Symposium International de Cartographie Thématique
Dérivée des Images Satellitaires, Saint-Mandé 2-4 octobre 1990

O Applications à l'agriculture, aux forêts et à l'usage du sol
Applications to agriculture, forests and land use

UTILISATION DE LA TÉLÉDÉTECTION POUR LA CARTOGRAPHIE DES COMPORTEMENTS HYDRIQUES DE SURFACE

par Théa VOGT et Henri VOGT

Laboratoire Environnement, Cartographie, Télédétection/GSTS
Centre de Recherche de Géographie à l'Université Louis Pasteur, Strasbourg

Summary

The mapping of wet soils with classic methods costs a great deal in time and money. For agronomic and forestry purposes the measure of soil wetness, which is punctual in space and in time and quickly changing, is less relevant thant the knowledge of the soil hydric behaviour (wet, hydromorphic, filtering...). Satellite data supply a synchronous information about a large area; it is possible to show that they can be used to observe the soil wetness status. The results obtained in a research programme going on since 1986 in our Laboratory point out the Landsat TM data ability to supply useful informations about the hydric behaviour of soils.

In a first time several tests were done in Alsace (Loess plateau, Ill-Rhine plain, alluvial forest), then in the Vosges mountains. Other tests were done in a swedish Lapony area and in Northern Mali. In every case, the results are encouraging and we think that remote sensing can be a good help for the cartography of wet areas.

Résumé

La cartographie des sols humides par les méthodes classiques est longue et coûteuse. La mesure de l'humidité, ponctuelle dans l'espace et dans le temps, est moins importante pour l'agronomie et la foresterie que la connaissance du comportement hydrique du sol (humide, hydromorphe, filtrant...). Les données de télédétection satellitaire présentent l'avantage de la synchronicité sur de grandes surfaces et peuvent mettre en évidence l'humidité du sol. Les résultats obtenus dans un programme de recherche en cours depuis 1986 dans notre Laboratoire montrent la capacité de Landsat TM à fournir des informations utiles sur le comportement hydrique des sols.

Ces travaux ont été menés en un premier temps en Alsace (plateau loessique, plaine ello-rhénane, forêt alluviale), puis dans les Vosges. Des essais ont ensuite été effectués sur un secteur de Laponie suédoise et une zone du Nord du Mali. Dans tous les cas, les résultats sont encourageants et permettent de penser qu'il y a là une aide sérieuse à la cartographie des zones à rétention d'eau.

◆ Introduction

On entend par sols humides (ou sols à excès d'eau) ceux qui ont tendance à garder l'humidité ou dont le temps de ressuyage est très long. Alors que la capacité de rétention est une propriété intrinsèque dépendant essentiellement de la texture et de la structure du sol, le **temps de ressuyage** est lié aussi aux conditions topographiques et aux traits physiques du soubassement; il n'est donc pas déductible des seuls caractères du sol. La connaissance de ce comportement est primordiale pour l'agriculture, par exemple pour décider des dates d'intervention sur le terrain, de techniques aratoires particulières, de l'emplacement des systèmes de drainage.

L'humidité des sols est une valeur variable dans l'espace et dans le temps et ne peut être mesurée que de façon ponctuelle. Lorsqu'il s'agit d'observer de grandes surfaces, le temps nécessaire pour les mesures rend toute comparabilité entre différents points impossible, à moins d'installation sophistiquées et coûteuses, mais de toute façon stationnelles. Pour les problèmes d'aménagement, ce n'est pas une connaissance précise des bilans hydriques qui est nécessaire, mais une **évaluation des comportements hydriques des terres** (filtrantes, hydromorphes, etc.) à une échelle régionale. La question s'est donc posée de l'utilisation de données satellitaires dans cette optique: la

télédétection, sans permettre de mesures directes, présente l'avantage d'une information **synchrone** à l'échelle régionale ou sous-régionale et donc la possibilité d'observations dans lesquelles le décalage chronologique n'intervient pas.

