la profondeur du sol et son humidité. Mais il n'y a pas encore eu d'expériences de terrain menées dans cette bande, dans le domaine civil.

Il est cependant possible d'interpréter la profondeur du sol si l'on peut déterminer son substrat, les formations superficielles, la pente.

Ces éléments permettent de déterminer la morphologie interne, et connaissant la morphologie externe, on peut en déduire l'épaisseur du sol.

2. La texture, la structure, la porosité

Ces trois éléments sont interdépendants quant à leur interprétation. Il faut donc les traiter ensembles. Il est possible d'en faire une interprétation si l'on détermine: le substrat, les formations superficielles, l'organisation des sols dans le paysage, la morphologie, l'utilisation du sol.

Cela se fait à partir de photographies et d'images, prises à diverses dates et dans des bandes spectrales différentes.

3. La matière organique, le calcaire

Ces deux éléments peuvent s'identifier à partir des réponses spectrales dans diverses longueurs d'ondes (Girard, 1970; Białousz, Girard, 1978) — fig. 6.

D. AUTRES ÉLÉMENTS

Il existe d'autres éléments qui peuvent se déterminer par télédétection et qui interviennent dans la construction du modèle.

1. La battance

Elle donne des renseignements sur la structure, la texture, et le taux en matière organique. Elle s'identifie assez facilement sur photographie aérienne car la réflectance des sols est très forte. On peut aussi avoir une réponse avec les micro-ondes.

2. La pierrosité

En surface, la pierrosité augmente la réflectance, il faut donc en tenir compte dans l'interprétation de la valeur de la réflectance. Dans

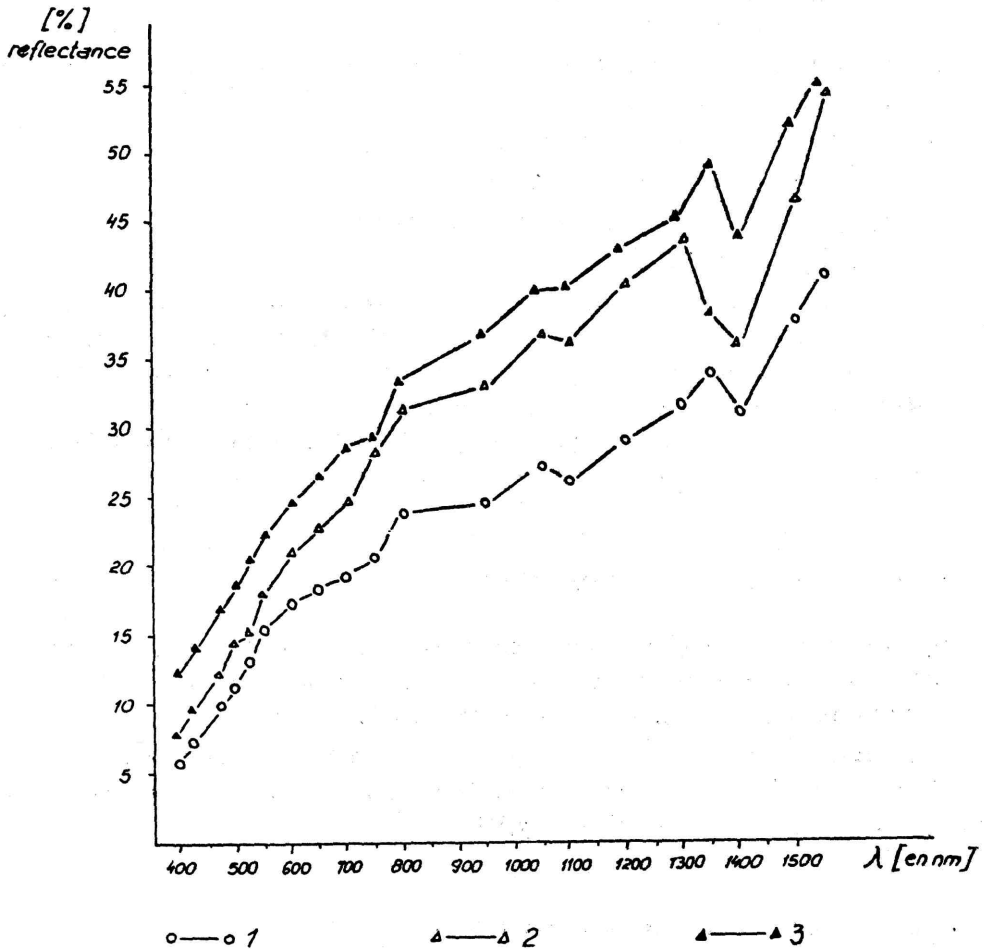


Fig. 6. Courbes de réflectances des sols ayant des compositions en calcaire et en fer différentes:

