

MODELISATION DE L'APPROCHE CARTOGRAPHIQUE DU COMPORTEMENT DES SOLS

D. KING ⁽¹⁾

RESUME

L'auteur propose d'expliciter une approche cartographique des comportements en établissant des références pédologiques à différents niveaux d'investigation. Ces références sont construites à l'aide des modèles mathématiques DIMITRI et VLADIMIR en calculant le degré de ressemblance entre horizons d'une part et entre profils d'autre part. La comparaison des références obtenues entre chacun des niveaux permet une expression spatiale des comportements. Expérimentée sur le territoire du Marais de Rochefort, la méthode aboutit à des résultats cohérents avec les études effectuées antérieurement. Elle permet une quantification de la variabilité spatiale et fournit au lecteur du document cartographique des informations sur l'incertitude des résultats dans des zones où les relations entre les critères cartographiques et les variables de comportements ne sont pas généralisables.

INTRODUCTION

L'utilisation rationnelle des sols nécessite la connaissance de leurs comportements, c'est-à-dire de leurs réactions au cours du temps à des actions extérieures. Lors d'une approche agronomique à une échelle régionale, il faut appréhender la variabilité spatiale de ces comportements. Or, l'étude d'un comportement implique la connaissance de l'état du sol au début de l'action, et le contrôle au cours du temps des paramètres de cette action (BOIFFIN, SEBILLOTE, 1982).

L'étude fine de phénomènes au cours du temps est réalisée grâce à la mise en œuvre d'un nombre nécessairement limité de suivis de mesure sur des sites localisés. La généralisation spatiale des résultats et leur expression cartographique impliqueraient une multiplication importante de ces sites.

Les pédologues et agronomes adoptent une autre solution en choisissant différents niveaux d'investigation en fonction des contraintes techniques et des objectifs scientifiques à atteindre : nous appellerons « observatoires », les sites pour lesquels on réalise l'étude des comportements au cours du temps ; nous nommerons « fosses » les sites pour lesquels une description détaillée et des analyses de laboratoire permettent de diagnostiquer différents types de comportements ; le niveau « sondages » servira à la généralisation spatiale grâce à la multiplication d'observations basées sur des caractères faciles à observer ; enfin, nous appellerons données d'« environnement », celles fournies en tout point de l'espace grâce à la télédétection ou à des études précédemment établies (topographie, géologie...).

Nous nous proposons de modéliser une approche pédologique tenant compte de la variabilité spatiale en précisant les niveaux d'investigation et en élaborant des méthodes statistiques capables d'établir des liaisons entre ces niveaux. Le sol se présente sous la forme d'un continuum avec une variabilité souvent très forte de ses constituants et de leurs états. Les relations mises en évidence au laboratoire entre constituants et comportements sont difficilement extrapolables au milieu naturel

(1) S.E.S.C.P.F. - I.N.R.A. - Ardon, 45160 Ollivet.

à cause d'un effet système impliquant de nombreuses interactions entre différents facteurs (BOULAIN, 1980). Nous proposons d'établir des références pédologiques pour chaque niveau d'investigation, en tenant compte du plus grand nombre possible de données disponibles à chacun de ces niveaux. Nous pouvons ainsi vérifier si le classement d'observations à partir de ces références est le même selon qu'on dispose soit de critères cartographiques simples, soit de variables de comportements nécessitant des mesures sophistiquées au cours du temps.

Le Marais de Rochefort (Charente Maritime) a servi de terrain expérimental pour l'élaboration de cette méthode. Les sols y sont argileux, salés ou sodiques. Leur mise en valeur actuelle par le drainage pose des problèmes de comportements en matière de perméabilité et de stabilité structurale (SALIN, 1983). La méthode proposée n'est pas spécifique de ce milieu particulièrement typé.

Dans une première partie, nous expliciterons le modèle utilisé pour l'établissement des références à chacun des niveaux d'investigation. Dans une seconde partie, nous résumerons les résultats obtenus à partir des données du Marais de Rochefort en présentant les principales références. Dans une troisième partie, nous discuterons les résultats et les choix méthodologiques initiaux. Enfin, nous poserons le problème de la généralisation spatiale et de l'expression cartographique des résultats.

I. LA MODELISATION CARTOGRAPHIQUE

La carte pédologique est une expression graphique de notre compréhension de l'organisation spatiale des sols. Une telle carte est le résultat de la synthèse d'un très grand nombre de données. Au cours de l'élaboration cartographique, nous pouvons distinguer trois « attitudes » :

1. Le recueil des données,
2. La recherche de références, sorte d'orthotypes pédologiques qui sont utilisés pour ordonner les observations autour d'un schéma explicatif de l'organisation de la couverture pédologique.
3. La généralisation spatiale et l'expression graphique des résultats.

Ces trois attitudes ne sont pas nécessairement chronologiques. Au contraire, tout cartographe pédologue modifie son schéma d'organisation spatiale et son expression cartographique au fur et à mesure du recueil des données.

A) Recueil et organisation des données pédologiques

Les données nécessaires à la compréhension de l'organisation spatiale sont de nature très variées : qualitatives et rapides à prélever pour des observations à la tarière, quantitatives pour des analyses d'échantillons au laboratoire ; elles peuvent être répétées au cours du temps pour des variables de comportements et nécessiter un appareillage complexe.

Dans notre étude du marais de Rochefort, nous avons tenu compte de la spécificité de la région par le choix de variables caractéristiques des sols de dépôts fluvio-marins argileux et halomorphes : en particulier, la structure, la présence de carbonates et de gypse, la présence d'oxyde-hydroxydes, la quantité de matière organique et surtout la composition des solutions et de la capacité d'échange (SERVANT, 1975 ; BRESLER et al., 1982). Nous pouvons classer ces différents types de variables selon l'investissement intellectuel et technique nécessaire à leur recueil ; nous distinguons ainsi différents niveaux d'investigation en fonction du nombre de sites observés, de la qualité et de la quantité de données saisies.

Dans notre étude de marais de Rochefort, nous avons distingué :

- des sites « sondages » où 19 variables ont été relevées sur chacun des 1954 sondages à la tarière,

— des sites « fosses » au nombre de 33 pour 218 variables recueillies.

Pour ces deux niveaux, nous avons utilisé le glossaire et les fiches STIPA (BERTRAND, FALIPOU, LEGROS, 1979).