Par rapport à d'autres données satellitaires, Landsat TM allie une bonne résolution spatiale (pixels de 30x30 m) à un large spectre radiométrique comprenant entre autre les gammes des Infra-Rouges Moyens (IRM: 1,55 à 1,75µ = TM5 et 2,08 à 2,35µ = TM7) qui sont les plus affectées par l'humidité des sols (Coleman 1985; Musick et Pelletier 1986; Coleman et Montgomery 1987). Les essais ont donc été effectués à partir de ces données. Il est apparu que la méthode de traitement la plus efficace est l'Analyse en Composantes Principales (ACP).

Si l'on traite par ACP les canaux TM à l'exclusion du thermique (6), dont la définition trop grossière nuit aux images produites, on obtient trois facteurs intéresants qui expliquent plus de 90% de la variance. Le premier est une moyenne de tous les canaux, un facteur taille, que l'on peut considérer comme un équivalent de la **brillance**, le deuxième présente une corrélation très forte avec le proche infra-rouge et est assimilable à un **indice de végétation**. (Towshend 1984; Jensen 1986; Lacaze et Joffre 1987). Le troisième facteur oppose le domaine des infra-rouges moyens (IRM = TM5 et TM7) aux autres longues d'onde.

Dès 1984, Crist et Cicone ont obtenu ce résultat en utilisant la transformation du Tasseled Cap; il s'agit d'un ACP sur échantillons de végétation et de sols nus choisis à partir d'une image Landsat TM; les coefficients peuvent être appliqués à d'autres fichiers. Nous avons par contre effectué l'ACP directement sur les images, sans choix préalable d'échantillons, et comparé ensuite les résultats des deux méthodes.

◆ Les traitements

Les données utilisées proviennent d'une scène Landsat TM du 18/10/1984; en cette période une grande partie des sols sont découverts après les récoltes et les labours et peuvent donc être observés sans l'écran végétal. La date était très intéressante, car l'enregistrement avait été précédé par une séquence météorologique idéale: 102 mm de pluie entre le 11/9 et le 9/10 suivis de 17 jours de temps chaud et sec (Strasbourg-Entzheim). Le temps de ressuyage avait été suffisamment long pour que les sols filtrants soient asséchés, les plages restant humides pouvant être mises sur le compte des caractéristiques hydriques des sols et non pas d'un engorgement provisoire. Un premier essai a été effectué sur le plateau loessique de l'Outre-Forêt, assez bien connu pour avoir déjà été choisi comme secteur-test pour des études agronomiques. On a utilisé le logiciel CARTEL (Hirsch et Scheider, 1983), implanté sur l'IBM 3090 du Centre de Calcul du CNRS à Strasbourg.

• Le plateau loessique de l'Outre-Forêt (Nord de l'Asace).

Se posent ici des problèmes importants d'hydromorphie et des travaux de drainage ont dû être effectués; il s'agit d'un plateau loessique entaillé par des vallons, où la cartographie des formations superficielles est très délicate, car les différences de texture, de couleur et de carbonatation sont faibles; elle demande donc un long travail de terrain et un très grand nombre d'analyses de laboratoire. Des études ponctuelles avaient été effectuées en collaboration entre l'INRA (Station de Comar) et notre laboratoire en vue de repérer les secteurs les plus critiques du point de vue de l'hydromorphie, mais un aperçu d'ensemble manquait. Ce secteur loessique présente un certain nombre d'avantages en tant que zone test:

– grande **homogénéité texturale** des terres, toutes limoneuses (au moins 60% de limons): ceci simplifie l'étude, en éliminant les difficultés dues à la variabilité spatiale des formations superficielles, tout en laissant s'exprimer des contrastes liés aux comportements hydriques des sols;

– assez bonne **connaissance des caractères physiques** des terres, améliorée par une classification des données de télédétection: une analyse discriminante pas-à-pas (BMDP Statistical Software) sur les 7 canaux TM d'un secteur de 350 x 500 pixels (157 km²) avait permis de différencier six types de loess et lehm (Vogt 1987);

– **uniformité du type d'exploitation agricole**, parcelles de taille moyenne, faible nombre d'agriculteurs, d'où une plus grande facilité de collecte de l'information par enquête.

