

Analyse de la distribution des sols en fonction de l'orientation de la pente : application à un secteur du Vexin français*

Michel ISAMBERT (1)
Hocine BOURENNANE (1)
Alain COUTURIER (1)
Dominique KING (1)
Marcel JAMAGNE (1)

Analysis of soil distribution according to slope orientation in the 'Vexin français' region France

Géologie de la France, n°4, 1997, pp. 55-67, 13 fig., 1 tabl.

Mots-clés : Orientation, Versant, Modèle de distribution spatiale, Sol, Loess, Modèle numérique de terrain, Système d'information géographique, Vent, Bassin parisien, Val d'Oise, Vexin.

Key words: Orientation, Slope, Spatial distribution model, Soil, Digital terrain model, Geographic information system, Wind, Paris Basin, Val d'Oise, Vexin, France.

Résumé

Constatée par de nombreux auteurs, l'influence de l'orientation de la pente sur la distribution des sols et des matériaux qui les composent est ici analysée dans le Vexin français sur deux couples d'unités cartographiques de sols, à différents niveaux de perception (métrique à kilométrique). La généralisation à une carte représentant le quart d'une coupure IGN à 1/50 000 souligne l'intérêt du Modèle d'Organisation Spatiale des Sols obtenu. Une interprétation est proposée, s'appuyant sur les données climatiques actuelles (orientation, vitesses et énergies des vents du secteur) appliquées aux sols nus. La tectonique joue aussi un rôle mais plutôt indirect, par le biais du relief qu'elle règle.

Abridged English version

Many authors have evoked the major influence that slope orientation has on soil type and distribution. For example, very thin soils develop in sedimentary rock residuum on southwest-facing

slopes, whereas thick soils develop in loess deposits on northeast-facing slopes (Fig. 1). Soils are thus closely related to the underlying geological materials.

The present study, which aims to quantify the relationship between soil distribution and geomorphology, was carried out in the part of the Paris Basin known as the 'Vexin français' region, to the northwest of Paris near Pontoise.

Methodology

The standard Digital Terrain Model (DTM) enables the development of a rigorous statistical methodology applicable to large areas that consists in comparing soil data with topographic data (Fig. 2). Two types of data stored in two databases were used:

1. point data from boreholes with the results of sample analysis stored in the semantical DataBase (DB)

2. polygon data representing the soil Cartographic Units (CU), stored in the graphical DB of a Geographic Information System (GIS).

The topographic data, from the standard DTM provided by the Institut Géographique National (IGN), were computed from the topographic map. This DTM has a pixel size representing 50 x 50 m.

Results

The phenomena studied range in scale from a few metres to several kilometres. A rule governing soil spatial organisation was established, after acquiring a global perspective of the whole region. Figure 6a, in which 18 boreholes are plotted in 18 pixels of CU 76 (calcic brown soils developed in hard limestone), reveals that only one borehole falls outside the N140° to N320° field; Figure 6b shows the same phenomenon with all the 976 pixels of CU 76. Samples are more commonly located along slope orientations near the N140°-N320°-trending line (Fig. 6a). The pixels of CU 76 are shown as percentages of the total pixel population for each direction (Fig. 6c); N300° seems to be predominant.

* Manuscrit reçu le 4 septembre 1996, accepté définitivement le 6 novembre 1997.

Communication orale lors du Colloque « Formations superficielles et géomorphologie ». Rouen 19-21 mars 1996.

(1) INRA - Orléans, Unité de Science du Sol - Carte Pédologique de France, Ardon, 45160 Olivet (France).

Correspondance : isambert@orleans.inra.fr.

CU 45 (orthic luvisol in loess) covers a very large area (13871 pixels). The 99 auger boreholes (Fig. 7a) proved sufficient to characterise this soil unit. In contrast to Figure 6a, most of the 99 auger boreholes fall to the northeast of the N140°-N320°-trending line, representing an oversampling along the N320° and N120°-N140° directions. The pixel distribution ranges between N0° and N80° (Fig. 7b) and the relative importance of the N0° direction is revealed by the percentage of the total pixels (Fig. 7c). The results, obtained on low-angle slopes (average 2 to 3%), are comparable to those of Bourennane (1992, 1997) for the Beauce region to the south of Paris.

CU 10 and CU 17 show a similar soil-distribution trend, also corresponding to slopes facing opposite directions, but steeper (averaging respectively 11 and 9%). CU 10 consists of podzolic sandy soils in Stampian sands and CU 17 of sandy loam soils contaminated by loess on the same Stampian sands. CU 10 soils, represented by 1512 pixels, occur on southwest-facing slopes plotting within the N120° to N300° field, whereas CU 17 soils, represented by 1417 pixels, occur on northeast-facing slopes plotting within the N300° to N120° (particularly N0° to N80°) field (Fig. 8).

The rules of soil distribution were then tested using a few CU pairs, the results of which are generalised for the whole map (Pontoise 1-2) using all the 591 auger boreholes (Fig. 9); three soil sets are identified:

- soils in loam formations (L): 17% of the auger boreholes,
- soils in other sediments (S): 60% of the auger boreholes,
- soils in heterogeneous formations, reworked on the slopes (P): 23% of the auger boreholes.

A total of 82% of the loamy soils (L) are located to the northeast of a N315°-N135°-trending line, and 79% of the soils developed in other sediments (S) are located to the southwest of the same line. The P soils show a regular distribution in all directions.

These results show excellent precision for use in soil mapping and illustrate the

spatial organisation of soils in the Vexin français region.

Interpretation and discussion

Soil distribution patterns are necessarily related to depositional processes and pedogenetic evolution; two main factors seem to influence soil distribution, namely wind and topography.

The wind effect

Many Quaternary specialists believe that the loess of the Vexin plateau is eolian and derived from the north or northwest (the Channel was above sea level during the Weichselian). After the last glacial event, the dominant winds may also have changed to westerly. The results of the soil distribution model were then compared with present dominant wind directions (Fig. 10). During the autumn, the mean direction (N240°) of strong to medium (>5 m/s) winds is opposite to that of the loamy soils distribution (N60°), whereas the mean direction of low-velocity winds (<4 m/s) is perpendicular. In summer, however, mean wind frequency is the highest (N300°), with marked N320° low-velocity winds.

Wind efficiency has an effect on transport capacity: loess particles are detached from the slopes facing the dominant wind direction and deposited on the leeward slopes. Wind efficiency can be evaluated by its kinetic energy (Ec). The Ec of medium- and high-velocity (>5 m/s) winds is presented on Figure 11 and is seen to be most efficient on bare soils during summer, autumn and winter. Ec is maximum in the N40° to N120° field, which is slightly different from the maximum distribution of silty soil (Fig. 9) in the N0° to N90° field. Lower velocity (<4 m/s) winds, from N170° in autumn and winter and N320° in summer, are very efficient for carrying small particles such as loess, thus extending the range of efficient wind energy to match the pattern of silty soil distribution. In winter, daily freeze-thaw alternations probably also influenced, and perhaps still do, the differential erosion of south-southeast- to northwest-facing slopes; such alternations do not occur on north-northwest- to south-east-facing slopes.

The topographic effect

Tectonics can play a major role in shaping landforms and, indirectly, can

influence the distribution of many soils and superficial deposits. Although the sedimentary layers in the Vexin region dip shallowly to the northeast or southwest and in the Beauce region they are horizontal, the same Soil Organisation Model (SOM) pattern is observed. This is also the case for the Yonne department (where the sedimentary layers dip perpendicularly to those of the Vexin region) and in the west of the Paris Basin (accentuated by an eastern to northeastern dip).

The SOM has also enabled a better knowledge of the tectonic features along the Vigny anticline, many of which are not recorded on the 1:50,000-scale geological map.

Conclusion

The presented Soil Organisation Model is shown to be applicable to the 'Vexin français' region and can probably be extended to a larger area of the Paris Basin. It is thus proposed to use it for predicting soil type and superficial deposit distribution, and inasmuch could provide a convenient tool for soil and geological surveys. It can be used to focus on areas of uncertainty (Fig. 13) where the soil type is not known. These areas are of limited extent and correspond to slope orientations probably related to major tectonic features.

Introduction

A l'échelle du bassin de Paris, on constate fréquemment que les sols se répartissent selon l'orientation des pentes. Sur pentes orientées au sud-ouest, on observe des sols peu épais développés directement dans une roche-mère sédimentaire peu remaniée. A l'inverse, sur pentes orientées au nord-est, les sols sont épais et développés dans des formations limoneuses. De nombreux auteurs géologues, géomorphologues, géographes et pédologues ont décrit ce type de distribution des matériaux intervenant dans les sols, soit comme horizons pédologiques, soit comme roche-mère ou substrat du sol (Jamagne, 1973 ; Dewolf, 1977 ; Macaire, 1981 ; Isambert, 1984 ; Baize, 1988 ; Campy et Macaire, 1989). Le sol peut ainsi être le révélateur des matériaux sous-jacents. Une analyse détaillée de sa distribution spatiale et de certains éléments de la morphologie du terrain permet alors d'élaborer des méthodes de

prédiction de la présence de formations superficielles.

L'objectif de ce travail est de proposer une quantification de cette relation entre la distribution des sols et la morphologie du terrain. La disponibilité de Modèles Numériques de Terrain (MNT) standards permet désormais de développer des méthodes statistiques rigoureuses sur de grandes surfaces. Les résultats attendus sont d'une part le développement de modèles de prédiction des formations superficielles et d'autre part une discussion sur les facteurs à l'origine de cette distribution. En particulier, nous examinerons la relation entre la distribution

spatiale des sols et les directions dominantes des vents actuels.