1 — sol à glauconie (vert): CaCO_3 52%, Fe 3,3%, 2 — sol jaunâtre: CaCO_3 65%, Fe 1,3%, 3 — sol blanchâtre: CaCO_3 67%, Fe 0,6%

Rys. 6. Krzywe odbicia gleb zawierających wapień i żelazo:

1 — gleby zawierające glaukofan (zielony): CaCO_3 52%, Fe 3,3%, 2 — gleby żółtawe: CaCO_3 65%, Fe 1,3%, 3 — gleby białawe: CaCO_3 67%, Fe 0,6%

le sol, la pierrosité modifie la densité apparente et la porosité, donc la rétention en eau.

3. La rugosité

La rugosité modifie beaucoup les caractéristiques électromagnétiques du sol, quelque soit la longueur d'onde choisie.

Ces éléments constituent une partie des informations nécessaires au fonctionnement du modèle proposé.

LE MODÈLE DE L'HUMIDITÉ DU SOL

Pour déterminer l'humidité du sol, il est nécessaire de passer successivement par quatre phases:

- La dynamique de l'eau dans le sol;
- L'évaluation de la réserve en eau du sol;
- La circulation de l'eau du sol dans son paysage;
- Le bilan hydrique du sol.

A chaque phase, on peut établir un modèle partiel, dont les éléments sont constitués de questions auxquelles l'interprétation des images et des photographies permet presque toujours de répondre. On passe successivement d'un modèle à l'autre afin d'intégrer successivement les aspects statiques (Modèle 2), et dynamiques (Modèle 1) de l'eau dans le sol, puis les aspects spatial (Modèle 3) et temporel (Bilan Hydrique).

LE MODÈLE 1: DYNAMIQUE DE L'EAU DANS LE SOL

Il faut suivre l'enchaînement des questions proposées. On a indiqué en *italique* les questions dont les réponses pouvaient être trouvées pour l'interprétation des images ou photographies.

Les chaînes de questions proposées se terminent soit par *divers types de dynamiques* qui seront réutilisés dans le Modèle 3, soit par des renvois au Modèle 2 ou au Bilan hydrique.

LE MODÈLE 2: ÉVALUATION DE LA RÉSERVE EN EAU DU SOL

Ce modèle ne prend en compte dans l'évaluation en eau du sol que certains des *éléments* nécessaires qui sont *interprétables* sur des documents de télédétection.

Les limites de profondeurs: 40—80—120 sont arbitraires. Ils correspondent à un classement qualitatif ordonné. A partir de ces éléments, on renvoie à des évaluations $R+1$, $R-2$, $R+3$, etc...

Ceci permet de classer les réserves en eau des divers sols d'une région. Il ne peut être question de donner des valeurs précises de la réserve avec ce modèle. Une fois le classement fait, on peut alors donner une valeur minimale et une valeur maximale de la réserve en eau des sols de la région étudiée, et ainsi, caler et déterminer les valeurs des réserves en eau de chaque sol.

Pour un sol déterminé, il est possible d'avoir plusieurs couches de sol dont les réserves soient différentes. Il faut donc pour le sol faire la somme des réserves et donc, effectuer plusieurs boucles sur le modèle.

Pour une même couche de sol, plusieurs aspects peuvent intervenir. On obtient plusieurs évaluations qu'il faut sommer en S . Par exemple, pour un sol de texture limoneuse, et battant, il faut faire:

$$(R-1) + (R-1) \rightarrow S = R-2$$

Cette somme sera multipliée par un facteur de profondeur. On arrive ainsi au calcul de RE : réserve en eau du sol.