Un fichier de 350x500 pixels a été choisi, couvrant l'ensemble du plateau loessique; on y a appliqué les coefficients publiés par Crist et Cicone (1984) et Jensen (1986). L'image du facteur 3 ainsi obtenu est assez proche de celle de l'indice de végétation (NDVI), ce qui montre une forte dépendance du 3e facteur du Tasseled Cap par rapport au couvert végétal (Fig. 1 et 2). Par contre, l'image du 3e facteur obtenu par ACP du fichier montre une opposition entre des aires humides et sèches correspondant dans les grandes lignes à ce que l'on connaît des études préalables aux travaux de drainage dans le secteur de l'Outre-Forêt (Fig. 3). En la comparant avec la classification des types de terres on observe que:

– dans le secteur NW, des limons loessiques carbonatés, donc a priori filtrants, et même les croûtes de battance, apparaissent comme humides;

– l'image est nettement divisée en deux parties par une limite qui passe au travers de la forêt du Bienwald au Nord, séparée elle aussi en deux zones, «humide» et «sèche», la Forêt de Hagenau, au Sud, se situe dans la zone «sèche».

Des contrôles sur le terrain ont donc été effectués. Les sondages à la tarière ont montré que les **plages «sèches»** correspondent à des affleurement de limons loessiques homogènes sur plus d'1 m d'épaisseur. **Les plages «humides»** montrent plusieurs types de situations: 1. bas-fonds engorgés; 2. sols peu filtrants; 3. zones d'affleurement automnal de nappes perchées alimentées par les pluies d'été (l'enregistrement est du 18/10); 4. sols filtrants (loess) peu épais sur semelle de labour ou lehm. Dans le cas de la forêt du Bienwald, au Nord, il s'est avéré que le substrat de la zone humide est constitué jusqu'à -2 m au moins d'une alternance de minces lits de sables et d'argiles gorgés d'eau et présentant des taches d'hydromorphie (hydroxydes de fer); dans la zone sèche, à l'Est, le sondage s'est arrêté à un banc de galets (-0,5 m) sous couverture sableuse. La Forêt de Haugenau, au Sud, est installée sur un cône alluvial sableux. Au Nord, la séparation entre forêt «humide» et forêt «sèche» se fait selon une ligne de direction tectonique connue dans le Fossé rhénan.

Ce 3e facteur représente donc bien une opposition sols filtrants/sols humides liée non seulement aux caractères texturaux des terres mais aussi au profil du substrat. Il apparaît par ailleurs que ce facteur est indépendant du couvert végétal.

• Le secteur de Benfeld, dans la plaine ello-rhénane

Cette zone s'inscrit en grande partie dans la plaine alluviale du Rhin; l'Ill, affluent de ce fleuve, délimité à l'Ouest la basse terrasse inférieure rhénane. L'agencement des unités géomorphologiques est orienté en gros dans le sens Sud-Nord, selon l'axe du réseau hydrographique. Les formations superficielles qui se succèdent d'Est en Ouest sont les suivantes: une alternance de loess et de limons argileux pour la basse terrasse supérieure, des dépôts fluviatiles sableux à limono-argileux pour le champ d'inondation de l'Ill, un matériau surtout limoneux pour la basse terrasse inférieure du Rhin. Le fichier utilisé couvre 512x1300 pixels.