— des sites « observatoires », au nombre de six qui ont fait l'objet d'analyses et d'observations répétées au cours du temps,

— il faut également mentionner les données d'environnement liées aux informations disponibles à partir des documents préexistants (carte topographique, photographies aériennes...); dans ce cas, la quantité d'information est plus difficile à dénombrer.

A chacun de ces niveaux d'investigation, nous privilégions « l'horizon » en tant qu'individu statistique de base et élément fondamental de l'organisation pédologique (BAIZE, 1986). Nous construisons ainsi un tableau de données pour chaque niveau ; nous trouvons en lignes les horizons échantillonnés et en colonnes les variables. Nous rapportons celles-ci à des variables qualitatives ordonnées de façon à homogénéiser le codage des variables, à privilégier les seuils pédologiques pertinents et à faciliter les traitements statistiques ultérieurs. Nous aboutissons ainsi à des tableaux statistiques cohérents possédant toutes les qualités nécessaires pour une analyse mathématique (BENZECRI et coll., 1980). L'organisation des horizons appartenant à un même profil n'est pas perdue dans ce tableau grâce à l'emploi d'index.

B) Traitements des données : Modèles pour l'établissement de références pédologiques (DIMITRI et VLADIMIR)

La recherche de références pédologiques caractéristiques du milieu étudié est réalisée d'une part sur les individus « horizons » à l'aide du modèle DIMITRI (GIRARD, 1983, GIRARD, 1984) et d'autre part sur les individus « profils » à l'aide du modèle VLADIMIR (KING, 1986).

Ces deux modèles sont basés sur des principes similaires :

1. Choisir des noyaux considérés comme des références représentatives.
2. Choisir une distance mathématique pour comparer chaque individu à ces références.
3. Associer chaque individu à la référence la plus proche et constituer ainsi des regroupements (nommés « classes ») autour de chaque référence (phase de classement).
4. Examiner pour chaque classe, les histogrammes des variables afin de modifier les références ou d'en constituer de nouvelles (phase de réajustement).
5. Réitérer les opérations de classement et réajustement autant de fois que l'on jugera nécessaire (avec l'aide d'indices mathématiques).

Voyons succinctement chacune de ces phases respectivement pour DIMITRI et VLADIMIR.

Avec DIMITRI, les horizons de références sont choisis au départ soit d'une façon empirique, soit à l'aide de méthodes d'analyses multidimensionnelles (par exemple, analyse factorielle des correspondances — AFC — BENZECRI et coll., 1980). La distance est au choix une distance de rang (VAN DEN DRIESSCHE R. et GARCIA-GOMEZ A., 1972) ou une distance euclidienne (normée ou non, avec possibilités d'affecter des poids aux variables) ; nous avons préféré cette seconde solution pour la rapidité du temps calcul et pour sa facilité d'interprétation en se plaçant dans un espace géométrique euclidien (DE GRUIJTER, 1977).

Pour chaque classe formée autour de chaque référence, on examine le (ou les) mode(s) et la forme des histogrammes de chaque variable. Un algorithme est proposé pour axer l'attention de l'utilisateur sur les histogrammes dont la valeur de la référence ne coïncide pas avec le mode. Après plusieurs itérations, les horizons de référence ne correspondent pratiquement jamais à des horizons réels mais ils doivent représenter au mieux la population étudiée.

Avec VLADIMIR (fig. 1), les profils de références sont initialisés soit d'une façon empirique, soit en étudiant la répartition statistique des horizons de référence DIMITRI au sein des profils étudiés (profondeur d'apparition, succession, combinaison...). La distance ou plutôt le degré de ressemblance entre deux profils est égal à la somme des distances entre horizons rencontrés à des niveaux de profondeurs fixés par le

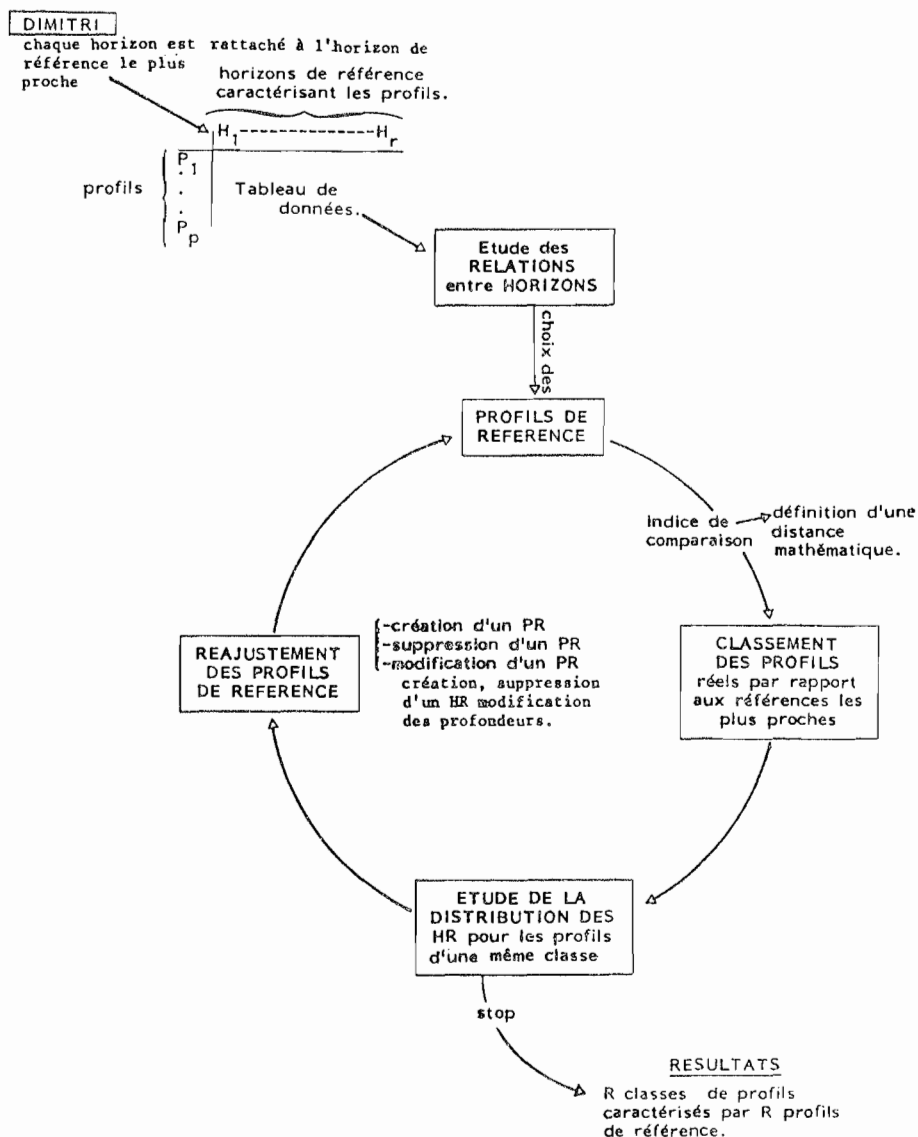


Figure 1 : Schéma simplifié des différentes étapes d'une approximation du modèle VLADIMIR.

