

L'INFILTRATION : QUELS FACTEURS EXPLICATIFS?

Analyse des résultats acquis sur 48 parcelles
soumises à des simulations de pluies au BURKINA FASO.

J. ALBERGEL * ; P. RIBSTEIN * ; C. VALENTIN **

INTRODUCTION

Durant quatre années d'expérimentation au Burkina Faso, cinq bassins versants représentatifs répartis sur l'ensemble du spectre écologique du pays (fig. 1) ont été testés au mini-simulateur de pluie. Sur chaque bassin les propriétés hydrodynamiques d'une dizaine de parcelles représentatives des différents états de surface (VALENTIN, 1985) ont été étudiées et un modèle de reconstitution des lames ruisselées a été proposé à l'échelle du bassin (ALBERGEL et BERNARD, 1984a). Une réflexion plus synthétique sur l'ensemble des résultats, tous bassins confondus, est menée actuellement.

A l'issue des études conduites sur les petits bassins représentatifs (RODIER & AUVRAY, 1965), il ressort que la classification des bassins suivant leur aptitude au ruissellement reste jusqu'à maintenant liée à l'expérience de l'hydrologue chargé d'estimer les crues de projet. En conséquence, Le premier objectif du programme simulateur de pluie à l'ORSTOM (CASENAVE, 1982) est de définir des critères objectifs pour la classification des bassins en fonction de leur perméabilité et de leur capacité d'infiltration sous différents types de pluie.

Dans ce cadre, le présent travail propose des paramètres susceptibles de hiérarchiser 48 parcelles vis à vis de l'infiltration. Ces parcelles implantées sur cinq bassins versants ont été soumises à un protocole de pluie simulée.

* Hydrologue, UR B12, ORSTOM, Miniparc Bat. 2, Rue des Apothicaires, 34100 MONTPELLIER.

** Pédologue, UR B12, Centre ORSTOM d'Adiopodoumé, B.P. V51 ABIDJAN, COTE D'IVOIRE.

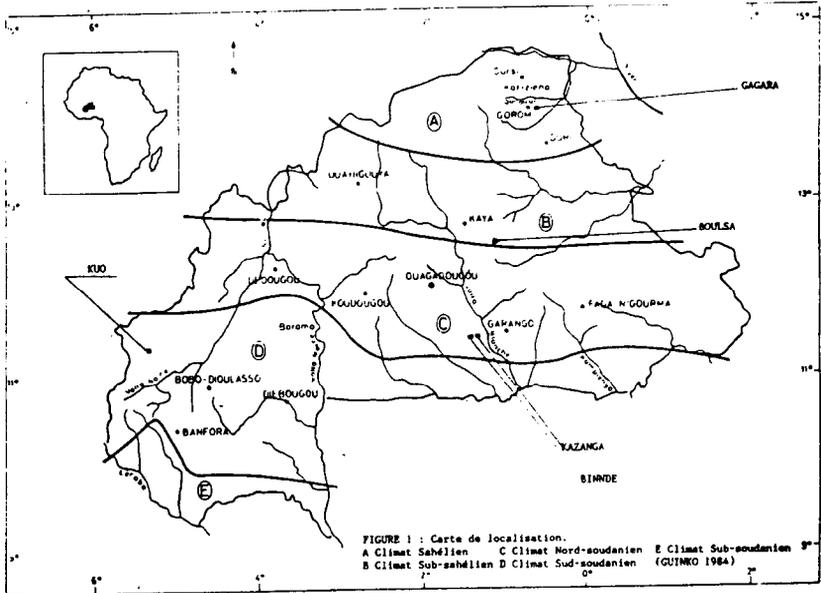


Figure 1 - Carte des bassins versants étudiés au Burkina Faso.

1. DONNEES ET METHODES

Les données sont constituées d'un échantillon de 48 parcelles, décrites par des variables d'infiltration sous pluies simulées et par des caractéristiques physiographiques.

1.1 LES VARIABLES D'INFILTRATION

1.1.1 Description.

Les protocoles définis sur chaque bassin sont légèrement différents. Mais il a été possible d'établir une succession de pluies équivalentes en hauteur et en temps de ressuyage sur toutes les parcelles.

Pour chaque parcelle, cinq variables caractéristiques de l'infiltration sont retenues :

- La lame infiltrée au cours de tout le protocole (L1); c'est la différence en millimètre entre les sommes des lames précipitées et des lames ruisselées.

- Le coefficient d'infiltration à saturation (K2) est obtenu graphiquement (fig. 2). La représentation en coordonnées cartésiennes de l'intensité d'infiltration en régime permanent en fonction de l'intensité de la pluie donne un faisceau de droites. L'intersection avec la première bissectrice représente l'intensité minimale de pluie pour qu'il y ait ruissellement. Cette valeur varie avec l'état d'humectation du sol avant la pluie.

La droite la plus basse caractérise la pluie survenue sur un sol dont l'état d'humectation est proche de la saturation. Son intersection avec la première bissectrice définit le coefficient K2. Sur les parcelles pour lesquelles les points sont plus dispersés, le tracé de cette droite devient difficile; on la remplace par la droite enveloppe inférieure de l'ensemble du nuage de points. Le coefficient K2, exprimé en mm/h, représente l'intensité minimale d'infiltration à saturation. Ce coefficient est indépendant du protocole de pluie et de la surface ruisselante de la parcelle.

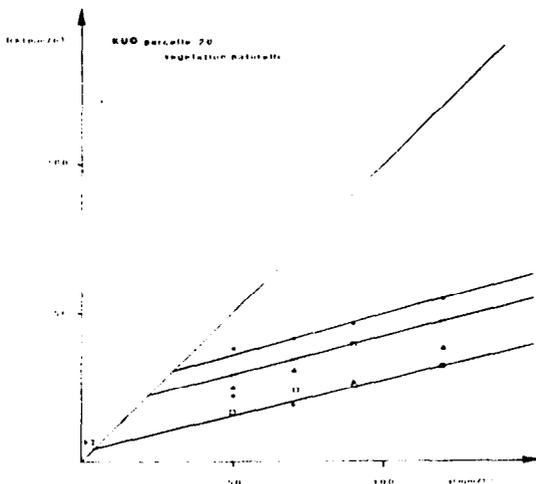


Figure 2 - Calcul du coefficient à saturation K2.

- La pluie d'imbibition sur sol sec (IS); elle définit la hauteur infiltrée en mm avant l'apparition du ruissellement pour la première pluie du protocole qui a toujours lieu après une période de ressuyage de plusieurs mois.

- La pluie d'imbibition sur sol "saturé" (IH); c'est la hauteur infiltrée en mm avant l'apparition du ruissellement pour la pluie survenant dans le protocole lorsque le sol présente en surface une humidité maximum.

Ces deux dernières variables caractérisent l'infiltration en régime transitoire.

- La détention superficielle récupérable (DR); c'est la hauteur d'eau ruisselée en mm après l'arrêt de la pluie. Cette quantité, toujours très faible, est peu variable au cours du protocole. Nous avons choisi de retenir celle correspondant à une pluie survenant sur l'état d'humectation du sol maximum. Cette variable, qui exprime le stockage superficiel mobilisable en fin de pluie devrait être reliée à l'infiltration. Elle permet également de caractériser la rugosité (LAFFORGUE, 1977).

Pour chaque parcelle, les valeurs des variables décrites ci-dessus ainsi que la pluie correspondante sont présentées dans le tableau 1.