Lorsqu'on observe l'image des scores du 3e facteur de l'ACP, on s'aperçoit du fait que la **répartition des zones humides ne coïncide que partiellement avec la direction du réseau hydrographique**. Apparaissent en effet, orientées SW-NE, deux bandes perpendiculaires aux unités géomorphologiques visibles sur le terrain. Là encore, indépendamment de la végétation et des textures des horizons de surface, se dessinent des structures matérialisant des nuances d'humidité, qui recoupent obliquement le réseau hydrographique actuel et reprennent parfois des méandres anciens du Rhin. Ces linéaments se situent dans le prolongement d'axes tectoniques d'âge hercynien, visibles dans le massif vosgien et dans la Forêt Noire et suggèrent leur réactivation récente. On sait (p. ex. Illies et Greiner 1978) que la direction SE-NW de la composante horizontale du champ de contraintes dans l'avant-pays des Alpes depuis le Miocène, oblique par rapport à la direction du Fossé rhénan, aboutit à la réactivation de ces llinéaments anciens. A la mi-octobre, date de l'enregistrement, la nappe phréatique, après avoir atteint son maximum estival, amorce sa descente; les zones de plus forte rétention sont alors mises en évidence.

• La forêt alluviale ello-rhénane à la hauteur d'Erstein

Elle est siuée dans la plaine du Rhin, 20 km environ au Sud de Strasbourg; son substrat est constitué d'alluvions holocènes, bancs de galets et chenaux argilo-limoneux, dont il n'existe pas de carte détaillée: les levers géomorphologiques ne sont pas faciles dans ce type de milieu et la carte topographique, étant donné les très faibles dénivellations, est sommaire.

Il s'agit de forêts mixtes en partie naturelles; quelques secteurs sont protégés. Dans le «Bois de Sommerley», rhénan, dominent le *Salici-populetum* et le *Querco-Ulmetum*, alors que la «Forêt de l'Ill» est essentiellement un Querco-Carpinetum. En fonction du substrat et des conditions hydrologiques, la physionomie de la strate arborescente et le sous-bois sont modifiés (Carbiener 1975). Cependant, si stationnellement on peut entrevoir l'existence de relations étroites entre les conditions édaphologiques et la structure de la forêt, aucune cartographie d'ensemble n'a pu être faite. On a essayé alors une classification; en partant de l'hypothèse que le 3e facteur de l'ACP met en évidence l'humidité des sols, il a été introduit en tant que néo-canal et ajouté aux 7 canaux initiaux.

On a utilisé un fichier de 210x210 pixels extrait d'une scène Landsat TM du 31 juillet 1984, la forêt étant alors à son maximum végétatif; cependant, cet enregistrement avait été précédé par une série d'orages et les sols étaient trempés de façon assez uniforme. Pour la mise en évidence des caractères du substrat on a donc utilisé le 3e facteur de l'ACP effectuée sur les données du 18/10/1984. On a réussi à séparer 15 classes; celles qui représentent la forêt se combinent de façon variable, avec des dominantes qui mettent en évidence quatre types d'associations, dépendant du comportement hydrique du substrat : **la forêt alluviale rhénane humide**, sur dépôts argilo-limoneux (partie

orientale du Bois de Sommerley, à l'Est d'une digue du XIXe): on voit se dessiner les boucles de méandres grâce aux classes «humides»; **la forêt alluviale rhénane sur sols plus secs** (partie occidentale du Bois de Sommerley) à l'Ouest de cette digue, qui a mis ces terres à l'abri des inondation; **la forêt ellane humide** (au Sud d'Erstein); **la forêt ellane mésophile**, sur épandages caillouteux (au Nord d'Erstein). Des vérifications de terrain ont été effectuées et ont confirmé la justesse de l'information obtenue par le 3e facteur (Vogt, 1989, 1990).

• Bassin de Saint-Dié (Vosges)

Ce bassin est installé dans une zone de contact entre socle cristallin, grès et argilites permiens et grès triasiques du Buntsandstein. Les vallées sont relativement encaissées, surtout lorsqu'il s'agit de vallées de fracture; les sommets coiffés par le grès triasiques sont en général plans, alors que les formes dans les granites sont plus accidentées. Il n'existe pas de carte des formations superficielles. La végétation, forêts ou prés, est très couvrante et rend l'observation du susbstrat difficile. La zone est relativement humide, mais les venues d'eau et les aires de rétention sont très mal repérées, sauf les sources indiquées par la carte topographique. Dans ces conditions, un inventaire des zones à risques de glissements et de mouvements de masse demanderait un temps de terrain très long.