HR : Horizon de référence.

PR : Profil de référence.

Simplified scheme of the different steps in the VLADIMIR model of approximation.

pédologue. Dans certains cas, il est plus important de tenir compte en pédologie de la présence d'un horizon diagnostic au sein d'un profil que de son apparition à une profondeur précise ; c'est pourquoi il est prévu à chaque niveau de profondeur de calculer les distances avec des horizons présents au-dessus et en-dessous de ce niveau ; on ne retient alors comme distance que la plus petite. Chaque profil étudié est rattaché à la référence la plus proche et les classes sont ainsi constituées. L'examen des classes se fait en observant l'histogramme des horizons de référence DIMITRI rencontrés à chaque niveau de profondeur : ceci permet de réajuster les profils de référence et donc de réitérer un classement.

Cette approche par approximations successives et le contrôle permanent des classes formées sont des moyens pour suivre les regroupements réalisés et ainsi mieux interpréter les résultats finaux. La démarche est cyclique et ouverte à toute introduction de données nouvelles. La rapidité des calculs (quelques minutes) permet cette interactivité.

Parmi l'ensemble des techniques de classification automatique, ces méthodes sont proches de la méthode des nuées dynamiques (DIDAY, 1971). Elles s'en distinguent par le choix des distances adaptées à la pédologie et par les possibilités d'intervention de l'utilisateur dans le choix et le réajustement des références.

C) Relation entre niveaux d'investigation

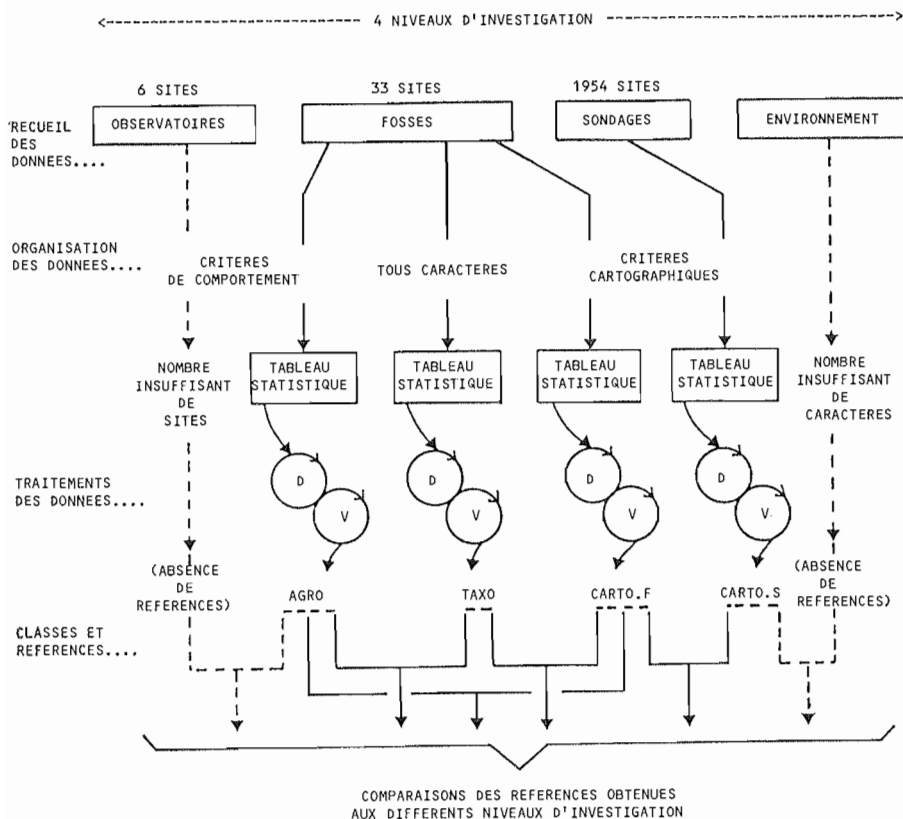
Nous pouvons appliquer les modèles DIMITRI et VLADIMR aux différents ensembles de données correspondant aux niveaux d'investigation choisis : les observatoires, les fosses, les sondages et les données de l'environnement.

A chaque fois, nous organisons les données sous forme d'un tableau statistique cohérent où les lignes représentent les individus et les colonnes représentent les variables qui caractérisent ces individus ; les tableaux statistiques des niveaux d'investigation « observatoires » et « sondages » ne possèdent pas un nombre de colonnes du même ordre de grandeur. Il est extrêmement difficile de comparer directement les résultats entre ces niveaux d'investigation très différents. A l'inverse, les fosses disposent d'un tableau statistique plus équilibré (218 horizons \times 69 variables) et constituent un moyen de comparaison entre les niveaux précédents. Elles permettent de faire des choix spécifiques de critères au sein d'un grand nombre de variables relevées, et ce, sur un nombre de sites relativement important. Nous aboutissons ainsi à différents horizons et profils de référence nommés « AGRO », « TAXO » et « CARTO. F. » (figure 2). Les références obtenues à partir des sondages sont nommées « CARTO. S. ».

D) Généralisation spatiale

Les sites « sondages » très nombreux et répartis sur l'ensemble du territoire étudié permettent une extrapolation spatiale et une expression cartographique des résultats. Il est possible d'utiliser des méthodes géostatistiques (BURGESS et WEBSTER, 1980 ; GASCUEL, 1984) en caractérisant chaque point par son degré de ressemblance à une référence choisie. On obtient une série de cartes avec des courbes d'isoressemblance pour chaque référence. On peut alors intégrer des données de l'environnement et aboutir, par un tracé manuel, à un zonage classique.