TABLEAU DES VARIABLES D INFILTRATION							
OBS	NOM	P	L1	K2	IS	IH	DR
1	B1	381.8	134.8	6.5	20.8	2.5	2.1
2	B2	371.0	255.8	11.5	32.0	9.1	0.6
3	B3	372.6	268.9	13.5	30.0	16.9	0.4
4	B4	371.1	103.3	3.0	5.8	3.9	1.0
5	B5	372.0	212.0	13.0	28.2	12.5	1.4
6	B6	374.6	75.2	1.5	17.5	6.3	2.0
7	B7	350.7	241.4	17.5	30.0	23.3	0.3
8	B8	380.1	95.8	1.0	3.9	3.7	0.9
9	B9	372.5	149.2	3.0	13.1	4.0	1.0
10	B10	365.8	99.7	4.0	15.9	4.2	1.5
11	K11	390.8	359.2	27.0	29.4	13.4	0.0
12	K12	373.4	307.8	1.0	30.0	1.8	0.3
13	K13	370.4	227.7	1.2	29.4	8.0	0.1
14	K14	377.8	87.2	0.5	10.0	2.0	2.3
15	K15	377.6	358.7	40.0	30.0	11.7	1.1
16	K16	378.2	157.8	11.0	26.2	5.9	0.7
17	K17	346.6	61.3	0.5	14.0	2.6	3.2
18	U18	378.6	115.6	1.5	11.3	2.3	0.6
19	U19	369.7	68.3	1.4	4.1	2.3	0.9
20	U20	373.6	190.8	4.3	17.8	8.6	0.6
21	U21	377.4	66.7	0.7	5.0	1.1	0.6
22	U22	378.5	95.7	1.7	9.2	6.7	1.4
23	U23	378.1	87.2	1.2	12.5	4.9	1.3
24	U24	382.8	99.8	4.0	14.3	5.7	0.7
25	U25	384.8	58.6	3.6	8.0	3.7	0.7
26	U26	377.7	99.2	3.0	12.3	5.5	1.2
27	U27	377.2	94.0	0.5	13.3	4.7	2.9
28	O28	378.5	162.4	1.5	9.0	3.2	1.0
29	O29	378.5	53.9	0.5	4.8	1.8	1.3
30	O30	377.5	367.1	38.5	21.8	10.0	0.0
31	O31	378.1	89.7	1.0	8.3	2.8	1.2
32	O32	379.5	52.9	0.2	5.1	2.2	1.1
33	O33	378.5	315.2	12.0	35.6	18.4	0.8
34	O34	378.5	57.9	0.2	8.9	2.0	1.2
35	O35	378.5	85.6	0.5	15.0	2.9	1.7
36	O36	378.5	366.1	22.5	35.9	19.1	0.1
37	G37	380.6	29.0	1.3	1.9	1.7	0.7
38	G38	378.5	92.1	3.5	7.9	3.5	0.5
39	G39	378.5	231.5	17.2	17.8	2.5	0.3
40	G40	378.5	183.7	13.5	18.1	5.0	0.4
41	G41	380.5	27.8	1.2	3.3	1.2	1.0
42	G42	379.5	34.6	1.3	7.4	2.6	1.2
43	G43	378.5	51.5	2.6	6.1	2.6	1.6
44	G44	378.5	76.5	4.0	3.7	3.0	0.8
45	G45	373.8	51.3	4.4	7.0	2.5	0.8
46	G46	377.7	90.4	0.2	12.6	1.1	0.6
47	G47	378.5	50.8	0.3	7.4	2.2	1.7
48	G48	376.6	64.8	1.7	18.3	5.9	0.8

Tableau 1 - Valeurs de pluie et d'infiltration obtenues sur les parcelles.

1.1.2 Etude des corrélations.

Le tableau 2 donne la matrice des coefficients de corrélation entre ces cinq variables.

	L1	K2	IS	IH
L1	1.00000 0.0000	0.82057 0.0001	0.86620 0.0001	0.73992 0.0001
K2	0.82057 0.0001	1.00000 0.0000	0.63101 0.0001	0.64679 0.0001
IS	0.86620 0.0001	0.63101 0.0001	1.00000 0.0000	0.78577 0.0001
IH	0.73992 0.0001	0.64679 0.0001	0.78577 0.0001	1.00000 0.0000

Tableau 2 - Matrice des coefficients de corrélation avec test de signification (48 observations).

Le coefficient de corrélation entre lame infiltrée L1 et détention superficielle récupérable DR (- 0,51), bien que significatif au seuil de 1%, est faible en comparaison des autres.

L1 est très bien corrélée au coefficient d'infiltration K2 et à la pluie d'imbibition sur sol sec IS.

Les graphiques représentant $L1 = f(K2)$ et $L1 = f(IS)$ montrent que la première relation est de la forme $L1 = a * \text{Log}(K2) + b$, tandis que la seconde est linéaire. L'indépendance des variables $\text{Log}(K2)$ et IS ($R^2 = 0.41$) et la normalité des variables L1, $\text{Log}(K2)$ et IS permettent de calculer la régression suivante :

$$L1 = a * \text{Log}(K2) + b * IS + c$$

avec un coefficient de corrélation multiple de : $R = 0.898$ pour 48 observations.

Cette relation montre que la lame infiltrée est fonction de l'intensité d'infiltration à saturation et de la quantité d'eau nécessaire au sol avant d'arriver à un régime permanent d'infiltration, ces deux grandeurs étant indépendantes.

1.2 LES CARACTERISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES DE LA PARCELLE

Toutes les variables décrites dans ce chapitre proviennent de mesures simples de terrain, aucun moyen d'analyse en laboratoire n'ayant été utilisé.

Un inventaire le plus exhaustif possible des caractères pouvant influencer l'infiltration a été tenté sur chaque parcelle, et une méthode de mesure ou d'appréciation a été établie.

La description des parcelles implique la séparation en trois groupes de variables :

- les caractéristiques de recouvrement du sol.
- les organisations superficielles du sol.
- la description du profil pédologique représentatif de la parcelle.

1.2.1 Les caractéristiques de recouvrement du sol.

- la couverture végétale en place (R3); elle a été estimée sur le terrain en pourcentage de la surface de la parcelle. Elle peut être vérifiée sur photographie de la parcelle.
- la couverture par la litière (R4); il s'agit des végétaux morts jonchant la parcelle : tiges ou feuilles de mil, tapis de graines ou de feuilles de graminées ... R4 est exprimé en pourcentage par la même méthode que R3.
- la couverture en gravillons libres (R5). Cette variable concerne les gravillons posés à la surface de la parcelle sans être inclus dans le sol. Elle est exprimée en pourcentage d'occupation par estimation sur le terrain.
- la couverture en sable éolien (R6). L'épaisseur de sable libre est mesurée en plusieurs points de la parcelle et la moyenne de ces mesures donne la valeur de R6 pour la parcelle considérée.

1.2.2 Les organisations superficielles du sol.

- le microrelief (07, 08) :

* 07 est l'amplitude moyenne du microrelief mesuré sur le terrain en cm.

* 08 est une appréciation du degré d'obstruction au ruissellement due au microrelief (note variant de 0 à 4)

- les micro-organismes végétaux sur la surface (09) :

* Cette variable décrit la présence de mousses ou d'algues microscopiques donnant une couleur bleu - gris à la surface. (note de 0 à 3)

- l'activité de la mésofaune (010, 011) :

* 010 est une appréciation de l'activité faunique : présence de fourmilière, du travail des termites, de turricules de vers de terre ... (note de 0 à 3)

* 011 représente une appréciation du degré d'ouverture de la porosité due à l'activité de la mésofaune. (note de 0 à 3)

- les gravillons enchassés (012) :

* C'est un pourcentage estimé sur le terrain de gravillons pris dans une matrice; il faut faire un effort pour les décoller.