Un test a été effectué en partant du constat que le facteur «humidité» de l'ACP est indépendant du couvert végétal. La carte géologique au 1:50 000 a été numérisée (19x19 km, pixels de 50 m); quatre grands types de formations ont été retenus: grès, roches permiennes, cristallin, alluvions quaternaires (fonds de vallée). On a combiné ces types avec les scores du facteur «humidité» au moyen d'une classification par hyperboîtes, en séparant quatre niveaux d'«humidité» par type d'affleurement. A ce stade du travail, l'image obtenue n'a pu être vérifiée qu'en trois secteurs. La Fig. 5 montre les deux images de départ.

On peut observer que les couches de Conglomérat principal du Buntsandstein, formant le sommet des grès, apparaissent comme «sèches», alors que les grès sont plus humides, en particulier dans les zones faillées et au contact avec le Permien. Les contrôles de terrain ont montré que les taches d'humidité sur les plateaux gréseux correspondaient à des cuvettes colmatées de matériaux fins. Par ailleurs, on sépare bien dans le Permien le faciès gréseux, «sec» par rapport au faciès argileux, «humide». Les vérifications effectuées dans le cristallin ont montré que lorsque le granite apparaît dans les classes «humides» il s'agit de zones très altérées à teneur d'argile importante ou bien très fracturées. Le sommet du massif de Ste Marie-aux-Mines, au Sud-Est, apparaît comme très humide; à cela deux raisons: des totaux pluviométriques plus abondants (il avait plu pendant tout le mois de septembre et la première dizaine d'octobre) et des sols épais et très humiques, formant éponge. La mise en évidence des failles par les simples scores factoriels est remarquable et confirme les observations effectuées dans la plaine rhénane à hauteur de Benfeld.

Cette image a été ensuite «couchée» sur un modèle numérique de terrain et présentée en trois dimensions, ce qui permet de mieux visualiser les différentes informations. La possibilité de mettre en évidence par un procédé simple des zones saturées difficilement appréhendables dans ce milieu à couvert végétal continu nous semble un apport considérable de la télédétection.

◆ Conclusion.

Il apparaît donc qu'un traitement simple des données numériques Landsat TM est susceptible d'indiquer les aires à rétention d'humidité, quelles que soient les causes de l'état hydrique de surface, et ceci y compris sous couvert végétal. Des tests en cours, d'une part sur un secteur de Laponie suédoise, près de Kiruna, d'autre part dans le Nord du Mali (plateau de Yélimané) montrent que ce procédé est tout aussi valable dans des régions autres que les pays tempérés océaniques. C'est le facteur de l'ACP qui oppose les canaux de l'Infra-Rouge moyen aux autres qui est efficace dans ce but; sa structure est la même dans tous ces différents milieux (Fig. 4). Il semble cependant que le choix des données soit très important: les résultats les plus intéressants sont obtenus lorsque le contraste entre zones humides et sèches est suffisamment marqué.

Références.

CARBIENER R. – Die linksrheinischen Naturräume und Waldungen der Schutzgebiete von Rhinau und Daubensand (Frankreich): eine pflanzensoziologische und landschaftsökologische Studie. In: Das Taubergiessengebiet, Die Natur – une Landschaftsschutzgebiete Bad. – Württ. 7, Ludwigsburg, 1975, pp 438-535.

CRIST E. and CICONE R. – Application of the Tasseled Cap concept to simulated TM data. Photogramm. Engineering and Remote Sensing, 50, 1984, pp. 343-352.

COLEMAN T .L. and MONTGOMERY O.L. – Soil moisture, organic matter and iron content. Effect on the spectral characteristics of selected vertisols and alfisols of Alabama. Photogramm. Engineering and Remote Sensing 53, 1987, pp. 1659-1663.