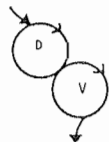
Dans tous les cas, on caractérise chaque point de l'espace par un profil et des horizons de référence dit « CARTO ». Grâce aux relations établies entre niveaux d'investigation, on peut proposer des profils et horizons de référence « TAXO » et « AGRO » et traduire ainsi la carte des sols en une carte thématique des comportements.



LEGENDE :

TABLEAU STATISTIQUE

TABLEAU STATISTIQUE SOUMIS AUX ANALYSES MULTIDIMENSIONNELLES

MODELES D I M I T R I
E T V L A D I M I R

HORIZONS ET PROFILS DE REFERENCE

AGRO - - - - Agronomique

TAXO - - - - Taxonomique

CARTO.F - - - Cartographique à partir des fosses

CARTO.S - - - Cartographique à partir des sondages

Figure 2 : Application des modèles DIMITRI et VLADIMIR aux différents niveaux d'investigations.

Ce schéma montre que les modèles sont appliqués de la même façon aux différents niveaux d'investigations. Ceci permet de comparer les horizons et profils de référence entre eux reliant ainsi l'approche agronomique et cartographique.

Application of DIMITRI and VLADIMIR models to each investigation levels. This scheme shows that the models are identically applied to different investigation levels. This allows comparison of horizons and profiles reference and linking of both agronomic and cartographic approach.

II. RESULTATS : PRESENTATION DES REFERENCES POUR LE MARAIS DE ROCHEFORT

Il serait trop long de décrire en détail les différents horizons et profils de référence obtenus à chacun des niveaux d'investigation (KING, 1986). Après une brève présentation du milieu, nous détaillerons les références « TAXO » pour le niveau d'investigation « fosses » ; les résultats obtenus aux autres niveaux seront donnés d'un façon plus générale en soulignant les apports complémentaires. Enfin, nous comparerons les différentes références pour savoir s'il est possible de passer d'un niveau d'investigation à l'autre.

A) Le contexte régional

La marais de Rochefort appartient à l'ensemble des « Marais de l'Ouest », résultat du comblement d'anciens golfes par des alluvions marines très argileuses nommées « bri ». Les caractéristiques principales des sols sont leur teneur en argile voisine de 60 %, leur salinité et leur sodicité, caractères à l'origine d'une forte instabilité du matériau (MORIZET et al., 1970 ; GARNIER, 1975).

L'utilisation traditionnelle des parcelles est essentiellement herbagère. Elles sont entourées de larges fossés remplis d'eau, réalisant une clôture naturelle, pour des animaux laissés en pâture pendant de longues périodes. La mise en valeur de ces sols par le drainage est envisagée depuis quelques années. Elle pose de nombreux problèmes d'aménagement. Nous nous sommes intéressés plus particulièrement aux comportements de la structure et à la perméabilité du sol en liaison avec la teneur en sodium (soluble et échangeable), la quantité de matière organique et la présence de carbonates (DAMOUR et al., 1984).

B) Présentation des références obtenues

1) Les références « TAXO » (figure n° 3)

La classification à l'aide du modèle DIMITRI des 218 horizons des fosses est réalisée en tenant compte de l'ensemble des variables descriptives et analytiques. Nous déterminons 15 horizons de référence parmi lesquels nous pouvons reconnaître les principaux types (d'horizons) mis en évidence dans des études antérieures sur l'ensemble des marais de l'ouest (CALLOT et FAVROT, 1965 ; VERGER, 1968 ; DUPUIS et al., 1969 ; CALLAME, 1982 ; COLLAS, 1985) : les horizons à gley, les horizons à pseudogley, les horizons à nodules calcaires et/ou à gypse, les horizons denses de subsurface, les horizons riches en matière organique en surface, les mats racinaires et les tourbes ; nous distinguons également ceux développés sur bri beige et bri gris. L'ensemble des horizons forme un nuage continu dans l'espace mathématique des variables. La détermination des références est aisée aux extrêmes de ce nuage (par exemple horizons sodiques sur bri beige, horizons tourbeux...) mais délicate pour des horizons en position médiane (horizons de subsurface à concrétions). Les horizons développés sur bri dit « intermédiaire » n'ont pu être décelés.

Les horizons de référence peuvent être ordonnés en fonction de leur évolution pédogénétique : les horizons de profondeur sont salés, sodiques et peu structurés ; par contre, en surface, les horizons sont dessalés avec une diminution ou non de la sodicité ; on note une augmentation du taux de matière organique avec une structure nette et fine. A la suite de DIMITRI, le modèle VLADIMIR aboutit à la caractérisation de 9 profils de référence. Nous remarquons une évolution pédologique de plus en plus importante de ces profils selon le degré d'éloignement de la mer. Les sols développés sur bri beige à l'Ouest du marais sont peu structurés, pauvres en matière organique, riches en sodium. Sur bri gris, la structure est de plus en plus