- les fentes (013) :

* 013 est une appréciation du nombre et de l'épaisseur des fentes de retraits sur la parcelle sèche. (note de 0 à 2)

- l'hydromorphie de la surface (014) :

* C'est une estimation de l'état d'hydromorphie de la surface du sol en comptant les tâches ou les critères d'hydromorphie.

- la pellicule de surface (015, 016, 017, 018, 019) :

* 015 représente la prise en masse des sables, à partir d'une appréciation de la rigidité du complexe sable - limon - argile en surface uniquement et avant la pluie. (note de 0 à 3)

* 016 décrit la porosité vésiculaire par une estimation du nombre et de la grosseur des traces de bulles d'air sous la pellicule. (note de 0 à 3)

* 017 concerne la continuité de la pellicule de surface sur la parcelle. (note de 0 à 3)

* 018 représente l'épaisseur de la pellicule en 4 classes notées de 0 à 3.

* 019 polygénisme : notation visuelle de la superposition de systèmes pelliculaires. (note de 0 à 3)

- l'érosion (020) :

* 020 est une estimation à vue de l'érosion entre le début et la fin du protocole de pluie. (note de 0 à 4)

1.2.3 La description du profil pédologique.

- la profondeur d'apparition d'un horizon à faible drainage (S21) :

* Les valeurs de profondeur en cm ont été regroupées en 4 classes notées de 0 à 3.

- la texture de l'horizon 0 - 20 cm (S22).

* S22 représente le pourcentage de sable et d'argile, estimé au toucher sur le terrain. (classes de 0 à 3)

- la porosité de l'horizon 0 - 20 cm (S23).

* S23 est une note de 0 à 3.

- les traces d'hydromorphie de l'horizon 0 - 20 cm (S24).

* S24 est une note de 0 à 3.

- les classes de drainage selon BOULET (1976), pour les sols du Burkina (S25).

1.2.4 Les relations entre ces variables.

Le calcul d'une matrice des coefficients de corrélation permet de voir quelques liaisons très fortes entre certaines variables et des tendances plus générales, bien que l'interprétation des valeurs reste peu fiable vu les répartitions multi-modales de la majorité des variables.

Le pourcentage de couverture végétale et l'activité biologique sont très liés ($R = 0.74$ pour 48 observations). Cette relation est encore plus forte si on considère un seuil de 40% pour la végétation R3 ($R = 0.96$ pour 10 observations). Il est intéressant de noter également une forte corrélation négative de R3 avec la variable représentant l'érosion.

Les coefficients de corrélation sont tous négatifs entre R3 et les variables caractérisants les organisations pelliculaires de surface.

Les critères choisis pour décrire le profil pédologique sont liés entre eux; les variables S21, profondeur d'apparition d'un horizon à faible drainage, et S25, classes de drainage peuvent décrire assez bien les autres paramètres. L'hydromorphie de surface est très corrélée à celle du premier horizon du sol.

1.3 METHODES D'ANALYSE

Pour caractériser par un minimum de variables chaque parcelle et hiérarchiser ces caractères vis à vis de l'infiltration, nous utiliserons les "outils" de l'analyse des données : l'Analyse en Composantes Principales et l'Analyse Factorielle des Correspondances (CAILLET et PAGES, 1976).

L'Analyse en Composantes Principales (en abrégé ACP) a été appliquée à la matrice des données telle qu'elle a été définie dans les paragraphes précédents. C'est une méthode de réduction du nombre de variables permettant des représentations géométriques des parcelles et des variables. Cette réduction ne se fait pas par une sélection de certaines variables, mais par la construction de nouvelles variables synthétiques obtenues en combinant les variables initiales au moyen de "facteurs" (BOUROCHE et SAPORTA, 1983).

Les nouvelles variables définissent des axes principaux à l'intérieur du nuage des données, et les représentations sur les axes nous permettront d'effectuer des regroupements en classe de parcelles "proches" et en classes de variables ayant un comportement similaire. Nous chercherons une signification physique aux premiers axes de l'analyse, et nous étudierons le comportement des variables d'infiltration par rapport aux caractéristiques des parcelles.

Comme l'ACP, l'Analyse Factorielle des Correspondances (en abrégé AFC) propose une représentation de faible dimension du tableau des données. Mais elle s'applique de préférence aux variables qualitatives et traite symétriquement et simultanément les lignes et les colonnes du tableau. L'AFC nous permet d'intégrer dans la matrice des données des variables non hiérarchisées.

Les variables de notre étude sont hétérogènes (par exemple les notes caractérisant l'érosion sont comparées aux mesures d'infiltration et aux types d'occupation des sols). Nous avons employé la technique du codage disjonctif complet qui consiste à substituer à chaque variable un nombre fixé de modalités qualitatives exclusives (ou classes).

Pour la mise en place de l'AFC nous n'avons introduit que les six variables ci-dessous :

- La perméabilité est appréciée par la division en trois classes des valeurs de la lame infiltrée (L1).

- Le type d'occupation du sol est caractérisé par 6 classes décrites dans ALBERGEL et BERNARD (1984b) : sol nu, végétation naturelle, culture, brûlis, cailloux, traitement standard (labour manuel sur 10 centimètres).

- Les deux paramètres du microrelief (O7 et O8) sont remplacés par trois classes.

- L'activité de la mésofaune (O10 et O11) se réduit à deux classes : pas ou peu d'activités biologiques par opposition à traces importantes d'un travail faunique.

- La variable "érosion" (O20) est divisée en trois classes.

- A partir des variables caractérisant les organisations pelliculaires de surface, cinq classes ont été définies.

* Classe 1 : pas d'organisation pelliculaire de surface (moins de 25% de la surface concernée).

* Classe 2 : pellicule fine, peu individualisée par rapport au matériau sous-jacent.

* Classe 3 : pellicule consolidée, fine, nettement individualisée et surmontée d'un mince microhorizon sableux discontinu.

* Classe 4 : pellicule sur sable; succession de trois microhorizons nettement individualisés quant à leur granulométrie : sable grossier lâche, sable fin cimenté présentant une porosité vésiculaire, pellicule plasmique à porosité vésiculaire.

* Classe 5 : pellicule plasmique, argilo-limoneuse, épaisse à forte porosité vésiculaire et présentant souvent un polygénisme.

- Pour caractériser la coupe pédologique, nous conservons les classes de drainage S25 définies par BOULET (1976).

2. ANALYSE DES VARIABLES

2.1. RESULTATS DE L'AFC

Les 4 premiers axes expliquent 50% de l'inertie totale du nuage des données (tab. 3).

INUM	VAL PROPRE	POURCENT	CUMUL	COURBE REPRESENTATIVE
1	0.52041387	18.214	18.214	*****
2	0.39459197	13.811	32.025	*****
3	0.26829501	9.390	41.416	*****
4	0.24241690	8.485	49.900	*****
5	0.21790522	7.627	57.527	*****
6	0.19743746	6.910	64.437	*****

Tableau 3 - AFC : Valeurs propres (valeur triviale : 1.0000).

Le premier axe oppose les classes de forte infiltration, d'occupation des sols en végétation naturelle, d'absence de pellicule, d'existence de pellicule fine (classe 2) à celles d'infiltration la plus faible, d'absence d'activité mésofaunique, d'érosion moyenne et de classe de sols peu drainants.

L'évolution des trois classes d'infiltration le long de ce premier axe nous permet de l'interpréter comme un axe d'infiltration. Le second axe représente surtout les occupations des parcelles, et oppose nettement les sols cultivés aux autres. Les axes suivants moins bien caractérisés peuvent cependant être interprétés de la façon suivante :

- Axe 3 : axe des pellicules.
- Axe 4 : axe des sols.