Méthodologie

La méthodologie concerne les deux types de données à traiter et à comparer : les données sur les sols et celles sur la forme du terrain.

Données pédologiques

Le secteur d'étude choisi couvre les 13 200 ha environ de la feuille Pontoise 1-2 à 1/25 000. La carte des sols a été dressée dans le cadre de la carte pédolo-

gique à 1/100 000 de Versailles. Elle a été réalisée (fig. 1) à l'aide de données ponctuelles, sondages à la tarière (600 environ) et profils pédologiques (15). De concert, une analyse en continu du paysage et de la surface du sol a été pratiquée grâce à l'utilisation systématique en stéréoscopie de photographies aériennes d'hiver. La mission utilisée (IGN 68 2113-2213 / 250 à 1/25 000) présente un maximum de sols nus et un remarquable ressuyage différentiel de la surface des sols. L'alternance d'observations de terrain et de photo-interprétation (fig. 1) a conduit à caler de façon récurrente les limites des unités cartographiques.

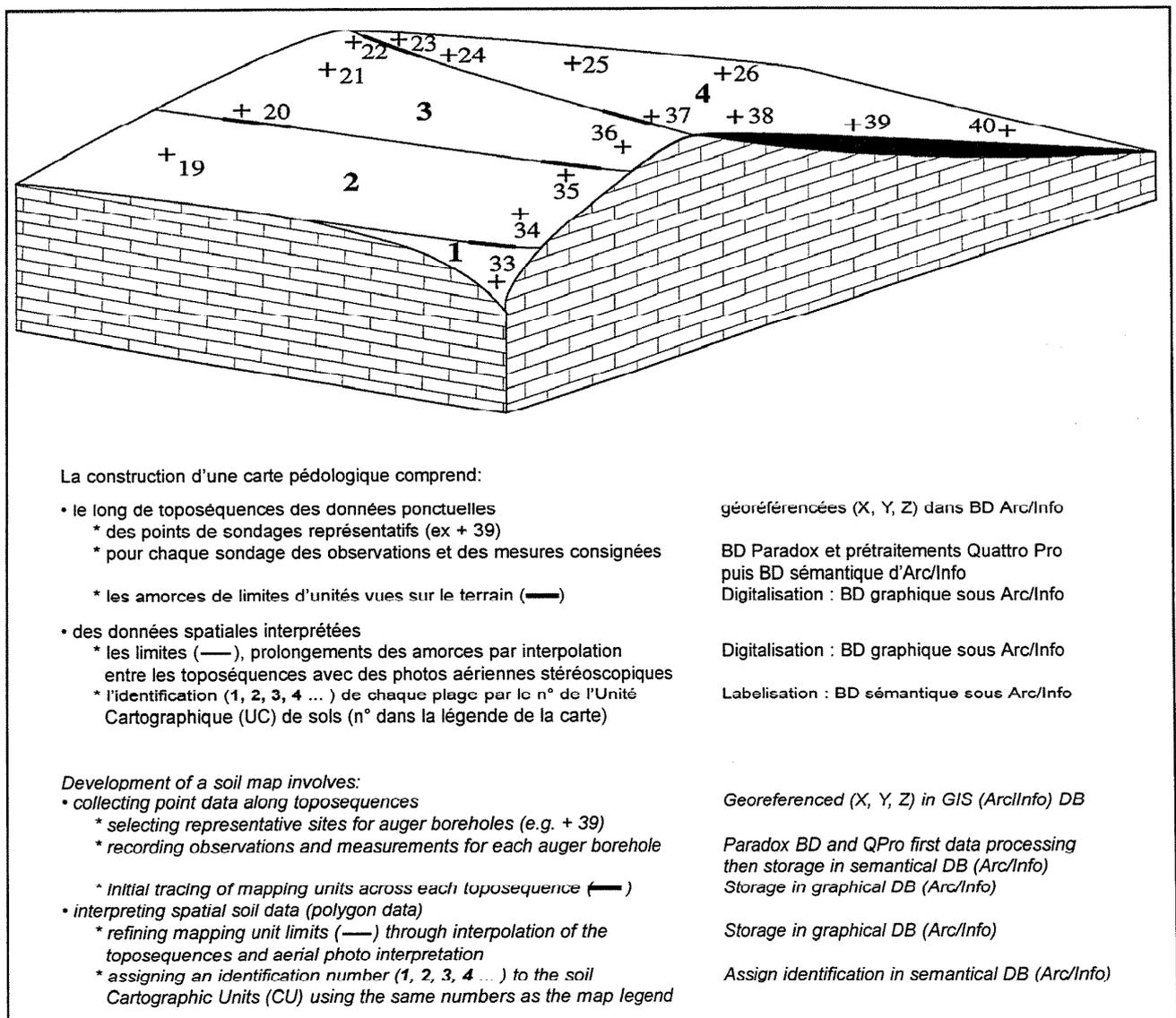


Fig. 1.- Les données pédologiques.

Fig. 1.- Soil Data.

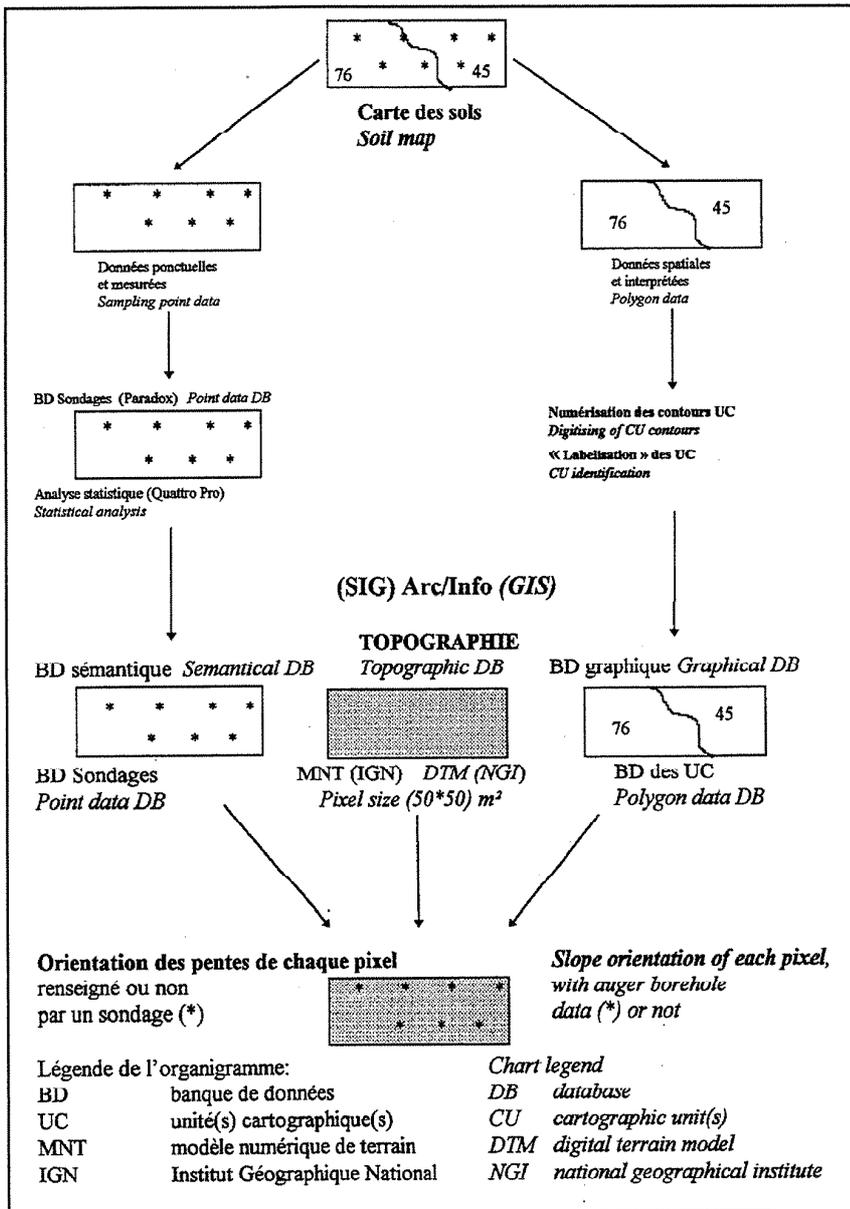


Fig. 2.- Informatisation des données.

Fig. 2.- Data computing.

Les données des sondages à la tarière ont été géoréférencées à l'aide du Système d'Information Géographique (SIG) Arc/Info et leur description a été incluse dans une base de données Paradox adaptée. De la même façon, la minute de terrain a été digitalisée, chaque unité cartographique étant renseignée par le nom de sol dominant reconnu. Nous disposons ainsi de deux types d'information (fig. 2) :

- des données mesurées et ponctuelles d'une part,
- et des données interprétées et spatiales de l'autre.

Les premières correspondent aux strictes données de base. Les secondes englobent l'ensemble des informations utilisées pour l'élaboration de la carte, en particulier, les photographies aériennes, mais également des observations directes sur le terrain, comme les états de surface du sol, le type et l'aspect de la végétation à la date de réalisation des sondages...

