

**DIFFÉRENCIER LES MILIEUX SELON LEUR APTITUDE AU RUISSELLEMENT:  
UNE CARTOGRAPHIE ADAPTÉE AUX BESOINS HYDROLOGIQUES**

*Christian VALENTIN*

*Orstom*

B.P. V-51, ABIDJAN

COTE D'IVOIRE

**ABSTRACT**

In order to explain and to extrapolate the hydrological data from reference watersheds, it is required to characterize their environments. But so far, the use of pedological data have not satisfactorily fulfilled the expectations of hydrologists since the soil classifications still neglect the hydrodynamical properties. A new approach was developed while the use of rainfall simulation was extended. Specific maps are drawn in accordance with the current knowledge on the relationships between the environmental factors (soil cover, superficial and deep soil features,...) and runoff. The hierarchy among these factors depends upon the ecological zone : in the rainy forest zone, the deep soil differentiations have to be considered as the prevailing factors, whereas in the pre-desert zone, the most important characters are the soil surface features (size distribution of materials, surface crusts, or seals,...). This method which has been used to survey about twenty watersheds in West Africa was found sufficiently relevant for hydrologists to be more widely extended. In addition, further applications are mentioned : the use of remote sensing images to extrapolate the maps to larger areas and the analysis of old aerial photographs.

**KEY WORDS** : environment survey, soil surface differentiations, runoff, aerial views, West Africa.

DIFFÉRENCIER LES MILIEUX SELON LEUR APTITUDE AU RUISELLEMENT :  
UNE CARTOGRAPHIE ADAPTÉE AUX BESOINS HYDROLOGIQUES.

*Christian VALENTIN*  
Groupe HYPERBAV  
ORSTOM  
B.P. V-51, ABIDJAN  
(COTE D'IVOIRE)

RÉSUMÉ

L'étude de petits bassins représentatifs requiert la caractérisation de leur milieu afin de permettre l'interprétation et l'extrapolation des données hydrologiques. L'utilisation d'informations pédologiques s'est souvent avérée décevante pour les hydrologues dans la mesure où les classifications des sols ne prennent pas, ou peu, en compte leurs propriétés hydrodynamiques. Une nouvelle approche a vu le jour à l'occasion du développement des mesures sous pluies simulées. Elle consiste à dresser des cartes thématiques qui font appel à l'état des connaissances entre les différents paramètres du milieu (couvert végétal, état de surface, organisations pédologiques internes) et son aptitude au ruissellement. La hiérarchie des critères à prendre en compte varie selon les grandes zones écologiques : en forêt tropicale humide, le cartographe privilégiera les variations de la couverture pédologique tandis qu'en zone sub-désertique, il s'attachera à noter les différents caractères des organisations superficielles (granulométrie des constituants, présence de pellicules,...). Cette méthode, appliquée à une vingtaine de bassins versants d'Afrique de l'Ouest, est considérée comme suffisamment satisfaisante par les hydrologues pour être diffusée. Diverses applications sont de surcroît évoquées : extrapolation spatiale à l'aide d'images satellitaires et interprétations de photographies aériennes anciennes.

MOTS CLES : Cartographie, états de surfaces, photo-  
interprétation, ruissellement, Afrique de l'Ouest.

## INTRODUCTION

Dès lors que des hydrologues étudient le fonctionnement de bassins versants représentatifs, ils se trouvent confrontés au problème de l'extrapolation des données à des bassins non observés. Pour ce faire, il est essentiel de définir des paramètres simples qui permettent d'identifier les différents types de milieux étudiés. Or, s'il est aisé d'utiliser des caractères physiques (indices de compacité, de pente, etc..), il est nettement plus difficile d'exploiter des données peu quantifiables telles que types de végétation ou de sols. Pourtant les hydrologues de l'ORSTOM ont fréquemment demandé à leurs collègues pédologues de caractériser les sols des bassins versants qu'ils étudiaient. Parmi les 106 ensembles de bassins versants représentatifs ou expérimentaux recensés par DUBREUIL *et al.* (1972), plus des trois-quarts ont ainsi fait l'objet de notes (45), ou de cartes pédologiques (37). Ce travail fourni par les pédologues a-t-il vraiment été utile aux hydrologues ? Avec le recul du temps, il est permis d'en douter. A cet égard, il est significatif que lors du traitement des données acquises sur 241 bassins versants (pour la plupart appartenant aux ensembles déjà mentionnés), DUBREUIL, MORELL et SECHET (1975) ne prennent pas en compte les informations pédologiques et ne retiennent, pour leur classification, que des caractères climatiques, botaniques et géologiques. Il semble, que l'*approche* alors adoptée par les pédologues ait été *inadaptée aux besoins hydrologiques*: comme le signalent DUBREUIL *et al.* (1972), la classification pédologique ne reflète pas, en effet, les caractères hydrologiques des sols.