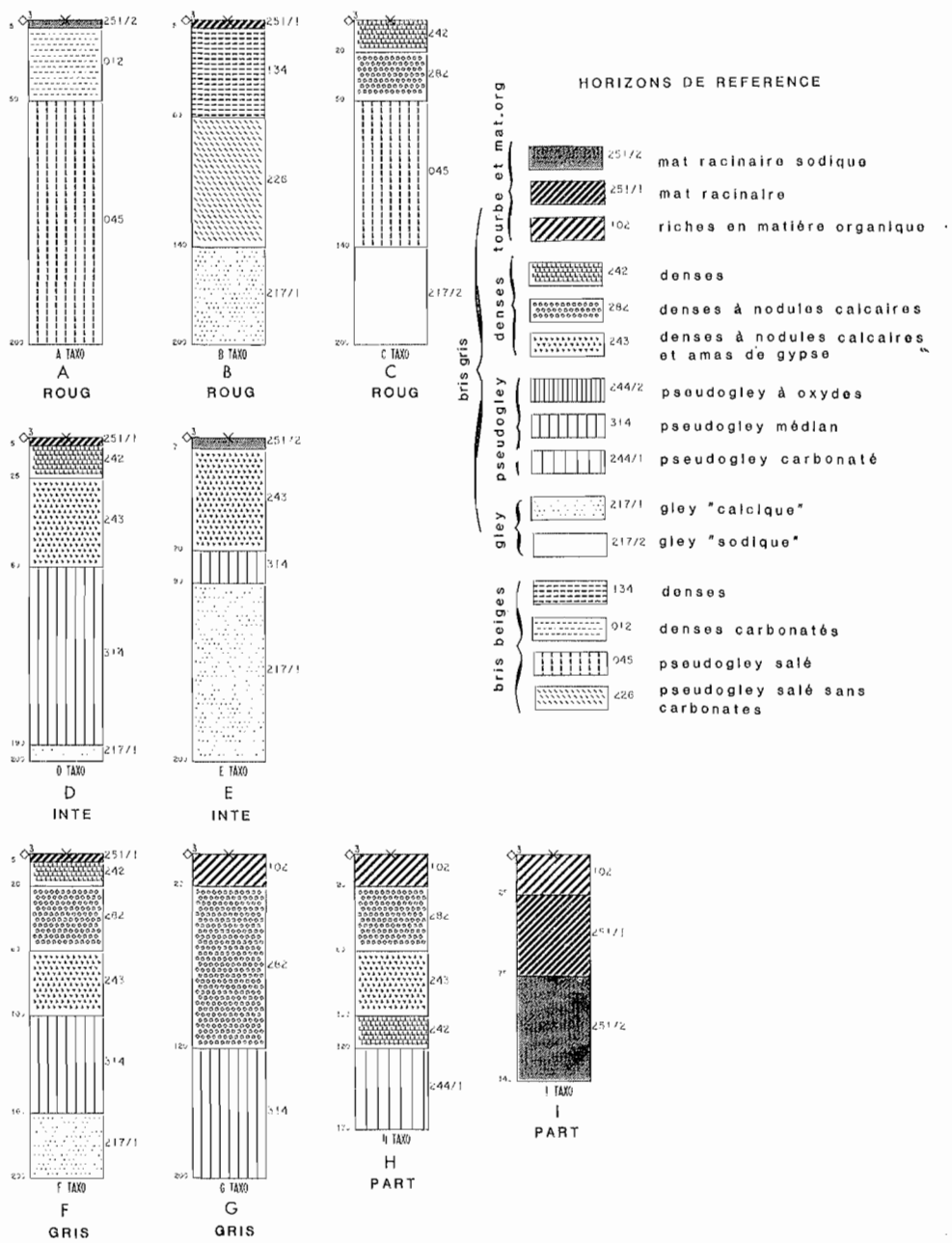


Figure 3 : Profils de référence TAXO (logiciel DOP, N. Cohen 1984).

« TAXO » reference profiles (software ROP, N. Cohen, 1984).

fine au fur et à mesure que l'on approche de la bordure Est du Marais ; la matière organique est de plus en plus abondante aboutissant à des tourbes dans les zones inondées à proximité des terres hautes calcaires.

Ces résultats sont en accord avec la bibliographie (NIJS, 1968 ; DUPUIS et al., 1969 ; SALIN, 1969 ; GARNIER, 1975). L'évolution des sols de l'Ouest vers l'Est a depuis longtemps été constatée. L'intérêt de la modélisation est de préciser ces notions grâce à la mise en place des références caractéristiques de différents stades d'évolution. De plus, cela nous permet de noter plus particulièrement les profils qui ne s'inscrivent pas dans le schéma d'ensemble, tels ces sols sur bri gris, salés dès la surface et très sodiques, situés au cœur du marais (profil E. INTE, figure n° 3).

2) Résultats pour les autres références

La présentation des résultats pour les autres niveaux d'investigation est réalisée sous la forme de tableaux et de schémas identiques à la figure 3.

A partir des fosses, nous avons sélectionné les variables observables rapidement lors de sondages à la tarière et avons appliqué les modèles DIMITRI et VLADIMIR. Nous avons mesuré la fiabilité de ces caractères en tenant compte du lieu, du prospecteur cartographique et de la date d'observation. Nous avons sélectionné les caractères les plus fidèles (9 retenus) et nous avons déterminé les références dites « CARTO. F. ».

Ces critères ont été relevés sur 1954 sondages réalisés dans le marais. L'application des modèles DIMITRI et VLADIMIR sur l'ensemble des sondages fournit 14 horizons de référence et 15 profils de référence (référence CARTO. S, figure 2). Nous obtenons plus de références à partir des sites « sondages » qu'à partir des sites « fosses ». Cela signifie que le nombre de fosses est insuffisant pour déterminer l'ensemble des types de sols du marais. En particulier, nous notons une forte variabilité du caractère « effervescence » ; celle-ci a été attribuée à des sédimentations différentes lors du comblement du golfe ayant entraîné des effets pédogénétiques secondaires différents.

En ne retenant que les variables caractéristiques des comportements étudiés, nous obtenons 8 horizons et 7 profils de référence (références AGRO, figure 2). Les horizons de référence se répartissent de la façon suivante : trois références de surface discriminées essentiellement par le taux de matière organique, deux références de moyenne profondeur discriminées par le rapport Na/T et deux références de profondeur discriminées par la salinité. Les profils de référence se distinguent essentiellement par la profondeur d'apparition de ces horizons de référence.

C) Relations entre références des différents niveaux d'investigation

A partir des 33 fosses, nous comparons les références obtenues aux trois niveaux d'investigation : « AGRO », « TAXO », et « CARTO. F » (bas de la figure 2).

Globalement, nous constatons que dans 60 % des cas, les horizons (ou les profils) sont classés de la même façon avec les approximations « AGRO », « TAXO » ou « CARTO ». La coïncidence est particulièrement vérifiée pour les individus bien typés. (Par exemple : horizons de surface riches en matière organique, profils sur bri beige proche de la mer...). Pour toutes les références, nous observons une organisation spatiale d'Ouest en Est ; les individus changeant de classes d'une approximation à l'autre sont des horizons de profondeur médiane ou des profils situés au cœur du marais ; en général, ces individus passent d'une référence à une autre très proche. Nous constatons que ces individus changent aussi aisément de classes avec des approximations effectuées sur un même niveau d'investigation.

Ces résultats sont le reflet de l'aspect continu du nuage mathématique des données. La non-coïncidence des références pour des individus dits médians est délicate dans le cas des comportements. Pour deux références AGRO mathématiquement très proches l'une de l'autre, le diagnostic agronomique peut être différent. Nous avons relevé en particulier des différences nettes pour des horizons de subsurface dont les rapports entre sodium échangeable et sodium soluble changent d'un profil à l'autre et influencent la stabilité des sols. Pour ce type d'horizons, nous n'avons pu mettre en évidence de critères cartographiques capables de différencier les références AGRO, mais nous avons pu repérer les individus en cause pour une éventuelle poursuite de l'étude.