LE MODÈLE 3: HUMIDITÉ DES SOLS

Ce modèle prend en compte la position topographique du sol étudié, afin d'évaluer les arrivées ou les départs d'eau au niveau du paysage. Il nécessite la prise en compte des résultats des modèles 1 et 2. Il permet de déterminer l'humidité du sol en fonction du temps, la référence étant celle des états successifs d'humidité du sol calculés par la méthode classique du bilan hydrique (Girard, 1973).

A partir de ces modèles, on peut donner une appréciation:

- sur la valeur de la réserve en eau du sol,
- sur la durée des périodes: d'engorgement du sol, d'assèchement du sol, de sécheresse du sol, de reconstitution du stock en eau du sol,
- sur la dynamique de l'eau dans le sol.

Avec l'interprétation des images et photographies, on peut établir la répartition spatiale de l'humidité des sols. Si l'on peut disposer de documents pris à diverses dates, on peut alors ajuster les modèles et espérer une prévision des divers états d'humidité des sols.

CONCLUSION

Pour donner un diagnostic complet en matière d'humidité des sols, il est nécessaire d'utiliser l'ensemble des données de la télédétection et de leur adjoindre un certain nombre d'estimation.

On peut alors, à l'aide de modèles simples, apprécier les divers états de l'humidité du sol dans le temps et dans l'espace, et saisir quelles sont les relations entre le sol et l'eau dans un paysage.

BIBLIOGRAPHIE

- Białousz S. et Girard M-C., 1978: *Współczynniki odbicia spektralnego gleb w pasmach pracy satelity Landsat (Les coefficients de réflectance spectrale des sols dans les bandes de travail du satellite Landsat)*, [in:] *Fotointerpretacja w geografii*, t. III (13), p. 118—129.
- Girard M-C., (1970): *Interprétation de quelques facteurs pédologiques, à partir de photographies aériennes, en relation avec différentes saisons et différentes émulsions*, C.R. du IIIème Symposium International de Photo-interprétation, pp. 925—947, Septembre, Dresde.

- Girard M-C., (1973): *Utilisation des données météorologiques pour l'étude des sols*, C.R. de l'Académie d'Agriculture. pp. 97—106, 17 janvier.
- Girard C-M., Girard M-C., (1975): *Applications de la télédétection à l'étude de la Biosphère*, 186 p. Masson, Paris.
- Girard M-C., (1977): *Télédétection de la surface du sol*, A.I.S.S., 1er Colloque: „Pédologie et Télédétection”, Rome, pp. 55—64, Grignon.

MICHEL C. GIRARD

ZASTOSOWANIE TELEDETEKЦИИ DO BADANIA WILGOTNOŚCI GLEB

Streszczenie

Informacje o wilgotności gleb mają duże znaczenie dla rolnika, ponieważ od wilgotności gleby zależy zaspokojenie wodnych potrzeb roślin. Badanie zmian wilgotności w czasie pozwala wyróżnić okresy suszy i nadmiaru wody.

Teledetekcja jest jedną z technik dostarczających informacji na ten temat. Mogą one pochodzić z badań bezpośrednich, jak: pomiar w różnych długościach fal (pasma widzialne, podczerwień, mikrofałe) własności spektralnych gleb wilgotnych, określanie w terenie stref nawadnianych, odwadnianych, lub pośrednio przez interpretację roślinności i form terenu.

Aktualnie w opracowywaniu dokumentów przedstawiających przestrzenne zróżnicowanie wilgotności gleb można stosować różne techniki teledetekcji: skanery wielospektralne, mikrofałe, analizę form terenu.

Do oceny zmian wilgotności gleb w czasie i przestrzeni zaproponowano 3 modele. Dla gleby rozumianej jako twór przestrzenny, będący częścią składową krajobrazu, możliwa jest diagnostyka jej wilgotności.

MICHEL C. GIRARD

REMOTE SENSING OF SOILS MOISTURE

Summary

Soil moisture is a very important data for the agronomist: it determines plants water feeding. Its changes according to time allows to distinguish periods of drought and of drainage.

Remote sensing is a technique giving information on that subject. For that purpose two types of measures are done.

1. Reflectance measurements of wet soils in different wavelengths (visible, infra-red, microwave).

2) Détermination of areas, irrigated or drained (shape types).

Indirect methods may be used by interpretation of plant cover and morphology.

Actually it is possible to obtain documents giving spatial distribution of soil moisture, using different remote sensing techniques: MSS, microwave, pattern analyses.