HIRSCH J. et SCHNEIDER C. - CARTEL. Manuel d'utilisation du logiciel de traitement d'images et de cartographie de données de télédétection. Strasbourg: LCT/ULP, 1983.

ILLIES H. and GREINER G. – Rhinegraben and the Alpine System. Geological Society of America, Bulletin 89, **5**, 1978, pp.770-782.

JENSEN J.R. – Introductory Digital Image Processing. A Remote Sensing Perspective. (Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall), 1986.

LACAZE B. et JOFFRE R. – Caractérisation des formations végétales méditerranéennes à partir de données TM. International Journal of Remote Sensing, **18**, 1987, pp.1319-1333.

MUSICK H. and PELLETIER R. – Response of some thematic mapper band ratios to variation in soil water content. Photogramm. Engineering and Remote Sensing, **52**, 1986, pp. 1661-1668.

SCHNEIDER N. et VOGT T. – Apports de la télédétection satellitaire au repérage des sols humides. 113° Congrès des Sociétés Savantes, Strasbourg 1988, Télédétection, (Paris, Ed. C.T.H.S.), 1988, pp. 177-188.

TOWNSHEND J. - Agricultural land cover discrimination using TM spectral bands. International Journal of Remote Sensing, 1984,**15**: pp. 681-698.

VOGT T. – Classification des terres limoneuses et repérage des sols humides dans l'Outre-Forêt, à l'aide de données Landsat Thematic Mapper. Recherches géographiques à Strasbourg, 27, «Télédétection des milieux naturels et urbains» 1987, pp. 59-65.

VOGT, T.– Study of the relations between an alluvial forest and its site through Landsat TM data digital processing. The example of the Ill-Rhine alluvial forest (Alsace, France). EARSel 9th Symposium, Espoo (Finland) 27/6-1/7, Ispra, Commission of the European Communities, 1989, pp. 324-327.

Fig. 1. Plateau loessique. Indice de végétation (NDVI). Données Landsat TM du 18/10/1984.

Fig. 2. Plateau loessique. Scores du 3° facteur obtenu par application des coefficients de Crist & Cicone (1984).