III. DISCUSSIONS

La modélisation cartographique réalisée sur le territoire du Marais de Rochefort nous permet de tirer des enseignements sur une approche globale du milieu naturel à différents niveaux d'investigation. Nous discutons les résultats en nous plaçant tour à tour du point de vue du statisticien, puis de l'agropédologue et enfin du cartographe.

A) Conséquences méthodologiques : problème des choix initiaux

Le sol se présente sous la forme d'un continuum très vaste et variable. L'approche cartographique de caractères de comportements nécessite d'effectuer un échantillonnage de sites localisés. Ceux-ci représentent une proportion infime de la surface étudiée. **Le choix de ces sites est donc essentiel. Il en est de même avec les variables** retenues pour caractériser ces sites ; le choix de ces variables dépend de nos objectifs scientifiques ; il est difficile d'être totalement exhaustif et l'omission d'un caractère peut influencer sur les résultats finaux.

Devant ce problème, le pédologue effectue plusieurs relevés en faisant varier le nombre de sites et de variables. Nous avons cherché à expliciter cette approche en distinguant différents niveaux d'investigation : sondages à la tarière, fosses, observatoires, description de l'environnement. Ceci nous permet de justifier les choix des sites et des caractères à chacun des niveaux. Le codage des variables d'une façon homogène et la constitution de tableaux statistiques comparables sont des moyens pour établir des relations entre les différents niveaux. Nous avons reconnu au cours de cette approche l'importance des fosses pédologiques pour pouvoir comparer des données extrêmement différentes provenant des sondages et des observatoires.

Au cours de la modélisation, les choix pédologiques restent essentiels. En particulier, il est possible de faire tendre à chaque approximation les références vers des positions extrêmes (approche centrifuge fournissant des références très typées mais peu représentatives) ou vers des positions médianes (approche centripète fournissant des références représentatives mais peu distinctes les unes des autres).

Quels que soient les choix des sites, des variables, du codage et des références à chacun des niveaux d'investigation, **l'essentiel est de noter la convergence des résultats entre les niveaux**. Si celle-ci ne se produit pas, cela signifie que les choix initiaux (en nombre de sites ou de variables) sont insuffisants pour la compréhension du milieu.

B) Conséquences agrépédologiques : fiabilité des résultats

« Convergence des résultats » ne veut pas dire « coïncidence ». Nous constatons qu'environ 2/3 des individus caractérisés ne changent pas de types de références. Pour 1/3, il est donc impossible d'émettre un diagnostic.

L'approche mathématique permet de repérer les divergences entre les niveaux d'investigation. Elles sont dues à des situations intermédiaires pour lesquelles les références n'apparaissent pas nettement (cas par exemple des horizons de pseudogley sur bri gris). Les divergences sont dues également à la non vérification de l'hypothèse initiale basée sur une liaison générale entre les différents caractères du sol ; c'est le cas de la quantité de sodium échangeable et du taux de carbonates qui impliquent certainement des différences de comportements mais qui semblent indépendants des autres caractères du sol.

L'intérêt d'un travail statistique est de pouvoir quantifier la non-coïncidence des résultats. La comparaison entre les références CARTO et TAXO nous fournit les individus pour lesquels les références TAXO sont insuffisantes et ainsi les zones où il existe une forte variabilité spatiale des caractères. La comparaison entre les références TAXO et AGRO (ainsi que CARTO et AGRO) indique les zones pour lesquelles les variables visuelles ou des analyses simples sont insuffisantes pour exprimer des comportements. Enfin, nous disposons de la moyenne des distances intra-classes ; ainsi, pour chaque site, nous avons la possibilité de synthétiser l'information sous la forme d'un rattachement à une référence, mais nous conservons « l'erreur » commise en effectuant une telle opération. Cette méthode est un moyen pour mesurer les limites de notre raisonnement mettant en garde celui qui utilisera les résultats à des fins d'aménagement ou d'exploitation agricole. Ainsi, **la méthode met en évidence d'une façon explicite les zones pour lesquelles un complément de travail est nécessaire**, soit en multipliant le nombre de sondages (cas de forte variabilité spatiale), soit en créant de nouveaux observatoires pour mieux comprendre les relations existant entre les différents caractères du sol (cas de variables apparemment indépendantes).

C) Conséquences cartographiques : la généralisation spatiale

A chacun des niveaux d'investigation, il est possible de chercher les relations entre les références obtenues et des critères d'environnement afin d'extrapoler les résultats. Les sondages à la tarière constituent une prospection systématique et indispensable du territoire. C'est essentiellement à ce niveau que le tracé précis des limites est réalisé. Grâce aux matrices de comparaison entre les références CARTO, TAXO et AGRO, **il est possible de passer d'un niveau à l'autre et d'éditer différents types de cartes.**

Les critères d'environnement sont très peu marqués dans le paysage des marais de l'Ouest et nous avons cherché le plus souvent à tracer une limite interpolée entre les points d'observations. Ceci est réalisé à l'aide de courbes d'isoressemblance par rapport à une référence. Pour chaque référence, un document cartographique peut être élaboré (figure n° 4). Le grand nombre de cartes (autant que de références) interdit toute synthèse mais une telle méthode fournit des documents de travail qui sont comparés aux critères d'environnement pour la compréhension de l'organisation spatiale des sols (LEGROS et BONNERIC, 1979).

La modélisation utilisée permet de conserver l'ensemble de l'information aux différents niveaux d'investigation. Chaque horizon ou profil réel est plus ou moins « ressemblant » à la référence à laquelle il est rattaché ; c'est une première source « d'erreur » que l'on peut visualiser cartographiquement. Enfin, les relations entre références aux différents niveaux d'investigation n'est pas univoque et nous pouvons également visualiser cartographiquement le degré de coïncidence entre ces différentes références.