Mais la demande hydrologique reste entière, et tend même à se faire plus pressante : d'une part l'utilisation de modèles à discrétisation spatiale (GIRARD, MORIN et CHARBONNEAU, 1972) requiert une caractérisation plus fine du milieu (elle repose sur un maillage serré de "carreaux"), d'autre part le développement de la simulation de pluie sur des parcelles d'1 m<sup>2</sup> (CASENAVE *et al.* 1982) rend encore plus aiguë la question de la représentativité des sites expérimentaux. Le souci d'efficacité à court terme entraîne le pédologue à délaisser, au moins pour un temps, l'étude de la genèse des sols au profit de celle des relations entre différenciations du milieu et types de comportement. Le document cartographique assure ainsi la synthèse entre les observations de terrain et une série d'interprétations. Il est clair dès lors qu'une telle démarche est tributaire de l'état des connaissances à une époque donnée dans le domaine des relations entre les différentes caractéristiques du milieu et leur aptitude au ruissellement. Par nature, elle est évolutive.

Cette cartographie thématique a été utilisée sur un nombre croissant de bassins versants (24 à ce jour) qui

correspondent à des milieux tropicaux africains de plus en plus variés. Elle facilite :

- \* l'implantation des parcelles de simulation de pluie,
- \* l'extrapolation à l'ensemble du bassin des résultats obtenus sur ces parcelles,
- \* l'extrapolation ultérieure des résultats obtenus à d'autres bassins non étudiés.

Cette note présente la *hiérarchie des critères à prendre en compte*, variable selon les zones climatiques, et définit les *modalités de cette technique cartographique*.

## QUELLES COMPOSANTES DU MILIEU DOIT-ON PRENDRE EN COMPTE ?

L'utilisation de la simulation de pluie a permis d'acquérir, ces dix dernières années, une information nombreuse sur les principaux facteurs du ruissellement. C'est sur cette documentation que se fonde le choix des critères à prendre en compte lors des travaux cartographiques. Mais, avant de présenter les principales conclusions auxquelles ces travaux ont conduit, il convient de préciser la signification de certains termes :

- \* *couverture pédologique* : il s'agit de l'ensemble du matériau pédologique apprécié dans ses trois dimensions. Parallèlement à l'hydrodynamique, nous distinguerons les *organisations internes* des *organisations superficielles*. Ces dernières se limitent aux différenciations spécifiques de la surface du sol.
- \* *état de surface* : ce terme, peu précis, mais souvent utilisé, recouvre deux composantes : *les organisations pédologiques superficielles* et *le couvert végétal*. Pour celui-ci, l'attention se portera surtout sur les caractères de la strate herbacée (constituée de graminées, mais aussi de dicotylédones, recrû,...) dans la mesure où l'effet du couvert arboré n'est pas intégré lors des mesures sous pluies simulées.

Nous nous efforcerons de mettre en évidence pour les différentes régions l'importance respective des trois composantes suivantes :

Etat de surface	{	Couvert végétal	} couverture	
		Organisations		pédologique
		- superficielles		
		- internes		

Les travaux récents confirment les conclusions de (DUBREUIL et VUILLAUME, 1975) : les variables explicatives du ruissellement varient selon les zones climatiques. Ils permettent d'en préciser la hiérarchie. Après avoir passé en revue les grandes régions de l'ouest africain, nous évo-

querons le cas particulier des terres cultivées.

## FORET TROPICALE

Les différents travaux menés en Guyane (BOULET, HUMBEL et LUCAS 1982, GUEHL 1984) et en Côte d'Ivoire (CASENAVE, GUIGUEN et SIMON 1982, COLLINET 1984) montrent l'*influence prépondérante des organisations internes de la couverture pédologique sur les écoulements*. L'infiltration est généralement facilitée sous forêt par l'existence d'une macroporosité ouverte en surface sous la litière. Celle-ci assure, avec les plantes de sous-bois et le chevelu racinaire une protection efficace contre l'impact des grosses gouttes qui tombent de la voûte forestière. Les réorganisations superficielles se trouvent limitées ou résultent d'autres mécanismes que la désagrégation sous l'effet de l'énergie cinétique des gouttes de pluie. La relative uniformité du couvert végétal, le faible développement des réorganisations pelliculaires en surface favorisent la pleine expression des propriétés hydrodynamiques internes sur le ruissellement. Celui-ci résulte le plus souvent de phénomènes d'engorgement, à plus ou moins grande profondeur, liés à des discontinuités de la couverture pédologique. Comme l'ont souligné CASENAVE, GUIGUEN et SIMON (1982), en milieu forestier, l'étude pédologique des bassins versants est un préalable indispensable aux mesures menées sous pluies simulées.