Les variables qui contribuent le plus sur ces quatre axes sont :

- Les classes d'infiltrations extrêmes (Axe 1).
- La présence d'activité mésofaunique (Axe 1).
- Tous les types d'occupation des sols (Axe 1 à 4).
- Les classes d'organisations pelliculaires : absence, fines consolidées, argilo-limoneuses (Axe 1 à 4).
- Les classes d'érosion (Axe 2).
- La classe 6 des sols les moins drainants (Axe 4).

La figure 3 présente la projection de l'ensemble des variables sur le plan défini par les axes 1 et 2. L'axe d'infiltration sépare sur ce plan 3 groupes, tandis qu'un quatrième est mis en évidence par l'axe 2.

Notons la position relative des classes d'occupation du sol par rapport à l'infiltration; dans l'ordre croissant nous trouvons les cailloux AV5, le sol nu AV1, le traitement standard AV6, la culture AV3, les brûlis AV4, la végétation naturelle AV2. Par leur position proche sur l'axe 1, on peut envisager de réduire ce nombre de classe en confondant recouvrement "cailloux" et sol nu, traitement standard et sol cultivé, brûlis et végétation.

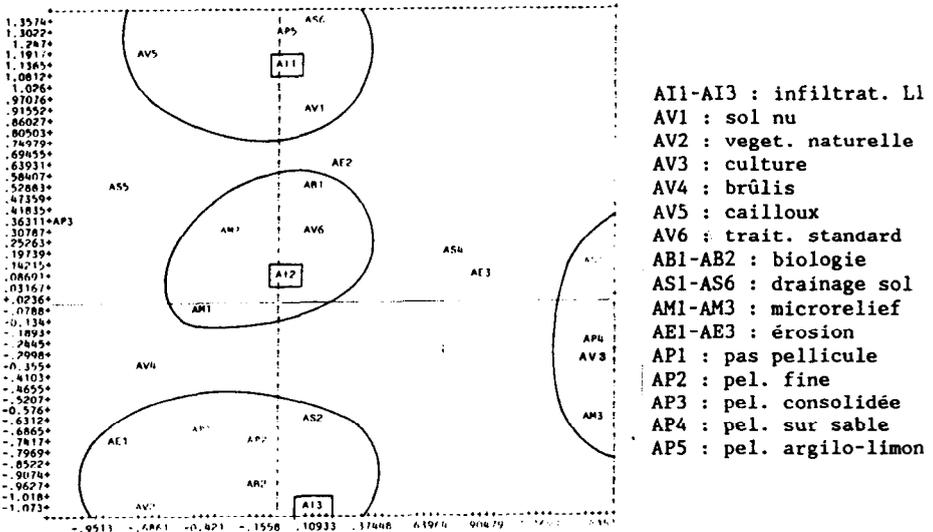


Figure 3 - AFC : représentation des variables dans le plan des axes 1 (vertical) et 2 (horizontal).

Remarquons que la classe d'organisations pelliculaires de surface la plus proche des faibles valeurs de l'infiltration AI1 est celle des pellicules argilo-limoneuses à forte porosité vésiculaire AP5. L'absence de pellicules AP1, ou les pellicules fines et peu individualisées AP2 se rapprochent des fortes valeurs AI3. La présence d'activité de la mésofaune varie dans le même sens que l'infiltration. Les classes de drainage des sols AS1 à AS6 sont moins bien représentées sur l'axe 1.

Le quatrième groupe mis en évidence par l'axe 2 est remarquable : caractérisé par la variable "sol cultivé", il intègre deux variables qui devraient être très favorables à l'infiltration : fort microrelief AM3 et classe de sol 1 (drainage interne et externe libre sur tous les horizons). Ce groupe se situe pour des valeurs moyennes de l'infiltration. La classe 4 des pellicules sableuses AP4 qui se superpose à la classe des sols cultivés AV3 peut être interprétée comme la résultante du travail du sol et devient le facteur limitatif de l'infiltration.

2.2 RESULTATS DE L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

2.2.1 Tableau global

Dans une première étape on a utilisé l'ACP sur l'ensemble des variables et

l'ensemble des observations pour confirmer les résultats de l'analyse des correspondances et affiner les regroupements des variables.

L'ensemble des quatre premiers axes représentent 58% de l'inertie totale du nuage de points (tab. 4).

NUM	VAL PROPRE	POURCENT	CUMUL	COURBE REPRESENTATIVE
1	7.35212	26.258	26.258	*****
2	6.02932	18.190	40.648	*****
3	2.85556	10.198	50.846	*****
4	1.97109	7.040	57.886	*****
5	1.78211	6.365	64.251	*****
6	1.55035	5.537	69.788	*****

Tableau 4 - ACP : valeurs propres avec 28 variables.

L'étude des contributions relatives de chaque variable à l'inertie totale le long des axes qu'elles définissent permet de bien caractériser les quatre premiers axes.

- axe 1 : infiltration
- axe 2 : érosion et sol
- axe 3 : organisations pelliculaires de surface
- axe 4 : microrelief

La figure 4 montre la projection de toutes les variables sur le plan défini par les axes 1 et 2.

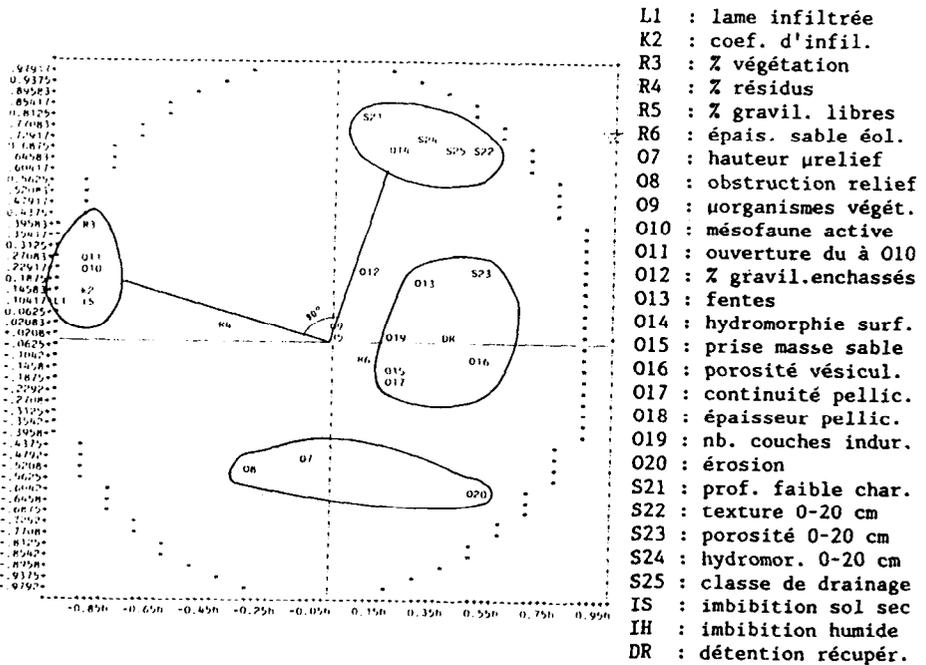


Figure 4 - ACP avec 28 variables actives : représentation des variables dans le plan des axes 1 (horizontal) et 2 (vertical).

Le premier axe sépare nettement les variables qui favorisent l'infiltration de celles qui s'y opposent. Les variables d'infiltration L1, K2, IS et IH se regroupent à une extrémité de cet axe. Dans ce même groupe se retrouvent les variables : pourcentage de couverture végétale (R3), activité de la mésofaune (O10), et degré d'ouverture due à celle-ci (O11). A l'autre extrémité apparaissent le degré de porosité vésiculaire des organisations pelliculaires de surface (O16) sur l'axe même et différencié par le second axe les variables érosion (O20), porosité de l'horizon 0 - 20 cm (S23) et texture (S22).