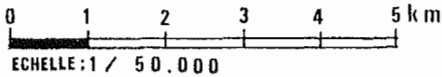
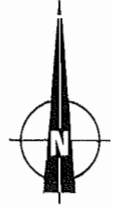
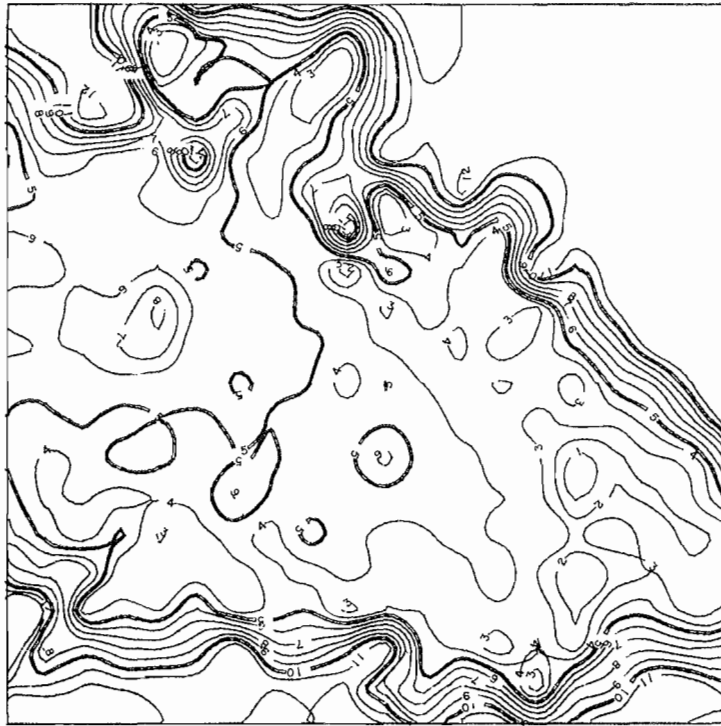


Figure 4 : Carte d'isodistance des sondages au profil de référence G1-GRIS (Extrait du Marais de Muron. Les valeurs représentées sur les courbes sont des distances mathématiques). Bibliothèque informatique cartographique CARTOLAB (MALLET, 1976).

Isodistance contours map from boring holes to the reference profile « G1-GRIS ». (Extract of the map « Muron Marsh ». The values plotted on the curves are mathematical distances. Software CARTOLAB, MALLET, 1976).

CONCLUSION

Les études de comportements ne seront jamais totalement achevées. Les comportements dépendent d'actions extérieures et celles-ci peuvent être très différentes en fonction des évolutions technologiques des matériels agricoles (sans oublier la variabilité climatique observée d'une année sur l'autre pouvant jouer sur des différences de fonctionnement). **Vouloir envisager une cartographie directe des comportements est techniquement impossible à moyenne échelle.** Cela nécessiterait une étude exhaustive des comportements sur les différents types de sols de la région prospectée. L'approche cartographique nécessite un choix d'observations forcément limité au sein d'un ensemble continu et vaste. L'objectif est d'extraire au sein de cette multitude d'informations, les traits essentiels pour mieux **comprendre l'organisation générale de la couverture pédologique.**

La modélisation d'une telle approche permet d'expliciter clairement les différents choix nécessaires à l'élaboration cartographique. Nous avons volontairement séparé les traitements pour chaque niveau d'investigation (environnement, sondages, fosses, observatoires). Chacun de ces niveaux permet une approche spécifique : variabilité spatiale à l'aide des sondages, connaissances fines des comportements avec les observatoires... Nous pouvons ainsi dégager des références typiques de la région étudiée sur lesquelles nous pouvons « caler » nos raisonnements futurs. Grâce aux méthodes statistiques et informatiques, ces références sont codifiées de façon identique ; de ce fait, des comparaisons inter-niveaux sont possibles permettant en particulier, de prévoir le type de comportement le plus proche pour chaque référence cartographique.

Les résultats concernant l'étude expérimentale du « Marais de Rochefort » sont cohérents avec ce que l'on sait de cette région depuis de nombreuses années. L'intérêt de la modélisation est de quantifier les résultats et de montrer la cohérence existant entre les résultats obtenus aux différents niveaux d'investigation. Nous avons déterminé des références soit à l'aide de critères cartographiques, soit avec des caractères pédologiques généraux, soit enfin avec des critères agronomiques relatifs aux comportements du sol. Nous avons constaté que les références coïncident dans 2/3 des cas. Les divergences reconnues mettent l'accent sur les zones dont il faudra poursuivre l'étude (en particulier les zones centrales du marais) ; **dans le cadre d'une thématique agronomique, il est essentiel de produire un résultat mais également une fourchette d'incertitude** liée à la variabilité spatiale des sols ou à la non-coïncidence entre les références cartographiques et les références des comportements. Nous exprimons cartographiquement ces zones pour lesquelles il existe de telles difficultés de liaison entre des références cartographiques et des références concernant des comportements.

Cette expression des résultats laisse une large part d'interprétation au lecteur de la carte. Il lui faut décrypter plusieurs cartes et analyser l'étendue spatiale d'un résultat en fonction de ses propres connaissances. L'incertitude calculée et exprimée cartographiquement le met en garde sur la notion d'échelle. En effet, il y a plusieurs façons de lire une carte. Avec une « **lecture globale** », on peut se contenter d'une connaissance générale du zonage, en tenant compte de l'importance des pourcentages de surface de chaque zone. Dans ce cas, les références étudiées au niveau d'investigation « observatoires » suffisent à reconnaître les principaux types de comportement correspondant aux grands domaines étudiés. Dans le futur, on sait qu'il suffira d'étudier ces observatoires pour aborder de nouveaux comportements. Par contre, on peut effectuer une « **lecture ponctuelle** » en localisant un site précis. La carte indique alors la référence « observatoire » la plus proche du type de sol en ce lieu. Cela ne signifie pas que l'on connaisse immédiatement son comportement mais que toutes choses égales par ailleurs, on a de fortes chances de rester dans une gamme de comportements proches. Dans certains cas, l'expression de l'incertitude des résultats signale au lecteur qu'il lui faut effectuer une étude locale plus fine avant d'émettre un diagnostic. Dans tous les cas, nous soulignons que la carte en tant qu'expression graphique, ne représente qu'une partie de l'information et qu'il faut inciter le lecteur à poursuivre son investigation soit en détaillant les notices et les ouvrages publiés, soit en réalisant d'autres études au champ et au laboratoire.