## SAVANE HUMIDE

L'étude de la structure et du fonctionnement d'une toposéquence située au nord de Bouaké (Côte d'Ivoire) tend à montrer que l'influence de la couverture pédologique reste sensible mais s'exprime surtout par l'intermédiaire des propriétés de l'horizon humifère et de la surface *sensu stricto*. POSS et VALENTIN (1983) insistent également sur l'importance du couvert herbacé à l'égard de l'infiltrabilité. Celle-ci paraît subir d'importantes variations saisonnières que ces auteurs attribuent à l'existence de cycles où interviendraient successivement l'activité mésofaunique (termites, fourmis, vers de terre), les mécanismes de réorganisation pelliculaire, et l'effet du couvert herbacé. Ce seraient non seulement l'ensemble des caractères des états de surface et de la couverture pédologique qu'il faudrait prendre en compte, mais également les *variations saisonnières des différents facteurs*. Comme le souligne DUBREUIL (1985) cette complexité appelle quelques commentaires :

1) elle concerne une zone de transition, toujours plus délicate à caractériser que les régions plus typées. N'est-ce pas précisément pour la savane arborée que le modèle proposé par DUBREUIL et VUILLAUME (1975) s'avérerait le moins pertinent ? Il s'agissait là aussi d'estimer l'influence du milieu physico-climatique sur l'écoulement des petits bassins versants.

2) cette zone climatique est celle qui jusqu'ici est restée la moins connue : les travaux y ont été peu nombreux, et souvent fragmentaires. Cette lacune devrait prochainement être comblée par les travaux de l'équipe hydro-pédologique de recherche sur bassin versant (HYPERBAV).

#### SAVANE SECHE

A l'issue d'une campagne de simulation de pluie sur grandes parcelles (50 m<sup>2</sup>) dans le Centre Nord du Burkina Faso, COLLINET et LAFFORGUE (1979) concluent qu'il n'existe pas de relation nette entre l'aptitude au ruissellement des différents sites testés et les organisations pédologiques internes. Par contre, la présence ou non de gravillons, ou d'organisations pelliculaires, à la surface des sols semblent déterminante pour l'hydrodynamique superficielle.

La sécheresse plus marquée du climat se manifeste par un couvert herbacé plus clair, assez souvent discontinu. Le sol, moins bien protégé que dans les zones plus humides est en outre plus sensible aux mécanismes de désagrégation du fait de plus faibles teneurs en matière organique. Ces différents facteurs favorisent les processus de réorganisation superficielle. Du fait de l'histoire des organisations de surface (mise en culture, érosion, apports par le vent, par ruissellement,...), il n'est pas rare d'observer des discordances entre les différenciations superficielles et les organisations internes de la couverture pédologique.

La représentation cartographique n'a pas, du moins en un premier temps, pris en compte ces organisations internes. VALENTIN (1982, 1983) et GIODA (1983) ont préféré retenir les *caractères des états de surface* (couvert végétal et organisations superficielles du sol). Les résultats obtenus dans cette zone climatique par GIODA (1983), ALBERGEL et BERNARD (1984 a, 1984 b), en utilisant ce type de document cartographique sont satisfaisants et valident une telle démarche. L'analyse des résultats acquis sur une quarantaine de parcelles implantées en zone soudanienne du Burkina Faso (ALBERGEL, RIBSTEIN et VALENTIN, 1985) est venue confirmer depuis que le pourcentage de couverture végétale, associée à l'activité mésofaunique, est le principal facteur explicatif de l'infiltration sous végétation naturelle. Dans le cas des sols nus, les principales variations sont dues aux caractères des organisations pelliculaires superficielles. Il s'avère que *les organisations pédologiques internes n'influencent que très peu le ruissellement.*

#### SAHEL

Les mesures réalisées près de la mare d'Oursi, dans le Sahel burkinabé, sur petites et grandes parcelles (COLLINET et al. 1980) ont également souligné la faible intervention des organisations pédologiques internes sur le ruissellement. Les organisations superficielles présentent de fortes

différenciations latérales qui résultent de la combinaison de plusieurs facteurs : pluie, vent, couvert herbacé (VALENTIN, 1985 a). Elles se manifestent souvent par l'existence de taches d'une dizaine de mètres de diamètre, dépourvues de végétation et couvertes d'une pellicule, environnées par des micro-buttes sableuses enherbées. De telles variations décamétriques induisent des différences très marquées d'hydrodynamique superficielle (CHEVALLIER et VALENTIN, 1984).