Deux ensembles de variables sont bien séparés par l'axe 2 : le premier regroupe les caractères du profil pédologique (S21, S22, S24, S25) et l'hydromorphie de surface (O14). Les deux variables du microrelief (O7 et O8) et celle de l'érosion (O20) appartiennent au second groupe.

L'angle droit qui sépare les groupes de variables "infiltration" et "sol" sur ce plan montre l'indépendance entre ces deux sous-ensembles.

Remarquons que parmi les variables descriptives des organisations pelliculaires de surface, la plus liée à l'infiltration est la porosité vésiculaire (O16). Toutes les caractéristiques de pellicules (O15 à O19) forment un groupe sur l'axe d'infiltration assez proche du centre et incluant la détention superficielle récupérable (DR).

Sur l'axe des sols, la profondeur d'apparition d'un horizon à faible drainage (S21) a la contribution la plus forte.

Certaines variables sont mal représentées dans l'espace défini par les quatre premiers axes. D'autres se regroupent en regard de leur contribution à ces axes (groupe homogène dans un espace à quatre dimensions). Ces deux remarques nous ont amené à réduire le tableau d'entrée pour ne conserver que des variables bien représentées sur l'un des quatre premiers axes et peu reliées entre elles.

2.2.2 Réduction des variables

Neuf variables ont moins de 50% de leur inertie définie sur les quatre premiers axes de l'ACP; il s'agit de R4, R5, R6, O9, O12, O13, O15, S22 et DR.

Les groupes de variables homogènes dans l'espace à quatre dimensions sont :

- lame infiltrée L1, coefficient d'infiltration K2, lame d'imbibition sur sol sec IS et sur sol humide IH et pourcentage de végétation R3. Nous ne conservons que R3 pour prévoir un ordre de grandeur de l'infiltration par une caractéristique de la parcelle.

- Les variables de microrelief, importance O7 et obstruction O8. Nous éliminons O8 qui a une contribution moins forte à l'inertie de l'axe d'infiltration.

- Les variables caractérisant l'activité de la mésofaune, O10 et le degré d'ouverture O11. Ces deux variables bien corrélées entre elles ont une contribution équivalente à l'inertie de l'axe d'infiltration. Nous éliminons O11 dont l'appréciation est plus délicate.

- Certaines caractéristiques de pellicules, O17, O18 et O19. Nous conservons O18, épaisseur de la pellicule, grandeur mesurable, bien que toutes trois aient la même contribution sur l'axe d'infiltration.

- Les caractéristiques d'hydromorphie et de sol, O14, S21, S23, S24 et S25. Comme nous l'avons souligné au paragraphe 1.2.4, les deux variables profondeur d'apparition d'un horizon à faible drainage S21 et classe de drainage S25 peuvent représenter ces cinq variables.

- La porosité vésiculaire O16 se détache des autres caractéristiques des organisations pelliculaires et a une contribution plus importante à l'inertie de l'axe d'infiltration.

- La caractéristique d'érosion O20 reste isolée et a une forte contribution sur les axes 1 et 2.

En résumé, il faut au minimum 8 variables pour caractériser une parcelle vis à vis de l'infiltration :

- * R3 : pourcentage de la surface couverte par la végétation.
- * O7 : mesure moyenne du microrelief.
- * O10 : estimation de l'activité biologique.
- * O16 : porosité vésiculaire de la pellicule de surface.
- * O18 : épaisseur de la pellicule de surface.
- * O20 : érosion.
- * S21 : profondeur d'un horizon à faible drainage.
- * S25 : classe de drainage des sols.

Nous avons fait une nouvelle ACP réduite en utilisant ces huit variables et en conservant les autres comme variables supplémentaires (elles ne serviront pas à définir les axes mais seront représentées sur les graphes).

Le tableau 5 montre que 86 % de l'inertie totale du nuage est expliquée par les quatre premiers axes.

NUM	VAL PROPRE	POURCENT	CUMUL	COURBE REPRESENTATIVE
1	2.82348	35.293	35.293	*****
2	1.99411	23.801	59.095	*****
3	1.35925	16.991	76.085	*****
4	0.82863	10.360	86.446	*****
5	0.388097	4.851	91.297	*****
6	0.279513	3.494	94.791	*****

Tableau 5 - ACP : valeurs propres avec 8 variables.

Le premier axe qui oppose la couverture végétale et l'activité biologique à l'érosion et la porosité vésiculaire de la pellicule est l'axe d'infiltration. L'axe 2 est défini par les variables sols et microrelief. Le troisième axe caractérise les pellicules et le quatrième le microrelief et l'épaisseur de la pellicule.

Si on compare la figure 5 (plan 1-2 de l'ACP réduite) à la figure 4 (plan 1-2 de l'ACP sur le tableau complet), on remarque :

- la projection des variables sur l'axe d'infiltration reste à peu près identique.
- les regroupements de variables sont presque les mêmes.
- l'inversion des variables ayant les plus fortes contributions sur l'axe 2 : le groupe des sols (S21 à S25) est maintenant relié négativement à cet axe, par opposition au microrelief (07 et 08) et à l'érosion (020). Cette inversion ne transforme pas la signification des axes.

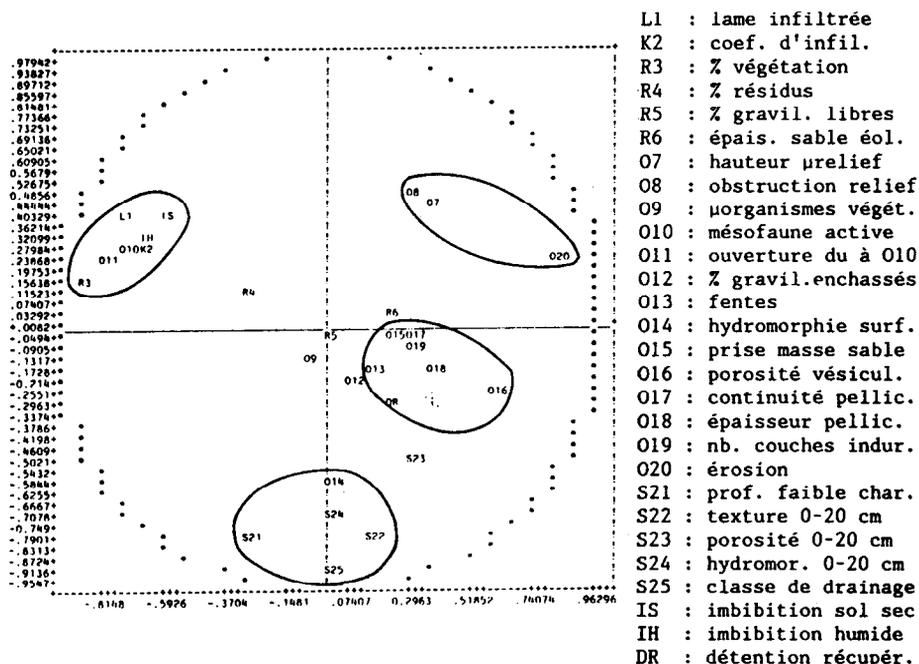


Figure 5 - ACP avec 8 variables actives : représentation des variables actives et supplémentaires dans le plan des axes 1 (horizontal) et 2 (vertical).