Dans cet article, nous nous intéressons spécialement (pour simplifier) à la limite qui marque la crête et aux deux unités de sols qui l'encadrent sur les versants opposés.

Données morphologiques du terrain

Un MNT de maille 50 m (source : base de données altimétriques de l'IGN) a été acquis sur l'ensemble de la feuille Pontoise 1-2. Pour chaque pixel, l'inclinaison et l'orientation de la pente ont été calculées, à partir des pixels environnants (module GRID d'Arc/Info). Nous obtenons ainsi une grille des orientations de la pente et une grille des inclinaisons de la pente sur l'ensemble du secteur.

Elaboration de données statistiques

A l'aide du SIG, il est aisé de croiser les grilles de pentes avec la couverture des points géoréférencés correspondant aux sondages à la tarière. Chaque sondage est ainsi renseigné automatiquement sur les caractéristiques de la pente locale au point d'observation. Les données sont transférées sous un tableur (Quattro pro) où l'analyse statistique est réalisée (fig. 2). De façon similaire, les grilles de pentes sont croisées avec la minute de terrain digitalisée. Dans ce cas, on transfère le numéro d'unité cartographique vers les grilles, afin de poursuivre l'analyse statistique sur l'ensemble des pixels de la carte.

In fine, nous disposons de deux types de fichiers (fig. 3) : le premier contient les 591 sondages à la tarière, renseignés par leur description pédologique ; le second contient près de 53 000 pixels, chacun renseigné par un numéro d'unité cartographique de sol et par les caractéristiques (l'orientation, ici) de pente issues du MNT. Enfin, chaque sondage est rattaché à l'unité cartographique auquel il appartient.

L'orientation de la pente est une variable circulaire, avec laquelle il est assez difficile de travailler statistiquement (Mardia, 1972 ; Batschelet, 1981 ; Upton et Fingleton, 1989 ; Bruant, 1994 ; Mathey, 1996). Aussi, pour faire l'analyse de la distribution des orientations de pente, avons-nous opté pour une simple représentation visuelle à l'aide d'un diagramme circulaire tel celui de la figure 3. Le graphique obtenu, à titre d'exemple pour la distribution des planosols sablo-limoneux développés dans l'Auvervien, montre clairement une dominance de ces sols dans la gamme des orientations allant de 140°N à 320° N.

COUPLAGE ORIENTATION DE LA PENTE ET TYPE DE SOLS
à l'échelle des Sondages et à l'échelle des Unités Carto

N° Sondage	Type sols	Orientation °
1	Podzol Sable	277
2	Brun LS	86
3		
187	BC KA	245
188	BL LL	72
581	JC VE	130
ECHANTILLONNAGE		
591 sondages		

N° Pixel	N° Plage	Position	Unité Carto	Type sols	Orientation °
17	62	1=interne	10	Podzol Sable	277
18	62	2=limite	10	Podzol Sable	230
22	62	2	10	Podzol Sable	265
25	62	1	10	Podzol Sable	312
26	62	2	10	Podzol Sable	200
736	79	1	10	Podzol Sable	245
18660	872	1	10	Podzol Sable	266
19200	872	2	10	Podzol Sable	260
37500	903	2	10	Podzol Sable	299
780	83	1	17	Brun LS	86
1241	157	1	17	Brun LS	77
1254	157	1	17	Brun LS	35
1904	209	1	76	BC KA	230
3672	300	2	76	BC KA	175
12202	657	1	76	BC KA	287
12203	657	1	76	BC KA	245
17892	821	1	45	BL LL	72
17893	821	1	45	BL LL	67
17894	821	1	45	BL LL	83
17895	821	2	45	BL LL	75
49854	2231	2	167	JC VE	130

CARTE ENTIERE
12 600 Ha
50 000 pixels

LEGENDE

BC sol Brun Calcaïque
BL sol Brun Lessivé
JC sol Jeune Colluvial

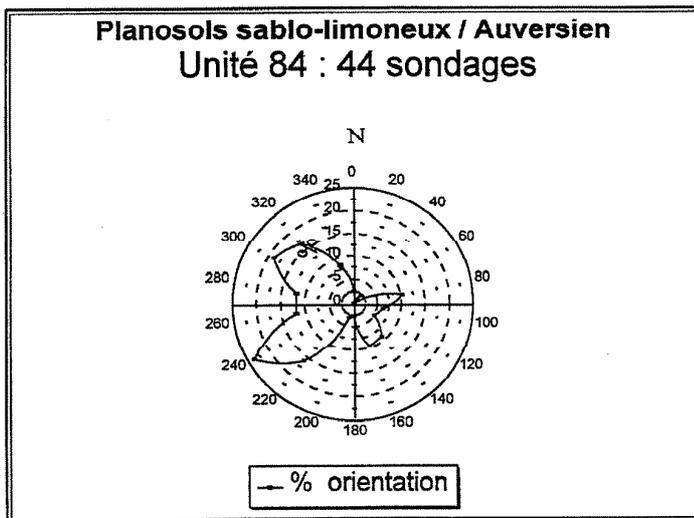
LS limonosableux
LL Limon loessique
VE texture équilibrée de Vallon
KA Argille de décarbonatation de calcaire dur

ANALYSE DE LA DISTRIBUTION DES ORIENTATIONS DE PENTES

Diagramme circulaire

X = le long du périmètre
Y = le long des rayons du cercle

X	Y1	Y2
Orientation	Nb sondages	% orientation
0	1	2.56
20	0	0.00
40	1	2.17
60	0	0.00
80	3	10.34
100	2	6.25
120	2	5.00
140	3	9.09
160	4	9.52
180	1	2.63
200	1	3.23
220	5	16.13
240	5	23.81
260	3	12.00
280	3	12.00
300	4	19.05
320	4	16.67
340	2	8.33



Une fois constituée, la banque de données permet de trier les informations concernant les points d'observations et de mesures (sondages) et celles des unités cartographiques, couvrant une surface représentable. Dans les deux cas, l'orientation de chaque pixel, où est ramenée toute l'information pédologique et topographique, est utilisée pour des traitements : tri et principalement représentation graphique en histogramme circulaire (Radar de Quattro pro) soit des présences du type de sol étudié, soit des % de ce type de sol dans une direction donnée.

Once the database is established, point data from auger boreholes and polygon data from cartographic units are sorted for a representative area. In both cases, the orientation of each pixel, including all soil and topographic data, is used for processing: data sorting and graphic representation as directional histograms (Radar Quattro pro of Borland) show the presence (or percentage) of a given soil type for a given slope orientation

Fig. 3.- Traitement informatique des données.

Fig. 3.- Data processing.

N° UTE définitif	nbre	Occurr %	HORIZON	Prof. Hor sommet	TEXT	Argile %	E.G. Nature	E.G. Quantité	EFFERV	COULEUR horizon	TACHES 1 Abondance	TACHES 1 Couleur
45	87											
	87	100	Ap	0.0	LM+	17.5	Q	0.01	0.2	brun gris foncé		
	20	23	A2	29.5	LM	15.1		0.00	0.0	brun clair	0.2	rouille
	49	56	Bt1	37.4	LA+	27.3		0.00	0.0	brun	0.1	rouille
	07	100	Bt/Bt2	65.7	LA	26.5	Q	0.03		brun jaunâtre		
	52	60	Bt3	72.9	LA	24.5		0.00	0.0	brun jaune	0.1	rouille
	19	22	B/C	89.7	LA-	21.3		0.00	0.0	jaune		
	30	34	C	88.8	LM	16.4		0.00	0.2	jaune brun		
	8	9	II	>120	-	-	K (M UQ)	3.50	3.5	blanc		

N° UTS définitif	nbre	Occurr %	HORIZON	Prof. Hor sommet	TEXT	Argile %	E.G. Nature	E.G. Quantité	EFFERV	COULEUR horizon	TACHES 1 Abondance	TACHES 1 Couleur
76	15											
	15	100	Ap	0.0	AL	31.3	K	0.57	0.9	brun gris foncé		
	15	100	B	29.8	AL	35.2	K	0.27	1.3	brun	0.2	Noir
	12	80	C	48.8	-	-	K	2.26	3.6	blanc		
	5	33	R	55.0	-	-	K	4.00	3.8	Blanc		

Abréviations

UCS : Unité cartographique de Sol (Nom du sol)
 nbre : sondages réalisés sur l'unité de sol (1ère ligne)
 horizon présent dans l'ensemble des sondages de l'unité
 Occurr : % de recouvrement de l'horizon dans les sondages de l'unité
 Horizon : Ap (L) : Labour. A2 (E) : hor. éluvié, appauvri en argile & fer
 Bt (BT) : horizon illuvié où s'accumulent fer et argile
 B (S) : Horizon différencié par sa structure
 C : roche-mère (fragmentée) du sol R : Roche saine dure
 II : substrat du sol (de nature différente)
 Prof.Hor : Prof en cm d'apparition du sommet de l'horizon
 TEXT : Texture de l'horizon appréciée tactilement
 LM : limon moyen. LA : limon argileux. AL : argile limoneuse
 Argile% : Moyenne des taux d'argile appréciés par la texture
 E.G. : Eléments grossiers calcaires (K), gréseux (Q) de 0 à 4
 Efferv : Effervescence à HCl 2N. Variation 0 à 4
 Taches : Abondance : variation de 0 à 4

Abbreviations

Cartographic Unit number (Soil name)
 Number of auger boreholes intersecting this soil type (first line)
 Number of horizons present in the soil unit (other lines)
 % of auger boreholes intersecting the horizon
 Ap: plow layer. A2 (E): leached horizon
 BT: textural horizon of clay & iron accumulation
 B: differentiated horizon (structure)
 C: unconsolidated parent material R: hard fresh rock
 II: substratum
 Depth (cm) to top of horizon
 Horizon texture
 LM: Silty loam. LA: Silty clay loam. AL: Silty clay (# UK triangle)
 Mean clay % shown by texture
 Amount of calcareous (K) and sandy (Q) coarse fragments (0 to 4 scale)
 Effervescence with HCl 2N (0 to 4 scale)
 Motiling (0 to 4 scale)

Tabl. 1.- Synthèse des données des sondages des UC 45 et 76.