Ce sont les *caractères d'état de surface* (couvert végétal et organisations superficielles de la couverture pédologique) qui ont, par conséquent, été retenus lors des travaux de cartographie (VALENTIN, 1981 a). C'est ainsi que la campagne de simulation de pluie opérée par CHEVALLIER (1982) a fourni des résultats très satisfaisants pour les hydrologues. Par la suite, cette représentation cartographique a été utilisée comme "vérité terrain" lors des études de télédétection par satellite (CHEVALLIER, LOINTIER et LORTIC, 1985), permettant ainsi à CHEVALLIER et al. (à paraître) d'extrapoler les résultats obtenus sur un bassin de 9 km<sup>2</sup> à l'ensemble du bassin de la mare d'Oursi (264 km<sup>2</sup>). Il semble, par conséquent que cette approche soit bien adaptée au milieu.

## REGION PREDESERTIQUE

Sous les climats très arides (moins de 200 mm de pluie), le couvert graminéen tend à se réduire dans l'espace, et à n'occuper que peu de temps dans l'année, une part limitée de la surface du sol. De même, l'activité mésofaunique est moins marquée que dans les zones plus humides. Les *réorganisations superficielles* qui apparaissent même sous l'effet de pluies peu abondantes (VALENTIN 1981 b) se maintiennent, pour la plupart, d'une année sur l'autre. C'est essentiellement la *granulométrie des matériaux superficiels* (regs, surfaces sableuses, limoneuses, argileuses..) qui permet d'identifier des unités cartographiques dont l'homogénéité est souvent plus marquée que pour les autres zones climatiques. Ce "raccourci" qui consiste à faire abstraction des organisations internes de la couverture pédologique semble d'autant plus fondé que la profondeur des "sols fonctionnels" est faible : les fronts d'humectation ne sont généralement guère profonds du fait de la faible pluviométrie, concentrée sur une courte période qui coïncide avec la saison la plus chaude. Les intensités élevées de ruissellement et d'évaporation limitent en outre considérablement le stockage de l'eau dans les matériaux pédologiques.

Deux milieux très importants n'ont pas été présentés ici, mais méritent de retenir l'attention des hydrologues travaillant en Afrique : les *zones sodiques ou salines* où la dynamique des sels se manifeste par des structures superficielles particulières. Une étude portant sur l'évolution

saisonnaire des organisations pédologiques superficielles est actuellement entreprise au Sénégal (MOUGENOT 1983). De nombreux éléments différencient la zone méditerranéenne des régions tropicales. Les états de surface étudiés par ESCADAFAL (1981) dans le sud tunisien présentent toutefois de nombreux points communs avec ceux des zones arides sub-sahariennes. Dans ces régions arides, dépourvues d'un couvert végétal dense, l'utilisation de la télédétection par satellite facilite largement la réalisation de cartes d'états de surface (ESCADAFAL et POUGET, à paraître).

## TERRES CULTIVEES

Il est tentant d'opposer les terres cultivées à celles sous couverts naturels. Pourtant, cette distinction n'est pas toujours très pertinente : qu'y-a-t-il en effet de commun entre une parcelle de culture itinérante sur brûlis (pas, ou peu de travail du sol, important couvert, assuré pour une bonne part par les résidus de défriche) et un bloc de culture mécanisée avant semis ? La culture entraîne par rapport au milieu naturel des perturbations plus ou moins importantes qu'il est nécessaire d'identifier. Les agronomes nous fournissent une technique pour caractériser les différents éléments du profil cultural (HENIN, GRAS et MONNIER, 1969 ; MANICHON, 1982). Celui-ci résulte d'itinéraires techniques, et donc d'un passé cultural, souvent complexes. Retenons que certaines discontinuités de ce profil (semelle de labour, apparition à faible profondeur d'un horizon très peu drainant, ..., peuvent influencer sur l'aptitude au ruissellement. Mais ce sont surtout les données concernant le couvert (plantes cultivées, résidus de récolte, ...), le micro-relief et les organisations pelliculaires superficielles qu'il est nécessaire de prendre en compte (COLLINET & VALENTIN, 1979 ; BOIFFIN, 1983 ; ALBERGEL, RIBSTEIN & VALENTIN, 1985). Ces paramètres associés à la connaissance du parcellaire, ont permis aux hydrologues d'obtenir des résultats considérés comme satisfaisants (CHEVALLIER, 1982 ; GIODA, 1983 ; ALBERGEL et BERNARD, 1984 a et b). Compte tenu de la rapidité d'évolution des organisations pédologiques superficielles et du couvert végétal au cours du cycle cultural, il est vraisemblablement possible d'affiner les modèles hydrologiques en affectant aux différents paramètres des fonctions de variation dans le temps. Celles-ci pourraient être définies à partir de résultats obtenus sous simulation de pluie aux différentes étapes des cycles culturaux. Le recours à des techniques appropriées (prises de vues à la verticale, aspérimétrie, prélèvements micromorphologiques, ...) faciliterait la définition des principaux paramètres. Une telle étude est prévue, dans le cadre du programme HYPERBAV, en zone de savane humide, sur des champs cultivés traditionnellement. Elle devrait être également envisagée sous d'autres climats et pour d'autres systèmes de culture.