Un résultat important peut encore être signalé :

- Plan 2-3 : les descriptions des organisations superficielles (O15 à O19) sont indépendantes de celles du profil pédologique (S21 à S25). Cette remarque

Les variables d'infiltration contribuent modestement aux inerties des quatre premiers axes et n'en définissent aucun en particulier. Pour cet ensemble d'observations on peut donc dire que les composantes qui en font la diversité sont celles qui décrivent le profil pédologique sans pour autant induire une diversité parallèle dans l'infiltration.

Sur la figure 6 on peut observer l'alignement des variables d'infiltration sur un segment de droite parallèle à la première bissectrice et défini à ses extrémités par la lame infiltrée (L1) et le groupe des organisations pelliculaires (O16, O17, O18 et O19). On en conclut que pour ce sous ensemble l'infiltration, toujours faible est très liée aux organisations pelliculaires de surface.

- ACP sur les observations "culture et traitement standard" (fig. 7).

Les deux premiers axes sont très influencés par les variables d'infiltration. Il est remarquable d'observer le coefficient d'infiltration à saturation K2 en opposition sur l'axe 1 aux variables sols et les lames d'imbibition IS et IH en opposition sur l'axe 2 aux organisations pelliculaires de surface (O16, O17, O19).

La lame infiltrée L1 se trouve entre K2 et les lames d'imbibition IS et IH. Proche de IS et IH, on retrouve le microrelief (O7 et O8) et proche de K2 la litière (R4) importante sur les sols cultivés,

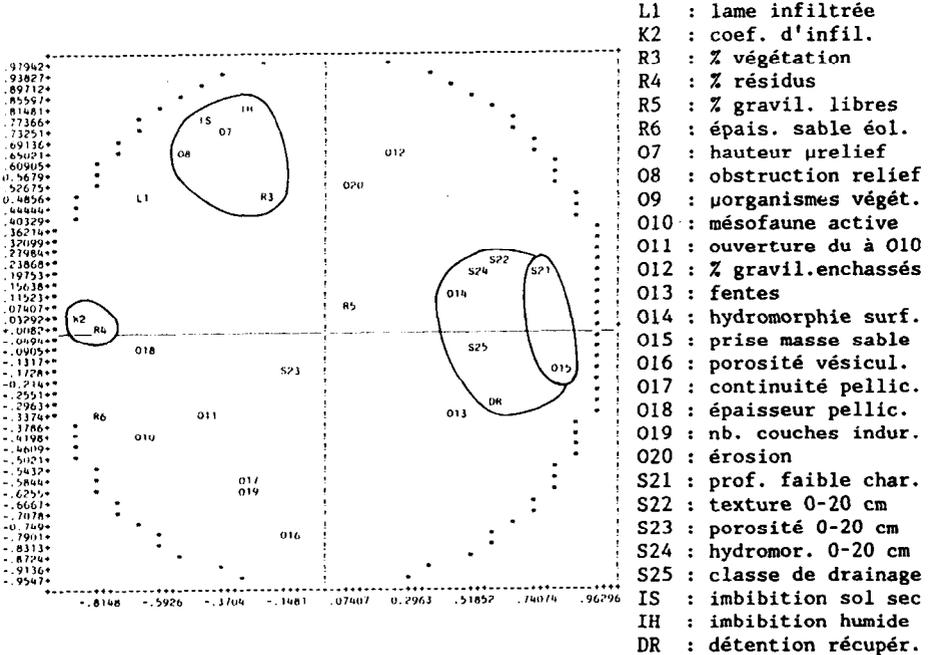


Figure 7 - ACP des 13 observations "culture et traitement standard" représentation des variables dans le plan des axes 1 (horizontal) et 2 (vertical).

Le rapprochement de l'épaisseur de la pellicule O18 et du coefficient d'infiltration à saturation K2 peut paraître contradictoire. Sur les sols travaillés, on remarque toujours la formation de pellicules; les pellicules sur sable (dune de GAGARA) sont les plus épaisses mais elles freinent moins l'infiltration que les pellicules argilo-limoneuses.

Sur cet ensemble d'observations, on peut conclure que la lame infiltrée totale est la résultante de deux grandeurs : pluie d'imbibition et intensité d'infiltration à saturation. La première est croissante en fonction du microrelief et décroissante en fonction des organisations pelliculaires. La seconde est d'autant plus élevée que la litière est importante et que les horizons pédologiques sont plus drainants.

- ACP sur les observations "végétation naturelle et brûlis" (fig. 8).

L'axe 1 est nettement l'axe d'infiltration et l'axe 2 celui des organisations pelliculaires (O15 à O19). Les variables sols (S21 à S25) décrivent un arc de cercle sur un quart du plan et ne marquent pas réellement les deux premiers axes. Le pourcentage de couverture végétale R3 et l'activité de la mésofaune O10 et O11 sont très liés à l'infiltration. La détention superficielle récupérable DR s'oppose très nettement à la couverture végétale et se trouve légèrement favorisée par les organisations pelliculaires.

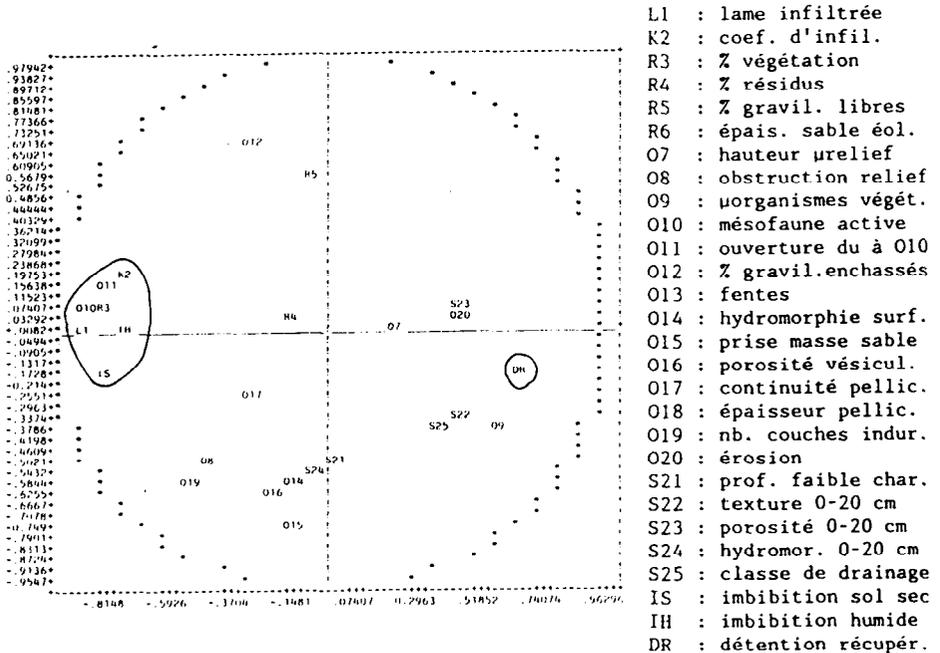


Figure 8 - ACP des 18 observations "végétation naturelle et brûlis" représentation des variables dans le plan des axes 1 (horizontal) et 2 (vertical).

La lame infiltrée L1, sur l'axe 1 résulte d'une contribution équivalente de l'intensité d'infiltration à saturation K2 et de la pluie d'imbibition sur sol sec IS toujours importante. La contribution de K2 sur l'axe 2 s'explique par la présence de gravillons libres R5 ou enchâssés O12. K2 est défavorisée par la porosité vésiculaire de la pellicule O16 et par la prise en masse des sables O15. La corrélation négative de IS avec l'axe 2 s'explique par l'obstruction du microrelief O8 dont elle se rapproche.