Table 1.- Synthesis of CU 45 and 76 soil data.

Résultats

Sur la carte du relief (fig. 4), obtenue à partir du MNT, on distingue, dans les 3/4 nord-est, le plateau du Vexin français échanuré par la vallée de la Viosne d'axe N120 et par l'anticlinal de Vigny, bordé au NE par une faille N120 (Feugueur, 1967) et au sud-ouest par une série d'accidents N130. Dans le quart sud-ouest, les Buttes de l'Arthies sont en position synclinale avec un relief très complexe dans le détail.

Les premiers résultats de distribution spatiale des sols reposent sur l'analyse de deux séquences représentées sur la carte des sols simplifiée (fig. 5). Chaque séquence est formée de deux types de sols séparés par la ligne de crête :

- sols bruns calciques/sols bruns lessivés, soit calcisols/néoluvisols (1),

- sols podzolisés/sols bruns, soit podzols/brunisol (1).

**Séquence sols bruns calciques/
sols bruns lessivés
(calcisols/néoluvisols)**

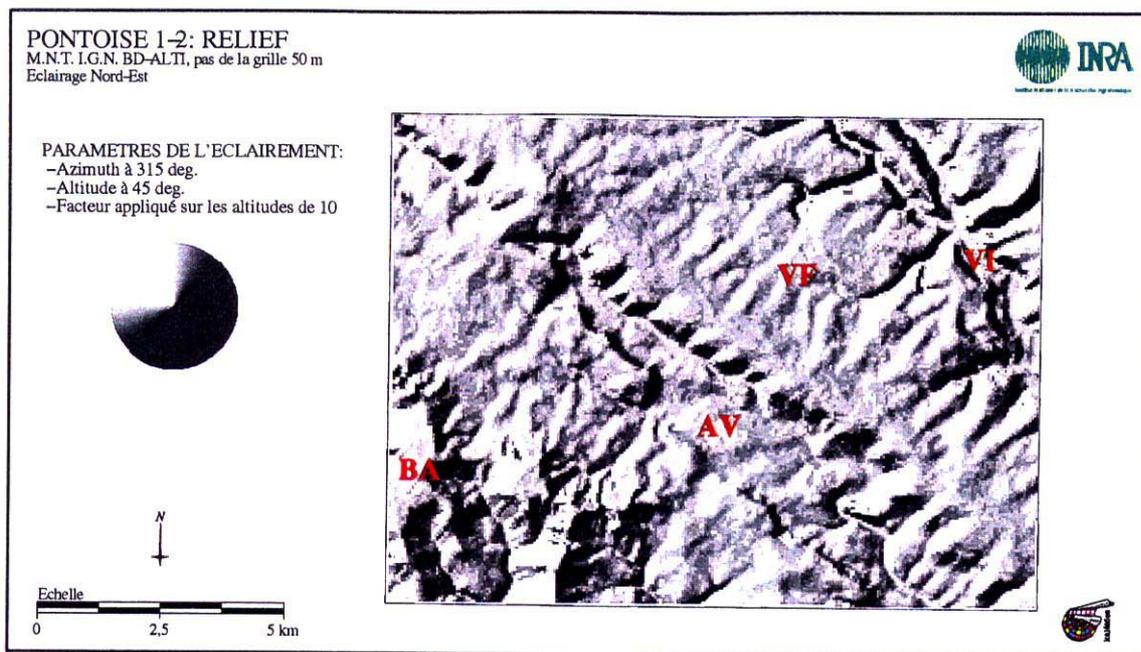
Un résultat majeur est donné par le couple d'unités cartographiques 76/45 dont la caractérisation est présentée dans le tableau 1. L'unité 76 est constituée de sols bruns calciques argileux, décarbonatés en surface, développés dans le calcaire de Saint-Ouen qui apparaît à 50 cm de profondeur environ. L'unité 45 est faite de sols bruns lessivés, limoneux, non calcaires en conditions naturelles (amendements possibles), profonds (>120 cm), développés dans le limon loessique rarement calcaire avant 120 cm.

L'unité 76 a été définie par 18 sondages. La figure 6a montre qu'un seul sondage est situé sur une pente d'orientation sortant de la gamme N130°- N310°. La figure 6b montre le même phénomè-

ne avec les 976 pixels de l'unité : dominance très nette des pixels à pente comprise entre le sud-est et le nord-ouest. On note cependant une grande importance des orientations N220°- N240°, ce qui n'apparaît pas avec les seuls sondages, lesquels font ressortir au contraire des orientations N160° et N280° plus proches des conditions limites. Il y a certainement eu un sur-échantillonnage dans ces zones-limites et un net sous-échantillonnage dans les zones à faible risque d'erreur. Mais l'éventail des directions de pente échantillonné est représentatif de l'unité cartographique 76. La figure 6c donne le pourcentage de pixels de l'unité 76 dans la population totale de pixels de chaque direction : il ressort une importance plus grande de la direction N300°, résultat que nous pourrions comparer avec la distribution des pentes sur l'ensemble de la carte, lors de l'interprétation.

L'unité 45 est très développée avec 13871 pixels. C'est l'une des unités principales du plateau limoneux du Vexin

(1) Selon le Référentiel Pédologique

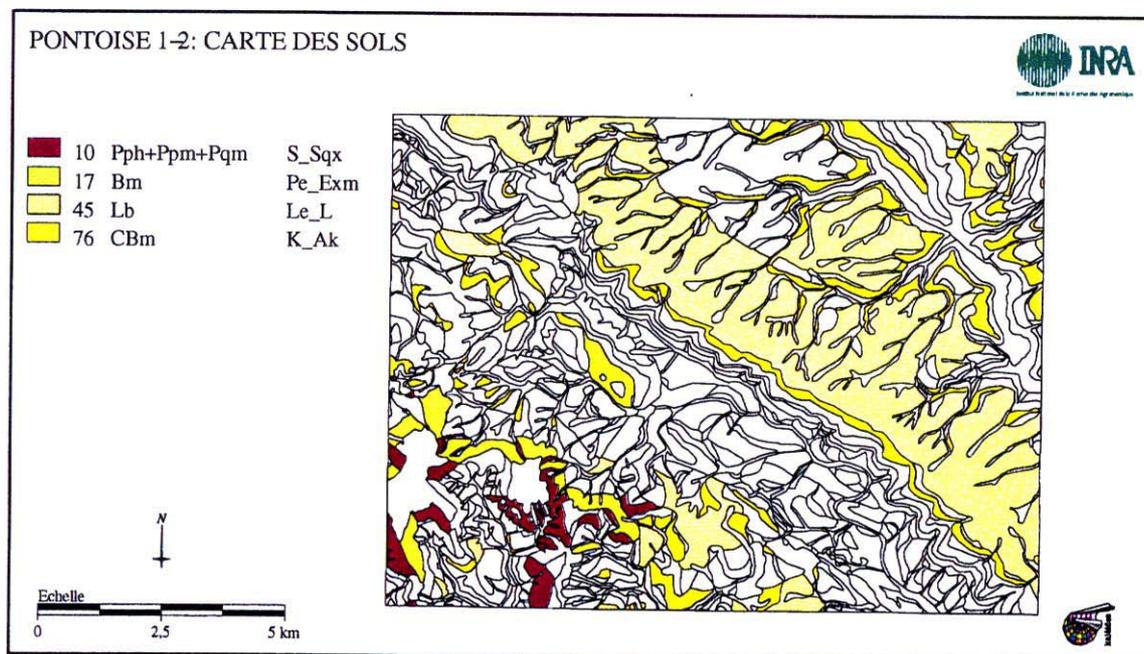


D'après MNT IGN (BD-Altitudes) au pas de 50 m :
VF : Vexin français (Vexin plateau)
Vi : Viosne (Viosne river and valley)

From DTM (IGN) at (50*50) m²:
BA : Buttes de l'Arthies (Arthies hills)
AV : Anticlinal de Vigny (Vigny anticline)

Fig. 4.- Le relief.

Fig. 4.- Topographic DB.



- UC 10 Sols podzolisés, sableux, développés dans les sables stampiens sur pentes SO d'intensité moyenne 11%.
- UC 17 Sols brunifiés, limono-sableux, développés dans des produits hétérogènes sur pentes NE d'intensité moyenne 9%..
- UC 45 Sols bruns lessivés à lessivés, limoneux, développés dans des formations loessiques sur pentes NE du plateau du Vexin.
- UC 76 Sols bruns calciques, argileux, développés dans les calcaires de Saint-Ouen, sur les haut de pente SO du plateau du Vexin.
- CU 10 *Sandy orthic podzols on Stampian deposits (Oligocene) on SW slopes (mean slope angle 11%)*
- CU 17 *Sandy loamy orthic cambisols on heterogeneous material on NE slopes (mean slope angle 9%)*
- CU 45 *Loamy orthic luvisols on thick loess on low-angle NE slopes of the Vexin plateau*
- CU 76 *Clayey calcic cambisols on Saint-Ouen limestone (Eocene) on low-angle SW slopes of the Vexin plateau*

Fig. 5.- Quatre unités étudiées de la carte des sols.