Ce rapide exposé permet certaines remarques générales:

\* c'est essentiellement en *région de savane* que le *couvert herbacé* semble jouer un rôle directement déterminant sur l'infiltration. Ses *variations* tant *spatiales* que *saisonnnières* doivent donc être prises en compte lors des campagnes de simulation de pluie. Dans les régions forestières, le sous-bois apparaît, pour ce type d'étude, comme à la fois trop homogène dans l'espace et trop stable dans le temps. Dans les zones très arides, le tapis herbacé semble trop aléatoire pour être pris en compte.

\* *plus le milieu est sec, plus l'épaisseur de la couverture pédologique à retenir* pour la cartographie s'amenuise: c'est l'ensemble des organisations internes qui interviennent surtout, en zone forestière, sur l'infiltrabilité alors que celle-ci est principalement conditionnée en région prédésertique par les seules *organisations superficielles*, généralement *stables*.

L'état actuel de nos connaissances sur l'influence des différentes composantes de l'environnement sur le ruissellement peut être schématisé sous la forme d'un tableau où apparaissent en fonction des zones climatiques les caractères principaux\*\*, et importants\*, à prendre en compte pour la cartographie des bassins versants. Les parenthèses indiquent la nécessité d'approfondir certaines questions.

TABLEAU N° 1 : Hiérarchie des caractères à prendre en compte lors de la cartographie des petits bassins versants, pour différentes zones climatiques.

Zone climatique	Limites pluviométriques approximatives (mm)	Couvert végétal	Couverture pédologique : organisations superficielles	organisations internes
Forêt tropicale	> 1600	-	- -	* *
Savane humide	1200 - 1600	* *	*	*
Savane sèche	400 - 1200	*(*)	*	-
Sahel	200 - 400	*	* *	-
Confins sahariens	< 200	-	* *	-

Il semble donc que le type de carte doit être adapté en fonction des régions : celle des organisations pédologiques internes est nécessaire dans la zone forestière et préforestière (savane anthropique). La carte des états de surface semble suffisante dans les zones plus septentrionales.

## LES MODALITÉS DE RÉALISATION

La cartographie des états de surface diffère de celles des organisations internes de la couverture pédologique par l'objet d'étude mais s'en écarte peu dans ses grands principes : travaux de terrain et représentation cartographique.

Il convient de distinguer deux voies possibles :

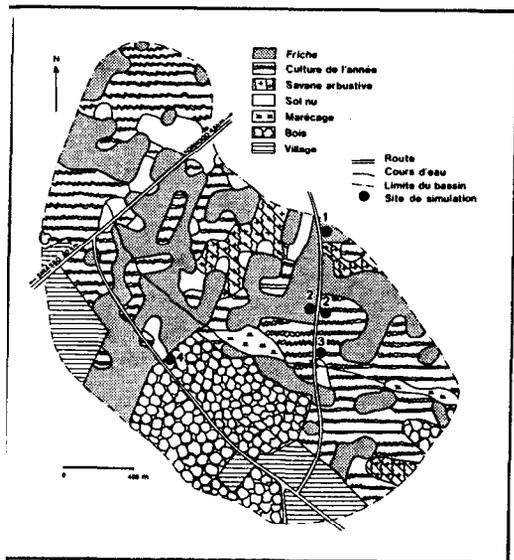
- l'*approche systématique* : elle consiste à décrire le milieu selon un maillage rigide. Elle réclame du temps, mais peu d'expérience. Elle permet d'acquérir des données fiables sans grand risque d'erreur. Cette méthode s'avère indispensable lorsque l'on souhaite disposer de la carte du parcellaire actuel, en l'absence de photographies aériennes récentes (Fig. N°1, GIOUDA 1983). La densité des observations rend également possible la réalisation de plusieurs cartes thématiques, précieuses pour la modélisation du ruissellement à l'échelle du bassin à partir des données de simulation de pluie,

- l'*approche par échantillonnage* : cette méthode est commune à la plupart des naturalistes. Elle est plus rapide que la précédente, mais requiert une certaine technicité. Elle nécessite une initiation qui, comme nous le verrons, peut s'acquérir rapidement. C'est cette méthode que nous présentons ici.