En dernière étape de cette étude, il faut analyser le comportement des parcelles observées par rapport aux variables, en particulier l'infiltration, et vérifier l'homogénéité des regroupements d'observations.

3. ANALYSE DES OBSERVATIONS

Tous les résultats décrits dans le chapitre précédent de l'analyse des variables se retrouvent dans l'analyse des observations. Nous ne soulignerons ici que des particularités ou des compléments d'informations qu'apportent la représentation des parcelles sur les plans de l'ACP ou de l'AFC.

3.1 QUALITE DES REPRESENTATIONS

Pour chaque analyse, nous avons vérifié que toutes les parcelles ont des contributions équivalentes à l'inertie du nuage de points. De plus l'appartenance à un bassin ne privilégie aucun regroupement.

En conséquence, les différences climatiques et écologiques entre bassins n'entraînent pas d'hétérogénéité dans l'échantillon étudié qui peut être considéré comme représentatif d'une même population.

3.2 L'AXE D'INFILTRATION.

Une constance des études précédentes est la stabilité d'un axe d'infiltration apparaissant dans l'AFC et dans les différentes ACP.

La projection des parcelles identifiées par leurs lames infiltrées L1 sur le premier plan de l'ACP (fig. 9), montre un bon ordonnancement sur le premier axe. Les quelques exceptions sont expliquées par des valeurs extrêmes du coefficient d'infiltration K2. Cette remarque montre que le premier axe est lié à la fois à L1 et à K2; il représente une fonction "infiltration".

Nous avons alors vérifié que les coordonnées des parcelles sur le premier axe de l'ACP réduites aux 8 variables de la description physique de la parcelle donnent des valeurs de capacité d'infiltration très bien corrélées à L1 ($R = 0.71$) et K2 ($R = 0.64$).

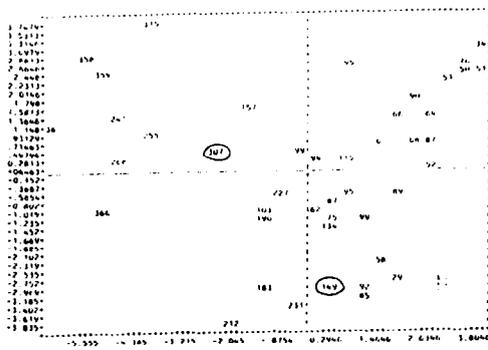


Figure 9 - ACP : représentation des observations identifiées par leur valeur de la lame infiltrée L1 dans le plan des axes 1 (horizontal) et 2 (vertical).

3.3 L'OCCUPATION DES PARCELLES.

Le regroupement des parcelles sur le premier plan de l'AFC en trois groupes est très net (Fig. 10). Notons dans l'ensemble des sols nus, le sous-ensemble distinct des parcelles sur cailloux avec une seule parcelle qui s'éloigne (Kuo 18). Cette dernière a la particularité d'avoir une couverture en éléments grossiers libres et non inclus dans la matrice de l'horizon de surface. Ceci explique sa position plus médiane sur l'axe d'infiltration.

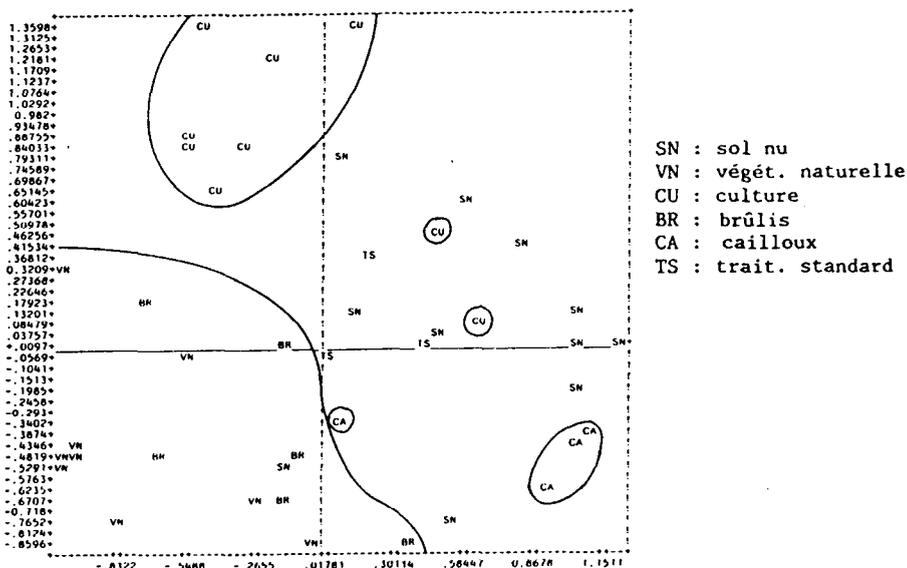


Figure 10 - AFC : représentation des 48 observations identifiées par leur type d'occupation des sols dans le plan des axes 1 (horizontal) et 2 (vertical).

Les trois observations sur traitement standard sont à mi-chemin entre les sols nus et les sols cultivés. On peut enfin noter que les parcelles sur brûlis font la transition entre la végétation naturelle et les sols nus.

Sur les plans définis par les axes 1 et 3 (infiltration / érosion pellicules) les parcelles se positionnent en fonction d'une variable qui n'a pas été considérée dans cette étude : position de la parcelle sur le versant (Fig.11). Les parcelles de bas fond se retrouvent dans un quart de plan tandis que celles de sommet de formes décrivent un croissant dans les trois quarts de plan restants. Les observations de mi-pente forment un groupe intermédiaire.

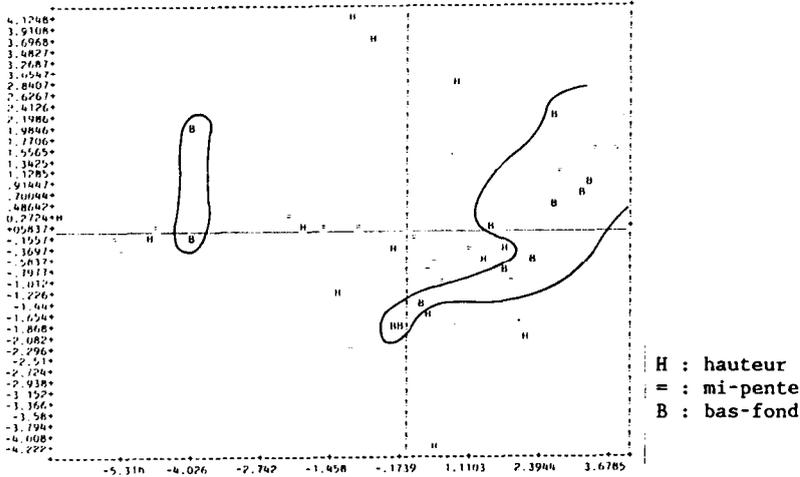


Figure 11 - ACP : représentation des 48 observations identifiées par leur position sur le versant dans le plan des axes 1 (horizontal) et 3 (vertical).

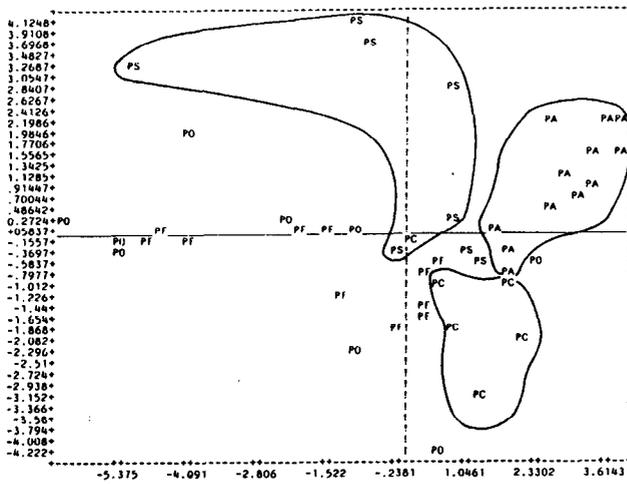
3.4 LES ORGANISATIONS PELLICULAIRES DE SURFACE.