Fig. 5.- The four soil map units studied.

UC76 Soils bruns calciques / calc. dur

18 sondages

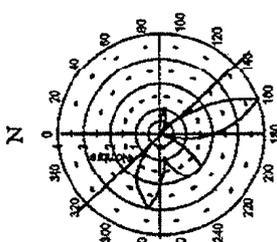


Fig 6a

UC76 Soils bruns calciques / Calc. dur

Orientations des 976 pixels

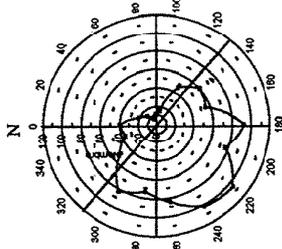


Fig 6b

UC76 Bruns calciques / calcaire dur

% des pixels dans l'orientation

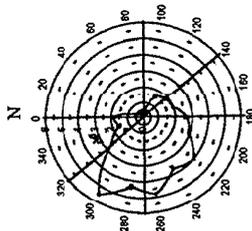


Fig 6c

UC76 : Les sondages (6a) et l'ensemble de la surface (6b, 6c) en sols bruns calciques sur calcaire dur de Saint-Ouen sont en très grande majorité au Sud-Ouest d'une ligne N° 40°-N320°. CU 76 (calic cambisols in Saint-Ouen limestone): the boreholes (6a) and the whole pixel area (6b, 6c) are mainly situated to the SW of a N140°-N320° trending line.

UC 45 Soils bruns lessivés sur loess

99 sondages

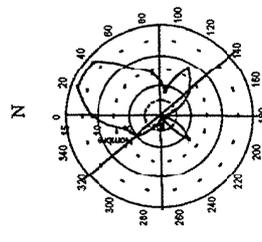


Fig 7a

UC45 Soils bruns lessivés sur loess

Orientations des 13871 pixels

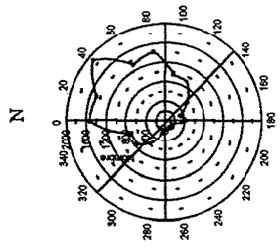


Fig 7b

UC45 Soils bruns lessivés sur loess

% des pixels dans l'orientation

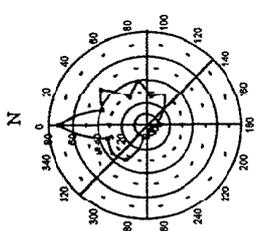


Fig 7c

UC45 : Les sondages (7a) et l'ensemble de la surface (7b, 7c) en sols bruns lessivés sur limon loessique sont en très grande majorité au Nord-Est de la même ligne N140°-N320°. CU45 (orthic luvisols in loess): the boreholes (7a) and the whole pixel area (7b, 7c) are mainly situated to the NE of the same N140°-N320° trending line.

Fig. 6 et 7.- Résultats.

Fig. 6 and 7.- Results.

Fig. 8
Sols des buttes de l'Arthies UC10/UC17
 Sols sableux / sols limono-sableux

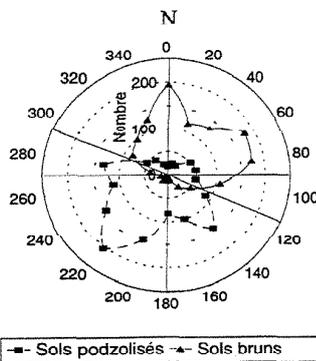
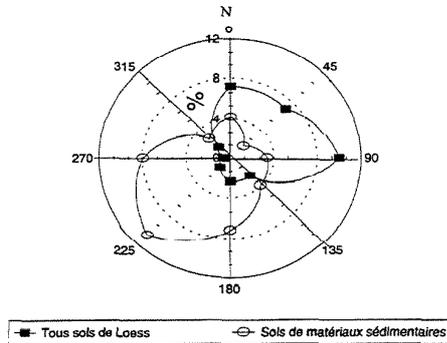


Fig. 9
Pontoise 1-2 Tous (591) sondages
 Sols en % dans la direction



La même distribution des sols s'observe par rapport à une direction limite très voisine dans une gamme de pentes et sur des matériaux très différents (fig. 8) et même se généralise à l'ensemble des 591 sondages de la carte (fig. 9).

The same soil distribution is observed according to a similar direction field within a slope range and on different material (Fig. 8). These results can be extended to include all the 591 auger boreholes of the whole map (Fig. 9).

Fig. 8. et 9.- Généralisation.

Fig. 8 and 9.- Generalisation.

français. Les 99 sondages (fig. 7a), qui ont donné les éléments de caractérisation des sols de l'unité, sont essentiellement tournés vers le NNE. L'analyse des pixels donne un spectre étalé entre N0° et N80° avec une dominante à N40° (fig. 7b). La comparaison des deux graphiques indique une bonne représentativité des sondages, cependant avec encore un sur-échantillonnage pour les orientations-limites N320° et surtout N120° à N140°. La figure 7c souligne l'importante fréquence (60 %) des sols bruns lessivés limoneux sur pente nord.

Les pentes de l'unité 76 sont légèrement plus fortes (moyenne = 3 %, écart-type = 1,8 %) que les pentes de l'unité 45 (moyenne = 2,5 %, écart-type = 1,3 %). Ces résultats, obtenus sur pentes orientées au nord-est plutôt faibles et sur pentes orientées au sud-ouest faibles à moyennes, sont en accord avec ceux de H. Bourenanne (1992 et 1997) en Petite Beauce sur des pentes encore plus faibles.

Séquence de sols podzolisés/sols bruns, (podzosols/brunisol)

Nous examinons si le même type de distribution des sols se présente aussi sur les Buttes sableuses de l'Arthies à pentes

nettement plus accentuées. Le couple Unité 10/Unité 17 a été utilisé. La pente moyenne de l'unité 10 est de 11,3 % (écart-type = 4,2 %) et celle de l'unité 17 est de 9,4 % (écart-type = 4,0 %). L'unité 10 est formée de sols sableux podzolisés, développés dans les sables stampiens. L'unité 17 est constituée de sols bruns limono-sableux, développés dans une formation assez hétérogène de pente masquant les sables stampiens.

Les sols de l'unité 10 (1512 pixels) sont essentiellement tournés (fig. 8) vers le sud-ouest (entre N120° et N300°). Les sols de l'unité 17 (1417 pixels) sont tournés vers le nord-est (entre N300° et N120°) et principalement entre N0° et N80°. Ces résultats sur pentes assez fortes apparaissent donc similaires à ceux obtenus précédemment sur pentes nettement plus faibles.

Généralisation à l'ensemble de la carte

La comparaison des orientations des sols a été opérée sur une dizaine de couples d'unités de sols. Des résultats très comparables à ceux des exemples présentés ont été obtenus. Aussi avons-

nous pensé à les généraliser à l'ensemble de la carte à 1/25 000 de Pontoise 1-2.

Cette généralisation a été effectuée à partir des 591 sondages-échantillons sur la carte. Nous distinguons trois ensembles de sols (fig. 9) :

- l'ensemble des sols développés dans une formation limoneuse (L) récente ;
- l'ensemble des sols développés dans une roche sédimentaire (S) plus ancienne ;
- l'ensemble des sols développés dans une formation quaternaire hétérogène (P), redistribuée sur pente.

Si la répartition des sols de formations hétérogènes redistribuées semble indépendante de l'orientation de la pente, la figure 9 montre clairement que :

- les sols limoneux sont à 82 % au nord-est d'une ligne N315°-N135°,
- et les sols issus de couches sédimentaires variées sont à 79 % au sud-ouest de cette même ligne de démarcation.

Une telle précision peut être considérée comme remarquable en cartographie pédologique, compte tenu de la grande diversité des processus pédogénétiques et des perturbations dues aux activités anthropiques.

Vents dominants et Sols de Loess

Fréquence & direction moyennes

Automne, Hiver et Été (1962-95) Pontoise aérodrome

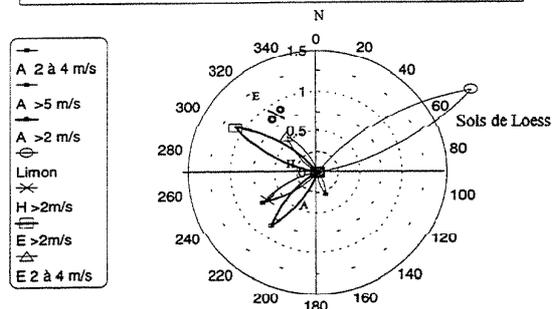
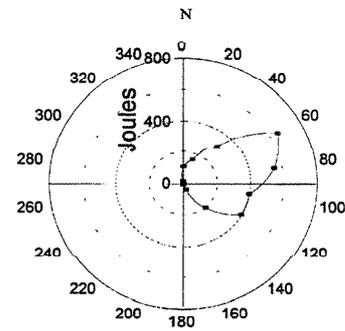


Fig. 10

Energie cinétique efficace (Sols nus)

Vents moyens et forts (> 5 m/s)



Été, Automne et Hiver

Fig. 11

Fig. 10.- L'ensemble des vents (>2 m/s) d'automne (A) et d'hiver (H) pourraient contribuer à distribuer vers le NE les fractions fines individualisées à la surface de sols nus. Les vents frais d'été (E) redistribueraient les particules plutôt vers le SE et les vents forts d'automne plutôt vers le NNW.