## TRAVAUX DE TERRAIN

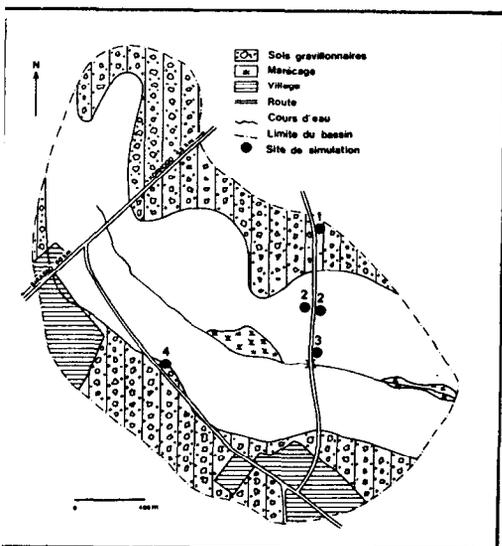
Depuis les premiers travaux menés dans le nord du Burkina Faso (VALENTIN 1981 a), les techniques de relevé ont eu tendance à se normaliser. Il reste néanmoins que la méthode est suffisamment souple pour s'adapter aux différentes conditions, de milieu, d'accessibilité, et en fonction de l'existence ou non de photographies aériennes. Ainsi la prospection diffèrera en zone sahélienne où elle peut s'opérer en véhicule tout terrain et en région de savane humide où l'ouverture de layons, à parcourir à pied, est nécessaire. En l'absence de photographies aériennes récentes et de bonnes qualités, la prospection s'effectue selon une densité plus forte de toposéquences qui permettent d'établir d'éventuelles relations entre les états de surface et la topographie. Dans tous les cas, le cheminement s'accompagne du relevé des discontinuités d'états de surface, et d'une description systématique de *points d'observation* le plus souvent distribués selon des intervalles réguliers.

La densité de ces points varie en fonction de la qualité des "documents accessoires" : photographies aériennes, carte topographique détaillée, etc..., du type de paysage : son degré de mise en culture, la couverture végétale, etc.. et de l'"équation personnelle du cartographe" : un pédologue spécialiste des états de surface aura besoin d'un nom-

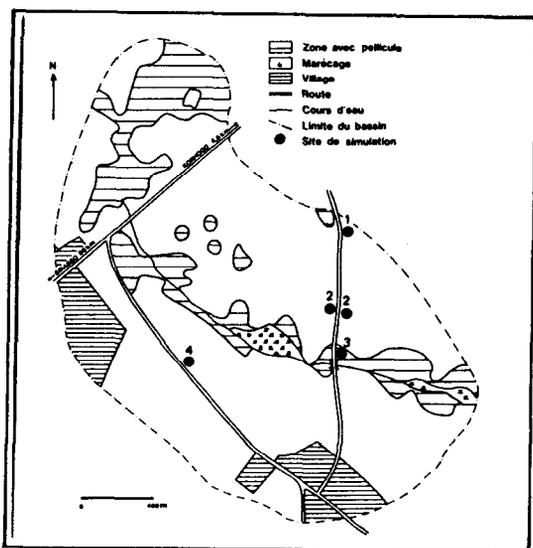


**Figure 1 - Exemple de cartographie par levé systématique. maille de 100 m x 100 m. Bassin de KORHOGO (COTE D'IVOIRE). d'après GIODA 1983.**

**1 a - Occupation des sols**



**1 b - Affleurements gravillonnaires**



**1 c - Organisations pelliculaires superficielles**

bre plus restreint d'observations qu'un débutant. Ce sont ces trois variables (Documents x Nature x Homme) qui ont permis à BOULAIN (1966) de définir "l'efficience pédologique" : c'est "dans une région donnée, le nombre qui traduit les gains de temps ou les économies d'observation et d'analyses dues à l'emploi des méthodes de la pédologie moderne dans l'inventaire des sols par rapport à la méthode qui consiste uniquement à décrire et analyser les sols et à faire une carte par interpolation... Cette efficience est égale à 1 en zone forestière tropicale sans carte topographique précise et même avec des photos aériennes ordinaires. Par contre elle est de l'ordre de 20 en zone non couverte de végétation ondulée, avec des photographies en noir ou un plan très détaillé en courbes de niveau au 1/10 000, dans certaines régions méditerranéennes et si les photographies ont été prises au mois d'octobre ou de novembre". MAIGNIEN (1969) précise que la méthode de levé systématique requiert 4 observations par cm<sup>2</sup>. Un bassin de 25 km<sup>2</sup>, cartographié à 1/50.000 nécessiterait 400 observations. L'efficience pédologique permet de réduire ce nombre à 20, dans le meilleur des cas. Pour les cartes d'états de surface, nous considérons que l'efficience varie selon les différentes variables (Documents x Nature x Homme) entre 5 et 20.

La dimension des surfaces prises en compte lors des descriptions varie également selon les milieux ; d'une manière générale le "point d'observation" se définit par le champ de vision.

Même à cette échelle, il est fréquent que les états de surface apparaissent sous la forme de mosaïques constituées de plusieurs unités considérées comme homogènes. Nous désignons ces unités comme étant des "surfaces élémentaires" dont le comportement serait uniforme sous simulation de pluie. La technique de description de ces surfaces élémentaires devraient donner lieu à la rédaction d'un manuel de terrain. Nous nous limiterons ici à en tracer les grandes lignes.