Reçu pour publication : Février 1987

Accepté pour publication : Mai 1987

MODELING A CARTOGRAPHIC APPROACH FOR SOILS BEHAVIOURS

The author proposes to explain a cartographic approach of soils behaviours establishing pedologic references at different levels of survey (augers, profiles and observatories). These references are set up with the aid of mathematic models called DIMITRI and VLADIMIR (fig. 1 and 2), by computing the degree of similarity between

horizons on the one hand, and profiles on the other hand. The matching of references coming from each level allows a spatial representation of behaviour (fig. 4).

The method is tested on the area of « Rochefort Marsh ». Results are coherent with previous studies. It gives a spatial variability quantification. It also provides the map user with result uncertainty information, specially within areas where there are no general connections between characters retained for soil-mapping and behaviour variates.

BIBLIOGRAPHIE

- BAIZE D., 1986. — Couvertures pédologiques, cartographie et taxonomie. Bull. AFES, vol. 24, n° 3, 227-243.
- BENZECRI J.-P. et coll., 1980. — L'analyse des données. Tome I : La Taxonomie. Paris, Dunod, 625 p.
- BENZECRI J.-P. et coll., 1980. — L'analyse des données. Tome II : L'analyse des correspondances. Paris, Dunod, 632 p.
- BERTRAND R., FALIPOU P., LEGROS J.-P., 1979. — Notice pour l'entrée des descriptions et analyses de sols en banque de données STIPA. INRA-IRAT, 119 p.
- BOIFFIN J., SEBILLOTTE M., 1982. — Fertilité, potentialité, aptitudes culturales. Signification actuelle pour l'agronome. BTI, Ministère de l'Agriculture (370-372), 345-353.
- BOULAIN J., 1980. — Pédologie appliquée. Collection Sciences Agronomiques, Masson, Paris, 220 p.
- BRESLER E., Mc NEAL B., CARTER D., 1982. — Saline and sodic soils. Principles dynamics, modeling. Advanced Series in Agricultural Sciences. Springer-Verlag, Berlin, n° 10, 236 p.
- BURGESS T.M., WEBSTER R., 1980. — Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. 1-The semi-variogram and punctual kriging. J. Soil Sci (31), 315-331.
- BURGESS T.M., WEBSTER R., 1980. — Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. 2-Block kriging. J. Soil Sci. 31, 333-341.
- CALLAME B., 1982. — Les sols salés du Marais Poitevin. Evolution des profils salins dans le bri récent et dans le bri ancien : une chronoséquence de sols jeunes. Bull. Cent. Etud. Rech. Sci., Biarritz 14 (1), 115-130.
- CALLOT G., FAVROT J.C., 1965. — Etude pédologique des marais du Médoc. Documents SES Montpellier, NRA n° 34, 117 p.
- COHEN N., 1984. — Dessins automatiques de profils pédologiques en deux et trois dimensions (logiciel DOP), photocopié, 25 p.
- COLLAS P., 1985. — Le drainage des sols lourds plus ou moins sodiques des marais de l'Ouest de la France. Institut National Polytechnique, Toulouse. Thèse (Docteur-Ingénieur), 217 p.
- DAMOUR L., CAMUS P., LAFON F., 1984. — Régime de drainage dans les sols argileux salés et sodiques des marais de l'Ouest. In : AFES. Fonctionnement hydrique et comportement des sols. Colloque Dijon, 1984/05/22-25, 283-293.
- DE GRUIJTER J.J., 1977. — Numerical classification of soils and its application in survey. Agric. Research report 855, Soil Survey. paper n° 12. Pudoc, Wageningen, 117 p.
- DIDAY E., 1972. — Nouvelle méthodes et nouveaux concepts en classification automatique et reconnaissance des formes, thèse de doctorat d'état. Université de Paris VI.
- DUPUIS J., NIJS R., SALIN R., FOURNIER B., 1969. — Etude pédologique du Marais Poitevin. Faculté des Sciences, Poitiers, Laboratoire de Pédologie, Tome 1, 208 p.
- GARNIER J.-P., 1975. — Contribution à l'étude de la pédogenèse récente des sols sur argile a scrobiculaires du Marais Poitevin. Univ. Poitiers. Thèse (3^e cycle).

- GASCUEL C., 1984. — Application de la géostatistique à l'étude de la variabilité spatiale des propriétés hydriques du sol. ENSA, Rennes. Thèse (Docteur-Ingénieur), 235 p.
- 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). Revue Sols, n° 12, 430 p.
- GIRARD M.C., 1984. — Une aide à la cartographie automatique. Le modèle DIMITRI. In : Royer J.J. (Ed.). Computers in earth sciences for natural resources characterization. Colloque international, Nancy, 1984, 04-09-13. Royer J.-J., 295-308.
- KING D., 1986. — Modélisation cartographique du comportement des sols basée sur l'étude de la mise en valeur du « Marais de Rochefort ». Thèse (Docteur Ingénieur) INAPG, 243 p.
- LEGROS J.-P., BONNERIC P., 1979. — Modélisation informatique de la répartition des sols dans le parc régional du Pilat, Ann. Univ. Savoie, 4, 63-68.
- MALLET J.-L., 1976. — Programmes de cartographie automatique. Bibliothèque CARTO-LAB. Sciences de la Terre, Série Inf. Geol. 7, 202 p.
- MORIZET J., DEJOU J., GUYOT J., 1970. — Principales caractéristiques physico-chimiques des sols de types vertique et sodique dans le marais rochefortais à Saint-Laurent de la Pré (Charente-Maritime). Bull. AFES, Sciences du Sol, 5, 11-24.
- NIJS R., 1968. — Contribution à l'étude des sols du Marais Poitevin. Univ. Poitiers. (3^e cycle), 208 p.
- SALIN R., 1969. — Contribution à l'étude du climat et de l'économie en eau dans les sols du Marais Poitevin. Univ. Poitiers. Thèse (3^e cycle), 151 p.
- SALIN R., 1983. — Etude pédologique dans le marais de Rochefort. INRA, Paris, 200 p., Cartes 1/25 000^e
- SERVANT J., 1975. — Contribution à l'étude pédologique des terrains halomorphes. L'exemple des sols salés du Sud-Ouest de la France. Thèse de Doctorat d'Etat, 194 p.
- VAN DEN DRIESSCHE R., GARCIA-GOMEZ A., 1972. — Distances non paramétriques entre profils. Rev. Ecol. Biol. Sol. 9 (4), 617-628.
- VERGER F., 1968. — Marais de Wadden du littoral français. Etude de géomorphologie. Biscaye, Bordeaux, 544 p.