The autumn (A) and winter (H) winds >2 m/s could transport fine particles to the NE slopes. Particles could be redistributed to the SE slopes by the cool summer winds and to the NNW slopes by the stronger autumn winds.

Fig. 11.- L'énergie cinétique des vents moyens et forts met en évidence l'enveloppe des énergies susceptibles de transporter des sables fins et a fortiori des limons. Les vents plus faibles peuvent contribuer à une redistribution locale des seuls limons.

The kinetic energy of medium and strong winds reveals the capacity of transporting fine sands and silts. Lighter winds only redistribute silt-size particles over short distances.

Fig. 10 et 11.- Première interprétation.

Fig. 10 and 11.- First interpretation.

Interprétation-discussion

La cohérence des résultats à plusieurs niveaux de perception et pour différents types de séquences de sols démontre une structure spatiale de la couverture pédologique (King *et al.*, 1994). Cette organisation est nécessairement le résultat de processus liés à la mise en place des matériaux et à leur évolution pédogénétique au cours du temps.

Plusieurs facteurs sont susceptibles de jouer un rôle dans cette mise en place. Le gel d'abord, au cours des périodes froides, a maintenu en glace les versants peu ou pas éclairés (nord à est), mais les alternances journalières de gel et dégel aux heures chaudes de la journée ont pu permettre le décapage des formations limoneuses sur les versants sud à ouest. Mais où sont passés les matériaux déplacés ?

Autre facteur de redistribution des limons, le ruissellement entraîne par érosion diffus les particules limoneuses détachées des mottes de la surface des sols limoneux sous l'effet de l'impact des pluies et ces atterrissements se traduisent par des colluvions de fond de vallons et de vallées, voire le long des haies ou des rideaux en travers des versants. Il s'agit alors d'une distribution tout autre que celle étudiée ici. Nous examinons donc deux

facteurs qui nous semblent les plus pertinents : le vent et la tectonique.

Effet du vent

De nombreux spécialistes du Quaternaire donnent une origine éolienne aux limons de plateau, à partir de phénomènes périglaciaires. J.P. Lautridou (1985), M. Campy et J.J. Macaire (1989) considèrent que les loess du Vexin sont issus du nord-ouest (Manche à sec au Weichsélien) avec une possibilité d'alimentation par la vallée de la Seine et par l'est. Ces sources ont pu servir à l'alimentation générale en loess du Vexin français à une époque révolue, mais la distribution actuelle des sols limoneux, que nous obtenons, ne correspond pas à ces directions de vents et donc ne s'explique pas par ces seuls apports initiaux. M. Campy et J.J. Macaire (1989) précisent, d'ailleurs, une évolution postglaciaire de la direction des vents dominants du nord vers l'ouest sur la façade ouest de l'Europe.

Aussi nous semble-t-il intéressant de comparer les résultats précédemment exposés à l'orientation des vents actuels (les seuls pour lesquels il existe des mesures directes !). La direction moyenne annuelle (Bourennane *et al.*, 1994) a été

calculée à partir de la station de l'aérodrome de Pontoise (sur le plateau du Vexin) sur la période 1962-1995, pour différentes intensités du vent. Les directions moyennes ont également été calculées par saison. Sur la figure 10, la direction moyenne (N 240°) des vents moyens et forts (>5 m/s) en automne est diamétralement opposée à la direction moyenne des sols limoneux (N 60°). Cependant, les vents faibles (<4 m/s), nettement moins fréquents, viennent en moyenne quasi perpendiculairement. Mais c'est en été que la résultante (N 300°) des fréquences des vents est la plus forte, avec une importance nette des vents faibles (N 320°).

Afin de mieux rendre compte de l'action complexe des vents, nous avons évalué l'énergie cinétique de chaque classe de vents. Celle-ci rend compte du rôle moteur du vent à la fois comme agent de déflation et d'arrachement des particules sur les versants au vent et comme agent d'apport de particules sur les versants sous le vent.

L'enveloppe des énergies cinétiques (fig. 11) des vents >5 m/s, qui sont considérées les plus efficaces, donne une meilleure représentation de l'influence des différentes directions de vent, surtout durant les saisons où le sol a le plus de

probabilité d'être nu (été, automne et hiver). Entre N 40° et N 120°, l'énergie cinétique des vents moyens et forts est la plus importante. Or le cadran angulaire de la quasi totalité des sols de limon est essentiellement entre N 0° et N 90°. Il existe donc un décalage angulaire d'environ 20 à 30° entre l'enveloppe des limons (de N 0° à N 90°) et l'enveloppe des énergies cinétiques (de N 20° à N 120°).

Il est possible cependant d'élargir un peu la gamme des énergies efficaces des vents surtout pour les particules les plus fines (et les moins denses) : on tient compte de vents plus faibles ($V < 4$ m/s), qui proviennent en moyenne du sud (N 170°) en automne et en hiver, mais du nord-ouest (N 320°) en été. Quand les vents sont faibles, les contrastes thermiques entre versants sud-ouest et nord-est sont optimisés par convection et des tourbillons de poussières sont tout-à-fait observables : ils seraient d'autant plus efficaces pour arracher des particules fines aux versants échauffés et les apporter aux versants plus frais ; le vent interviendrait alors comme agent de transport horizontal des particules à plus ou moins grandes distances suivant sa vitesse.

Effet de la tectonique ou du relief ?

L'influence de la tectonique sur la forme du relief est certaine. Indirectement, elle peut donc jouer aussi sur la distribution des formations superficielles et des sols qui s'y développent. En fait, c'est plutôt de la géomorphologie et de la tectonique que nous avons opéré dans plusieurs situations du Bassin de Paris, où des surfaces structurales nettes sont bien représentées.

Nous connaissons des régions où la tectonique n'intervient pas dans la répartition des sols. En Beauce (Bourennane, 1992 ; Aubron, 1993 ; King *et al.*, 1996 ; Bourennane 1997), les couches géologiques sont horizontales et le « relief » est plutôt dû au karst développé dans le calcaire de Beauce. D. Baize (1988) dans l'Yonne se situe dans le cas de pendage perpendiculaire à la direction optimale (SW-NE) du modèle de distribution présenté plus haut. Pourtant, dans les deux régions étudiées indépendamment, les sols calcaires développés dans le calcaire de Beauce et dans la craie d'une part et les sols développés dans des formations

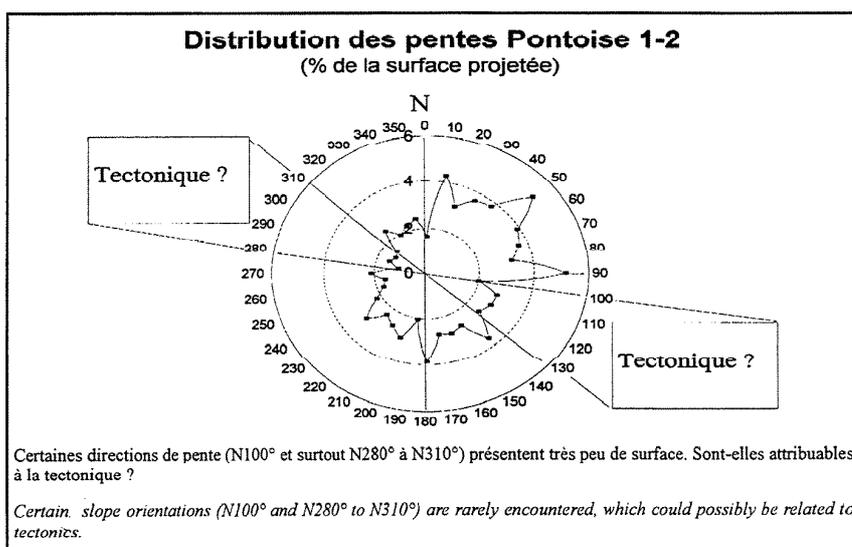


Fig. 12.-Distribution des pentes (% pixels).

Fig. 12.- Slope orientation.

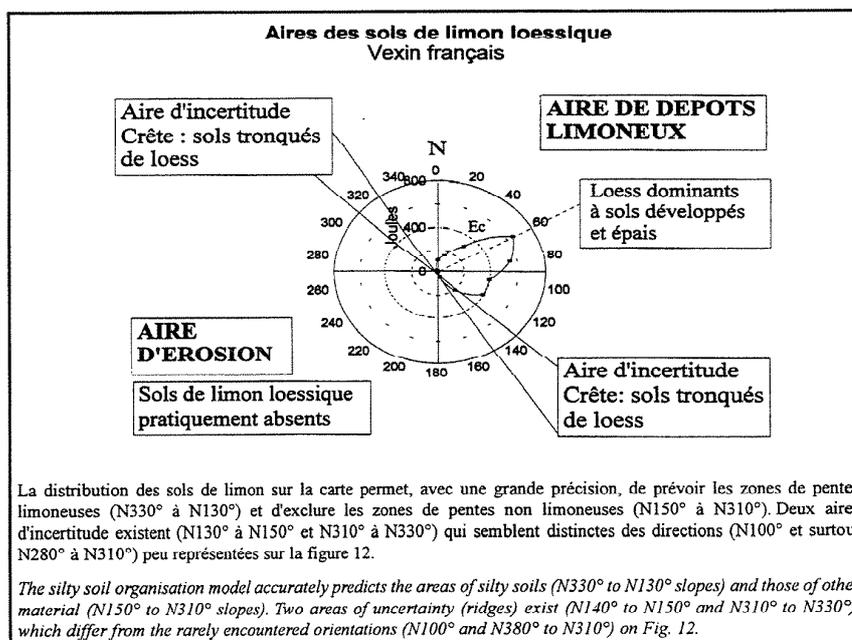


Fig. 13.- Aires de sols de limon loessique.