#### *Couvert végétal*

- \* *couvert arboré* : la densité et le type de distribution des grands arbres sont des paramètres qui peuvent aisément être relevés sur le terrain. Leur identification sur photographies aériennes facilite ensuite le tracé de certaines limites. Les ligneux sont décrits en fonction de leurs strates principales définies par des limites de hauteur (exemple : > 15 m, entre 10 et 15 m, entre 5 et 10 m, entre 2 et 5 m, entre 1 et 2 m, < 1 m). Pour chacun des strates, on s'efforce de noter :
  - le pourcentage de recouvrement,
  - la distance moyenne entre les individus,
  - le type de distribution; régulière, aléatoire, en îlots (bosquets),...
  - éventuellement : l'espèce dominante, ou significative, le type de port,...

- \* *tapis herbacé* : les mêmes critères sont pris en compte. Une attention particulière est portée sur les relations entre les caractères du tapis herbacé et les autres composantes de l'état de surface (les graminées sont par exemple associées à un recouvrement sableux).
- \* *végétation de surface* : les principales caractéristiques (recouvrement, ...) des végétaux de surface sont relevées. Il est souvent possible de noter ainsi la présence plus ou moins marquée de plantes rampantes, de mousses, de lichens, d'algues, de graines ou de très jeunes pousses.
- \* *résidus végétaux* : qu'il s'agisse de végétation naturelle ou de culture, il est important d'estimer le recouvrement assuré par les organes végétaux morts pas encore humifiés. Ils peuvent être en place (herbes sèches dressées), inclinés, ou sur le sol et plus ou moins fragmentés. Il est bien sûr utile de relever également la présence de cendres, et d'autres indices de brûlis.

#### *Organisations pédologiques superficielles*

- \* *litière* : constituée de résidus végétaux plus transformés que précédemment, la litière est souvent discrète, voire absente en zones de savane. Nous incluons sous cette rubrique les éventuels chevelus racinaires affleurants.
- \* *activité faunique* : ce n'est pas l'activité faunique proprement dite qui est appréciée, mais plutôt la nature et le recouvrement des différentes constructions opérées par la mésofaune : termitières, placages de récolte de termites, fourmilières, turricules de vers, ...
- \* *micro-relief* : les principales caractéristiques du micro-relief (forme, amplitude, relations avec le sens de plus grande pente, etc...) sont relevées, surtout lorsqu'il présente une grande régularité (buttes, billons, ...).
- \* *indices de migration de constituants* : il peut s'agir de dépôts (érosion hydrique ou déflation éolienne), de transports (traces d'écoulement en nappe ou hiérarchisé) ou de dépôts. Citons, à titre d'exemple, la hauteur des salissures par rejaillissement sur les tiges des herbes, l'importance des déchaussements, l'existence de figures en piedestal (micro-buttes témoins), de griffes, d'atterrissements sableux, etc..
- \* *micro-profil* : les matériaux pédologiques présentent souvent des différenciations verticales assez nettes à proximité de la surface. Il est possible de distinguer, même à l'oeil nu, une ou plusieurs organi-

sations lamellaires, ou pelliculaires, que nous désignons par le terme de "*micro-horizon*". Les caractères les plus importants à noter en sont : l'épaisseur, l'humidité lors de la description, la continuité, la couleur, la taille des constituants, le type (fentes, vésicules,...) et le développement de la porosité, la dureté, la fragilité et le type de relation avec le micro-horizon suivant (estimé par le degré de discordance). Cette succession de micro-horizons correspond souvent à des "*processus de ré-organisation*" qui conduisent à une distribution granulométrique verticale inverse de celle qui résulte de la sédimentation : les matériaux les plus grossiers (galets, gravillons ou sables) recouvrent une pellicule plasmique ou sont enchassés en elle. Il arrive que cette succession verticale se répète sur les premiers centimètres de l'horizon superficiel, conférant ainsi à celui-ci une structure lamellaire bien marquée.

La description d'une surface élémentaire ne se contente pas de dresser l'inventaire des principaux éléments de l'état de surface, elle doit chercher à caractériser leurs relations : concentration des constructions mésofauniques à la base des touffes, organisations pelliculaires très discrètes sous le tapis herbacé, mais développées dans les zones nues, etc... En dépit de ce début d'interprétation, les travaux de terrain s'achèvent sans que les différents points d'observations aient été classés selon une classification prédéterminée. A ce stade de l'étude, il n'est en effet pas souhaitable de hiérarchiser les différentes composantes des états de surface.