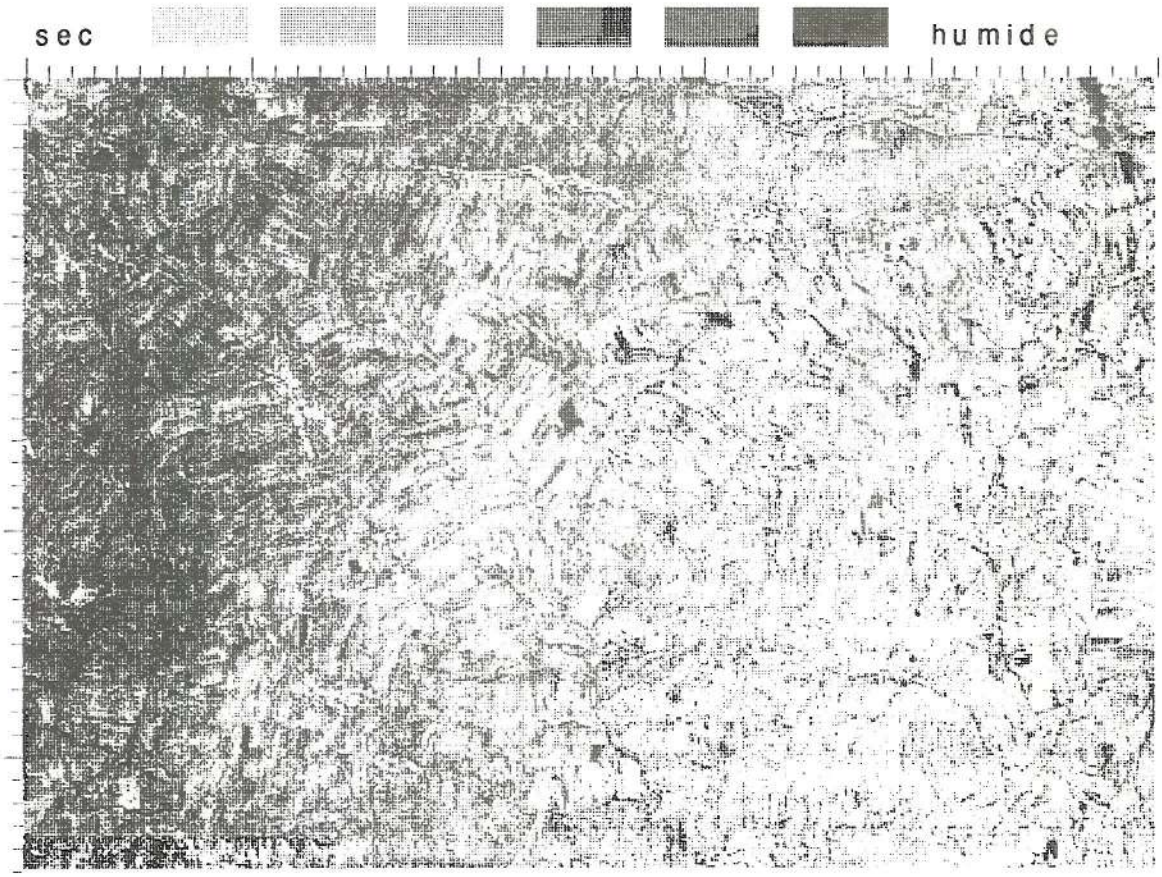

Fig. 3. Seebach . Image des scores du 3° facteur de l'ACP. A l'Ouest, les secteurs humides, à l'Est les formations filtrantes ; la Forêt de Haguenau, au SE, sur sables quaternaires, disparaît.

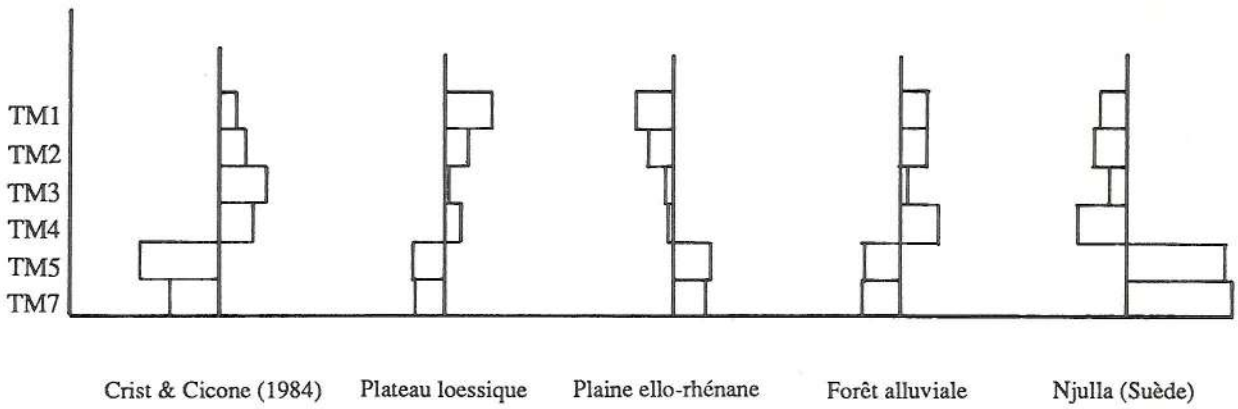

Fig. 4. Structure du facteur "humidité selon Crist & Cicone (1984) et d'après ACP des divers fichiers.