Fig. 13.- Loess silty soil distribution.

superficielles limoneuses de l'autre sont répartis de chaque côté de la crête, selon le même modèle.

Dans d'autres cas, la tectonique vient perturber le Modèle d'Organisation des Sols présenté ici : c'est le cas du Pays de Thelle (Bégon *et al.*, 1973), vaste monoclin correspondant au flanc sud-ouest de l'anticlinal du Bray, où le pendage ou plutôt la surface de l'argile à silex est inclinée vers le sud-ouest. Les sols de cette surface sont développés dans des

formations très hétérogènes, mélangeant silex, argile et piégeages limoneux dans des poches de cryoturbation ; les placages de limon loessique sont limités aux rares et courtes pentes est à sud-est des vallons secondaires qui réussissent à entailler faiblement cette surface.

Ailleurs, la structure provoquée par la tectonique (un pendage est ou nord-est par exemple) renforce le phénomène décrit plus haut. C'est le cas du bassin versant du Loir en amont de Châteaudun

(Isambert, 1984), où la surface de l'argile à silex est inclinée faiblement vers l'est. Il s'agit encore d'un grand monoclin, mais compartimenté par de multiples traces de microtectonique et/ou de néotectonique, mettant à jour l'argile à silex sur les versants courts exposés au sud et à l'ouest. Et systématiquement, sur les versants exposés à l'est longs et très peu pentus, l'argile à silex est masquée sous une couverture limoneuse généralement peu épaisse (Isambert, 1980).

Dans le Vexin, la tectonique, qui a provoqué la formation d'anticlinaux et de synclinaux très nets sur la figure 4, peut jouer un rôle en accentuant le phénomène le long de la corniche de Lutétien au nord-est de l'anticlinal de Vigny. Sans doute, aussi, la direction N 130 - N 310 de la ligne de crête est-elle bien le résultat de l'action combinée de la tectonique et des agents d'érosion. La figure 12, construite à l'aide du MNT, révèle une plus faible présence des pentes entre N 280 et N 310. Cependant, la direction N 300 (fig.6c) présente un maximum relatif de sols calcaires et la direction N 320 (fig.7c) un maximum relatif de sols limoneux. Le minimum des pentes N 310 serait donc la ligne de crête calquée sur la tectonique générale de la région. De même, la figure 8 dégage une limite un peu différente (N 115-N 295) entre versants NE et SW des buttes stampiennes de l'Arthies : y a-t-il une autre direction de fracture tectonique inconnue ? La sédimentation des différentes couches du tertiaire local est-elle concordante (Planchon, 1994) ? ou cet écart est-il dû à une différence de réaction des matériaux sableux meubles et des calcaires durs au même agent d'érosion ?

Le Modèle d'Organisation Spatiale des Sols proposé permet même d'améliorer la connaissance des accidents qui marquent l'anticlinal de Vigny : champ de petites failles parallèles à l'axe de l'anticlinal, soulignées par la plus faible présence de sols à matériaux très limoneux sur pentes orientées au nord-est, ou par de petites plages de sols calcaires sur pente orientée au sud-ouest « inattendue » (mouvements verticaux et coulissages plutôt horizontaux). Certains de ces accidents ne figurent pas sur la carte géologique à 1/50 000.

Conclusion

Une analyse de la distribution spatiale des sols d'un secteur du Vexin montre une relation entre les types de sols et l'orientation des pentes. Cette relation a pu être quantifiée grâce à l'utilisation d'un Modèle Numérique de Terrain et de traitements par un Système d'Information Géographique.

Nous constatons (fig. 13) qu'il existe une direction privilégiée (N 140° - N 320°), sans doute initiée par la tectonique, pour la limite supérieure séparant deux unités de sols, l'une au sud-ouest de cette limite, l'autre au nord-est. Sur le versant sud-ouest, court et plus pentu, les sols sont très variés, car ils dépendent directement de la lithologie de chaque couche géologique affleurante. Sur le versant nord-est, long et peu pentu, les sols sont plus homogènes et dérivent de formations superficielles loessiques à dominante limoneuse. Cette distribution constitue un Modèle très général d'Organisation Spatiale des Sols dans le Vexin français, où environ 80 % des sondages effectués sont conformes à la prédiction du modèle. Les 20 % restants résultent d'autres phénomènes de mise en place : colluvionnement et alluvionnement le long du réseau hydrographique, tourbières et sols plus ou moins organiques à engorgement permanent le long de lignes de sources.

La tectonique a pu affecter la forme générale du relief et indirectement atténuer ou renforcer l'effet de l'orientation des pentes. La géomorphologie (dissymétrie des versants, formations superficielles loessiques...) renforce la thèse d'une distribution éolienne de certains matériaux limoneux en particulier. L'analyse quantitative de la répartition actuelle des sols selon le Modèle d'Organisation Spatiale des Sols et l'étude de la direction des vents mettent en évidence des ressemblances remarquables des directions. Les vents dominants, moyens et forts, soufflant du sud-ouest ont pu (et peuvent encore ?) jouer un rôle déterminant dans la distribution systématique des matériaux loessiques. Une redistribution plus locale par des vents faibles (<4 m/s) est possible en été vers le sud-est (vents soufflant du nord-ouest) et d'octobre à mars vers le nord (vents soufflant du sud) : elle peut ainsi contribuer à élargir du nord au sud-est la

gamme d'influence du vent vis-à-vis des dépôts loessiques.

Ce modèle de distribution peut s'appliquer à l'ensemble de la région naturelle du Vexin français. Il semble revêtir un caractère encore plus général : il a été reconnu dans différents secteurs du Bassin de Paris (Aisne, Yonne, Loiret, Eure-et-Loir,...) qui ont fait l'objet de cartographie pédologique systématique. Cependant, sur le plateau très arrosé du Pays de Caux, situé près des côtes de la Manche, le modèle proposé ne semble plus valable sur des formations loessiques épaisses. Faut-il aussi des périodes de dessiccation suffisamment longues pour que le vent fasse son effet ? Sans doute faut-il évoquer aussi l'histoire déjà ancienne des défrichements et des pratiques culturales, comme nous le suggère J.P. Lautreidou ! Le débat est ouvert.

Remerciements

Les auteurs remercient très chaleureusement leurs collègues et amis qui se sont intéressés à ce travail, spécialement :

D. Dupré, (INRA Science du Sol Orléans) sans qui les caprices fréquents de l'ordinateur (évidemment) n'auraient pu être domptés !

S. Belemlihl (Univ. Tours) pour son aide dévouée dans le traitement des données.

A.L. Thomas, (INRA Science du Sol Orléans, INRA Forêts Nancy) qui, dans les Vosges, cherche entre autre si le M.O.S. présenté ici est encore valable !

P. Horemans, (INA P-G), qui a fait « toucher du doigt » à M. Isambert ces phénomènes de distribution, tant dans l'Yonne que dans le Perche. Il y a bien longtemps pour le pédologue et pourtant ce n'est probablement pas encore hier pour les sols !

J.J. Lambert, (INRA Science du Sol Orléans) et Stead Rowena (B.R.G.M.) pour leur participation très importante aux corrections de la version anglaise.

J.P. Lautreidou et J.J. Macaire pour leur lecture et leurs critiques constructives qui ont permis d'améliorer la présentation et l'interprétation des résultats de cette étude et d'amorcer un débat scientifique, intéressant tant les géologues que les pédologues.