En prenant comme identificateur la classe des organisations pelliculaires de surface, la projection sur le plan défini par les axes 1 et 3 (infiltration / pellicules) de l'ACP (Fig. 12) montre :

- L'axe d'infiltration oppose surtout l'absence d'organisation pelliculaire de surface (P0) et les pellicules fines non individualisées (PF) aux pellicules argilo-limoneuses (PA).

- L'axe des organisations pelliculaires différencie surtout les pellicules sur sable (PS) aux pellicules consolidées (PC). Leurs projections sur l'axe d'infiltration sont proches de l'origine (valeurs faibles), sauf la parcelle Boulsa 36 (pellicule sur sable ayant une coordonnée fortement négative sur l'axe 1) dont la position s'explique par sa forte occupation en végétation naturelle.

Boulsa 36 a été installée sur végétation naturelle en bordure d'un champ. Il est fort probable qu'elle était cultivée les années précédentes, d'où présence d'organisations pelliculaires de surface. La reprise récente de la végétation naturelle n'a pas encore induit la disparition de la pellicule mais a déjà instauré une forte porosité.

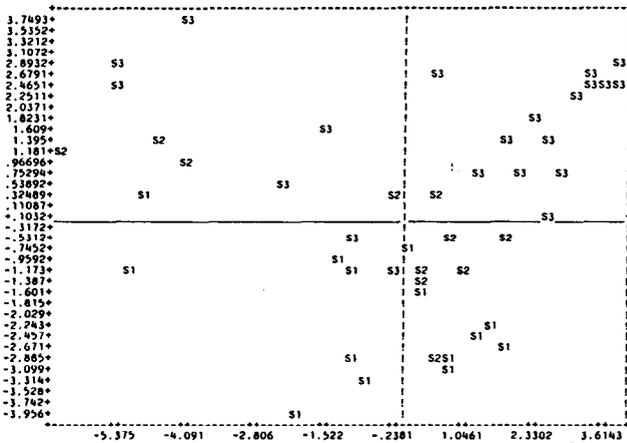


PO : absence pellicule
 PF : pellicule fine
 PC : pell. consolidée
 PS : pell. sur sablee
 PA : pell. argilo-limon

Figure 12 - ACP : représentation des 48 observations identifiées par les pellicules de surface dans le plan des axes 1 (horizontal) et 3 (vertical).

3.5 LA NATURE PEDOLOGIQUE DES SOLS.

Sur le premier plan de projection de l'ACP (Fig. 13) les parcelles sont identifiées par la profondeur d'apparition d'un horizon à faible drainage. L'axe d'infiltration ne sépare pas les parcelles par ce critère qui est pourtant le plus représentatif des variables "sols". Ceci confirme l'idée déjà mise en relief : la nature du profil pédologique n'influence que très peu les phénomènes d'infiltration dans notre zone d'étude.



S1 : prof. > 40 cm
 S2 : 20 < prof. < 40
 S3 : prof. < 20 cm

Figure 13 - ACP : représentation des 48 observations identifiées par la profondeur d'apparition d'un horizon à faible drainage dans le plan des axes 1 (horizontal) et 2 (vertical).

CONCLUSION

Cette réflexion sur les facteurs explicatifs de l'infiltration au Burkina a mis en relief l'aspect prépondérant de l'occupation du sol. Elle a montré l'importance du couvert végétal et donné les paramètres ayant une influence sur l'infiltration.

- Sur les parcelles en végétation naturelle, le pourcentage de couverture à laquelle est liée l'activité de la mésofaune est la donnée prédominante expliquant l'infiltration.

- Sur les sols nus, les variations observées de l'infiltration peuvent s'expliquer par la nature des organisations pelliculaires de surface et par la couverture gravillonnaire. Mais les valeurs de l'infiltration restent faibles pour ce type d'occupation du sol. Les analyses mettent surtout en évidence la diversité des sols pour séparer les parcelles.

- Sur les sols cultivés, la lame infiltrée est la résultante de deux variables dont les poids sont équivalents : la pluie d'imbibition et le coefficient d'infiltration à saturation. Les variations de la première sont liées au microrelief et aux organisations pelliculaires tandis que la seconde s'explique surtout par l'abondance de la litière favorable au développement biologique et par la profondeur d'apparition d'un horizon à faible drainage. Notons que sur l'ensemble de notre champ expérimental, les techniques culturales utilisées sont très voisines (travail traditionnel du sol). Cela explique le bon regroupement des parcelles caractérisées par ce type d'occupation.

Sur l'ensemble des parcelles cinq paramètres sont donc à prendre en compte pour caractériser l'infiltration : pourcentage de la surface couverte par la végétation, mesure moyenne du microrelief, estimation de l'activité biologique, porosité vésiculaire dans les organisations pelliculaires de surface, épaisseur de la pellicule. Trois autres variables moins liées à l'infiltration doivent être ajoutées pour expliquer la diversité de notre échantillon : érosion, profondeur d'un horizon à faible drainage et classe de drainage des sols.

A partir des bassins étudiés par d'autres équipes de l'ORSTOM cette analyse pourra être généralisée à l'ensemble des zones soudanaises et sahéliennes.

A l'échelle du bassin ces huit variables peuvent être cartographiées à un instant donné; Leurs variations saisonnières et interannuelles doivent être prises en compte. L'infiltration apparaît être une grandeur plus liée à l'écologie du milieu qu'à sa nature physique au sens strict.

La prévision de l'aptitude au ruissellement d'un bassin devra donc résulter d'une étude fine des états de surfaces et de leurs variations dans l'espace et dans le temps.

BIBLIOGRAPHIE

- ALBERGEL (J) - BERNARD (A), 1984a. Calage du modèle simulateur. Prévision de la crue décennale sur le bassin versant de BINNDE. ORSTOM, Ouagadougou, 63 p., 15 fig.
- ALBERGEL (J) - BERNARD (A), 1984b. Etude des paramètres hydrodynamiques des sols sous pluies simulées. Estimation du ruissellement sur le bassin versant de KAZANGA. ORSTOM, Ouagadougou, 100 p. + an., 25 fig.
- BOULET (R), 1976. Notice des cartes de ressources en sols de la Haute-Volta. ORSTOM, Paris, 97 p.
- BOUROCHE (J.M.) - SAPORTA (G), 1983. L'analyse des données. Que sais-je? PUF, 126 p.
- CAILLIEZ (F) - PAGES (J.P.), 1976. Introduction à l'analyse des données. SMASH, 616 p.
- CASENAVE (A), 1982. Le minisimulateur de pluie : conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures. Cah. ORSTOM, ser. Hydrol., XIX, 4, pp. 229 - 252.
- GUINKO (S); 1984. Végétation de la Haute Volta. Thèse de doctorat es Sciences, Université de Bordeaux III, 2 t., 394 p.
- LAFFORGUE (A), 1977. Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. Application à une exploitation méthodique des données obtenues sous pluie simulée. Cah. ORSTOM, ser. Hydrol., XIV, 4.
- RODIER (J.A.) - AUVRAY (C), 1965. Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique occidentale. CIEH - ORSTOM, 46 p., 13 fig.
- VALENTIN (C), 1985. Cartographie des états de surface. Journées hydrologiques de Montpellier. A paraître.