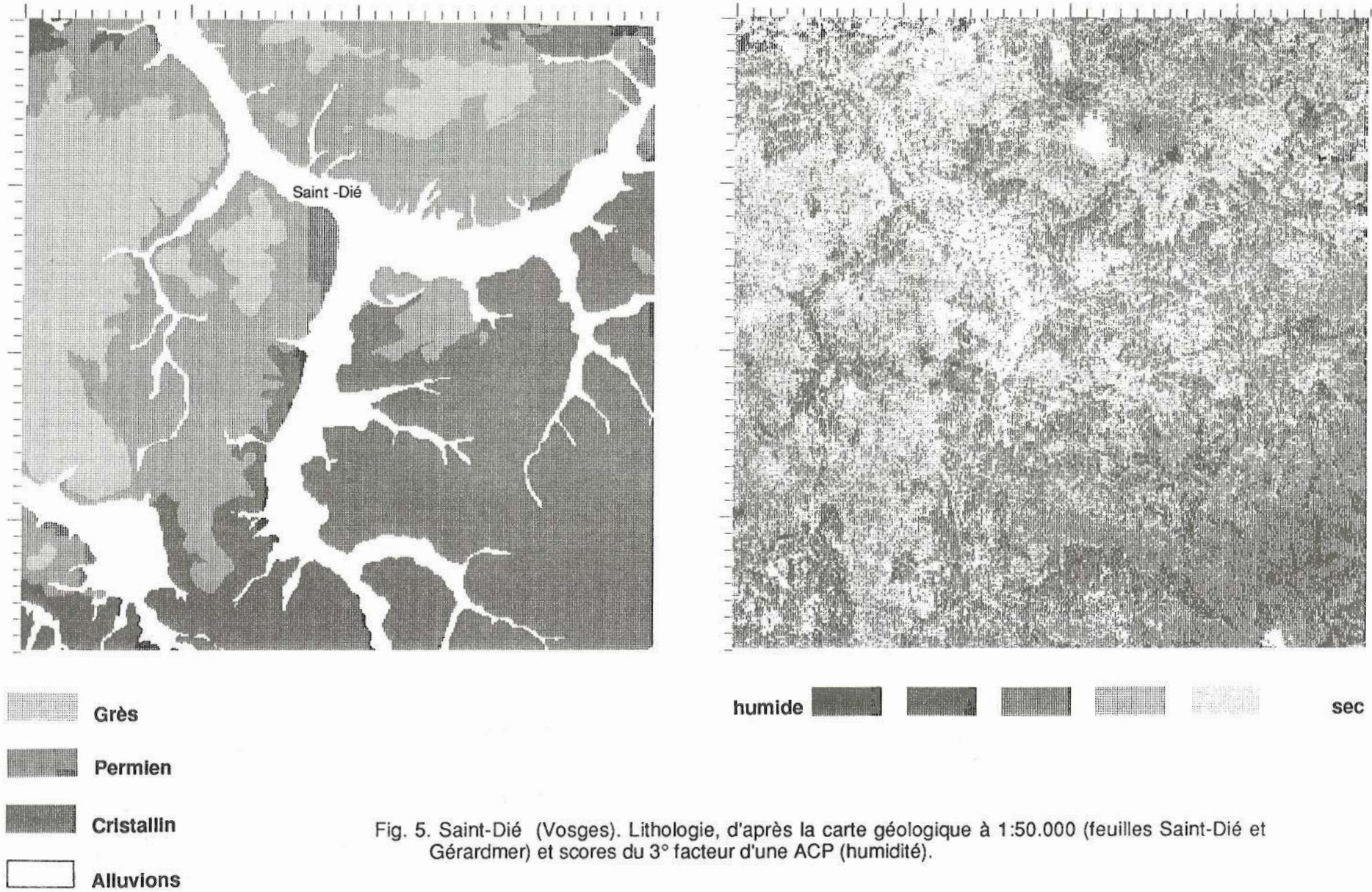

Fig. 5. Saint-Dié (Vosges). Lithologie, d'après la carte géologique à 1:50.000 (feuilles Saint-Dié et Gérardmer) et scores du 3° facteur d'une ACP (humidité).