Références

- Arc/Info. (1991) - User's guide 6.0 : Cell-based Modeling with GRID™, Analysis, display and management. ESRI inc. Redlands Ca 92373-8100 USA.
- Aubron I. (1993) - Télédétection et distribution spatiale des sols calcaires en Petite Beauce. DEA Univ. Nancy I, INA P-G, ENSA Rennes, INRA Science du Sol, Orléans, 53 p.
- Baize D. (1988) - Les formations calcaires redistribuées du Jovinien et les sols qui en sont issus. *Science du sol* n° 26, 2, 113-136.
- Batschelet E. (1981) - Circular statistics in Biology. Academic press, London. 370 p.
- Bégon J.C., Hardy R., Mori A., Roque J. (1977) - Les sols du Département de l'Oise. DDA de l'Oise et INRA-SESCPF. 333 p. Carte pédologique et carte des potentialités agricoles.
- Bourennane H. (1992) - Analyse et modélisation de la distribution spatiale d'un volume pédologique d'après des critères morphométriques. Application au limon argileux sur un secteur de Beauce. DEA Univ. Nancy I, INA P-G, ENSA Rennes, INRA Science du Sol, Orléans, 53 p.
- Bourennane H., Aubron I., Isambert M., Girard M.C., King D. (1994) - Apport de la télédétection dans l'analyse de la distribution spatiale des sols calcaires en Petite Beauce. 4èmes Journées nationales de l'Etude des Sols. 17-21/04/94, Lille (résumé).
- Bourennane H. (1997) - Etude des lois de distribution spatiale des sols de Petite Beauce. Application à la cartographie d'un horizon par couplage de méthodes morphométriques et géostatistiques. Thèse Univ. Orléans, INRA Science du Sol, Orléans, 229 p.
- Bruant I. (1994) - Statistiques circulaires : théorie et application aux données morphopédologiques. Maîtrise Maths. Univ. Paris VI, INRA, Science du Sol, Orléans, 33 p.
- Campy M., Macaire J.J. (1989) - Géologie des formations superficielles : géodynamique, faciès, utilisation. Masson Paris, 424 p.
- Dewolf Y. (1977) - Contribution à l'étude des marges occidentales du Bassin de Paris. Problèmes de géomorphologie. Thèse Paris, 589 p.
- Feugueur L. (1967) - Carte géologique de France à 1/50 000 : feuille de Pontoise. SGF - BRGM, 2ème édition.
- Isambert M. (1980) - Contribution de la cartographie des sols à l'inventaire d'accidents tectoniques dans l'ouest du Bassin de Paris. *Bull. Inf. Géol. Bassin de Paris*, 17, n° 4.
- Isambert M. (1984) - Carte pédologique de France à 1/100 000 : Feuille de Châteaudun. Notice explicative, 259 p. I.N.R.A Service d'Etude des Sols et de la Carte Pédologique de France.
- Jamagne M. (1973) - Contribution à l'étude pédogénétique des formations loessiques du Nord de la France. Thèse Université de Gembloux, 445 p.
- King D., Daroussin J., Jamagne M. (1994) - Proposal for a Spatial Organization Model in Soil Science. *J. Amer. Soc. Inf. Sci.* 45, (9), 705-717.
- King D., Bourennane H., Isambert M., Renaux B. (1996) - Apport d'une simulation SPOT 5 à la cartographie des sols calcaires en Petite Beauce. *Bull. Soc. Fr. Photogrammétrie et Télédétection*, n° 141, 110 à 114.
- Lautridou J.P. (1985) - Le cycle périglaciaire pleistocène en Europe du Nord-Ouest et plus particulièrement en Normandie. Thèse Doct. Etat, Caen, 2 tomes, 908 p.
- Macaire J.J. (1981) - Contribution à l'étude géologique et paléopédologique du Quaternaire dans le Sud-Ouest du Bassin de Paris (Touraine et ses abords). Thèse Doct. Etat, Sciences, Tours, 1, 304 p. ; 2, 146 p.
- Mardia K.V. (1972) - Statistics of directional data. Academic Press, London, 357 p.
- Mathey E., Macaire J.J., Lautridou J.P., Lebreton P. (1996) - Modélisation des relations entre lithologie des formations superficielles et la morphologie des versants : application à trois versants de Normandie, Colloque Géomorphologie et Formations superficielles (19 et 20 mars 1996). Rouen.
- Planchon V. (1994) - Informatisation de données de sols cartographiés dans le Vexin français : premiers résultats sur la distribution des matériaux, hypothèses sur leur mise en place et la stratigraphie. Licence géol. Univ. Orléans, INRA Science du Sol, Orléans, 25 p.
- Upton G.J.G., Fingleton B. (1989) - Spatial data analysis by example. Volume 2: categorical and directional data. John Wiley & Sons Ltd.



1998 : Année du Sol



Une information :

Du 20 au 26 Aout 1998, l'Association Française pour l'Etude du Sol organise à Montpellier le Congrès Mondial de l'Association Internationale de la Science du Sol. A cette occasion, plusieurs ministères ont décrété 1998 ANNEE DU SOL. Pour en savoir plus, consulter Michel ISAMBERT.

LES ALTÉRITES À SILEX DE L'OUEST DU BASSIN DE PARIS

Caractérisation lithologique, genèse et utilisation potentielle comme granulats

par
Benoit Laignel

Document du BRGM n° 264

La caractérisation lithologique des formations résiduelles à silex (en abrégé RS : résidus à silex) ou altérites à silex de l'ouest du Bassin de Paris montre que ces matériaux se subdivisent en deux grands ensembles : les RS de plateau et les RS de versant, également appelés biefs à silex. Les RS de plateau s'organisent en six familles géographiques aux caractéristiques lithologiques bien distinctes. Les biefs à silex ne s'organisent pas de manière régionale, mais en fonction de la nature et de la pente du versant. On distingue : les biefs à silex situés à l'extrémité des interfluves ; les biefs à silex localisés sur les versants des vallées sèches et drainées dont la pente est supérieure ou égale à 19° (ces versants présentent deux biefs, les biefs 1 et 2, sous la forme géométrique d'un double biseau) ; les biefs à silex localisés sur les versants des vallées sèches et drainées dont la pente est inférieure ou égale à 18° (ces versants ne présentent qu'un seul bief, le bief 1, sous la forme d'un simple biseau).

La genèse des RS aux dépens des craies commence dès l'émergence fini-crétacée. La réalisation d'un bilan d'altération entre les craies à silex et les RS indique que les RS ne sont pas uniquement un résidu d'altération des craies. Si l'origine autochtone des silex est incontestable, les rapports fraction silicatée fine / silex de 1/4 à 1/9 dans les craies contre 1/1 à 1/1,5 dans les RS montrent que les matrices présentent une part allochtone importante. L'allochtonie diminue avec la profondeur, pour devenir nulle vers 20 mètres.

Au Quaternaire, la dynamique périglaciaire et le creusement des vallées va entraîner des remaniements de type solifluxion des RS sur le rebord des plateaux. Ceci conduit à la formation des biefs à silex. La mise en évidence d'une géométrie en double biseau implique au moins deux phases de mise en place. La similitude de ces formations avec les heads et leur relation avec le creusement de la vallée de la basse Seine permet de proposer une datation de ces phases de mise en place : la première matérialisée par le bief 1 serait datée vers - 800 000 ans, tandis que le bief 2 se serait mis en place au Weichsélien.

La caractérisation lithologique et la compréhension de la genèse des RS permet d'établir une typologie de ces matériaux adaptée à leur utilisation comme granulats. Les biefs à silex, malgré leur teneur élevée en silex, présentent des gisements avec des volumes trop faibles pour envisager des exploitations à l'échelle industrielle. Seuls les RS de plateau dans le centre et le sud de l'Eure et le nord de l'Eure-et-Loir avec des gisements considérables apparaissent intéressants pour l'exploitation. Ces formations présentent, néanmoins, des teneurs en silex relativement faibles dans les dix premiers mètres, nécessitant la mise au point de nouvelles méthodes de séparation silex/matrice. Des essais de traitement à sec de ces matériaux ont été réalisés et ont donné des résultats encourageants, montrant ainsi la nécessité de poursuivre ce type de recherche.

Lithological characterisation of the clay with flints (abbreviated in French to RS: "résidus à silex") in the western part of the Paris Basin shows that these deposits can be divided into two major units: plateau RS and slope RS, also known as "biefs à silex". The plateau RS are made up of six geographical families, each with distinct lithological characteristics. The slope RS show no geographical pattern but can be classified, according to nature of the slope, into (1) "biefs à silex" at the extremities of the interfluves, (2) "biefs à silex" on the flanks of dry and well-drained valleys with slopes of 19° or more (these slopes show two "biefs", known as "bief" 1 and 2, which geometrically form a double wedge), and (3) "biefs à silex" on the flanks of dry and well-drained valleys with slopes of 18° or less (these slopes show only the "bief" 1, which geometrically forms a single wedge).

The genesis of the RS at the expense of chalk began with end-Cretaceous emergence. A weathering balance between the chalk and the RS indicates that the RS is not composed exclusively of material originating from the chalk. Whilst an autochthonous origin for the flint is undisputed, the ratio of fine-grained siliceous material / flint is 1/4 to 1/9 for the chalk and 1/1 to 1/1.5 for the RS. This indicates that the matrix is composed of a significant allochthonous fraction which diminishes with depth and disappears below 20 m.

Periglacial dynamics and valley incision during the Quaternary brought about solifluction reworking in the RS at the plateaux edges, leading to formation of the "biefs à silex". The double wedge geometry indicates at least two phases of development. The similarity of these formations with the "heads" and their relationship with the incision of the lower Seine valley make it possible to date the phases: "bief" 1 is dated at around 800 000 BP and "bief" 2 is considered as Weichselian.

The lithological characterisation and the understanding of the genesis of the RS has made it possible to establish a typology of these deposits adapted to their use as aggregate. The "biefs à silex", despite being rich in flint, form deposits which are too small for exploitation at industrial scale. Only the plateau RS in the centre and south of the Eure Department and in the north of the Eure-et-Loir Department seem to be of interest for exploitation. However, these deposits have a relatively low flint content in the upper 10 m, which would call for the development of new methods of flint/matrix separation. Dry process separation tests have provided encouraging results and demonstrate the necessity of pursuing this type of research.

Prix de vente : 300 F + 50 F de frais de port et d'emballage pour la France et 60 F pour l'Étranger.

**En vente chez votre libraire habituel ou, à défaut, aux : Éditions BRGM - BP 6009 - 45060 Orléans Cedex 2 - France - Tél. : 02 38 64 30 28.
Fax : 02 38 64 36 82 accompagné de votre titre de paiement.**