Pour une étude plus précise des surfaces élémentaires qui n'allonge pas considérablement la durée de prospection, il est possible d'utiliser un *dispositif de prise de vue à la verticale* (ESCADAFAL, 1981 ; JANEAU, 1985). Une table à digitaliser permet ensuite, à partir du cliché, un planimétrage rapide (SAVY, 1985), et l'estimation des différents pourcentages de recouvrement recherchés. La figure N°2 fournit un exemple : le traitement d'un cliché (interprété en stéréoscopie à l'aide des photographies voisines prises le long d'un même transect) permet de déterminer sans peine la part de surface occupée par les éléments grossiers, et leur distribution selon leur diamètre moyen. Notons qu'un tel procédé (prise de vue à 5 m d'altitude,  $f = 35$  mm) permet d'identifier des graviers dont le diamètre est supérieur à 15 mm.

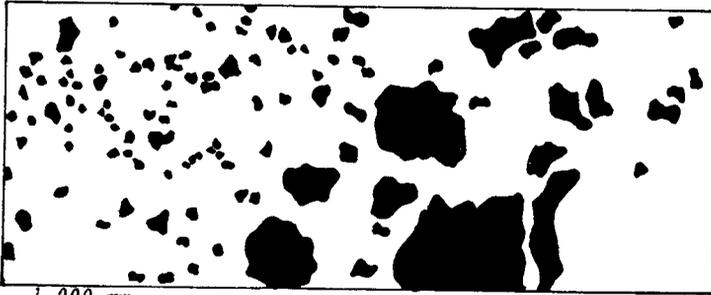
Figure 2 -  
Exemple d'utilisation  
du dispositif de prise  
de vue à la verticale.



affleurements  
granitiques  
bassin de GAGARA  
(BURKINA FASO)

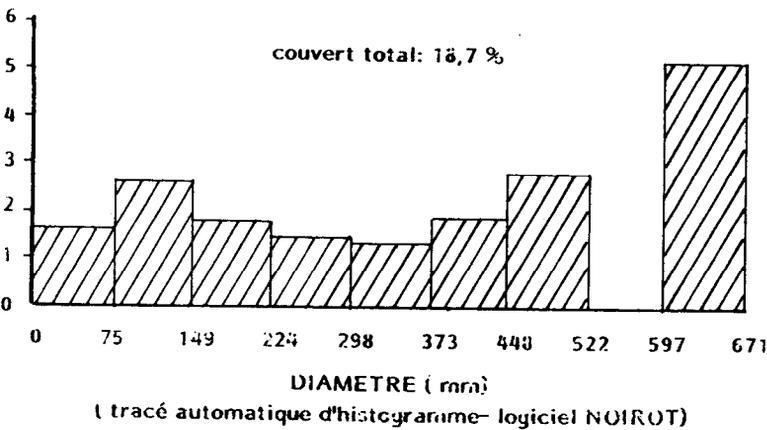


vue à la verticale



délimitation des  
affleurements

1.000 mm



distribution par  
classes de diamètre

## REPRESENTATION CARTOGRAPHIQUE

### *Mise en ordre des relevés*

La représentation cartographique nécessite d'identifier des unités définies en fonction des caractéristiques communes à plusieurs points d'observation. La première phase consiste à établir un fichier de ces différents points et de leurs caractères. Il est alors possible de procéder à un premier regroupement des points les plus semblables. Cette opération pourrait éventuellement être automatisée : une analyse en composantes principales doit être à même de faciliter l'identification de ces groupes. Le nombre de ces derniers est le plus souvent incompatible avec une représentation cartographique simple. Les unités seraient généralement trop petites pour être dessinées aux échelles habituelles (1/50.000 ou 1/30.000). Il convient par conséquent de condenser encore l'information en associant plusieurs groupes au sein de la même unité.

### *Définition des unités cartographiques*

La représentation cartographique répond à deux impératifs en termes de :

\* *Contenu* : chaque unité cartographique doit être définie en fonction des surfaces élémentaires qui la composent et des pourcentages occupés par ces surfaces. Pour hiérarchiser les facteurs et définir ainsi les unités, il est nécessaire, contrairement à la phase de terrain, de recourir à l'état actuel de nos connaissances sur les relations entre les différentes composantes du milieu et l'aptitude au ruissellement. En zone pré-désertique, les regroupements s'effectueront en privilégiant les organisations pédologiques superficielles alors que ce sont les types de peuplements végétaux qui différencieront, par exemple, les unités en savane humide.

\* *Limites* : le tracé doit être possible à partir des seuls documents disponibles : relevés de terrain, carte topographique, photographies aériennes, ... Il se trouve souvent facilité par les relations génétiques, ou simplement topographiques, des différentes unités. Comme pour la couverture pédologique, *la distribution des états de surface est ordonnée*. La mise en évidence d'un tel ordre, et son éventuelle compréhension, limitent considérablement les risques d'erreur, surtout lorsque l'on ne dispose pas de photographies aériennes. Elles fournissent également des renseignements sur la dynamique actuelle des versants.

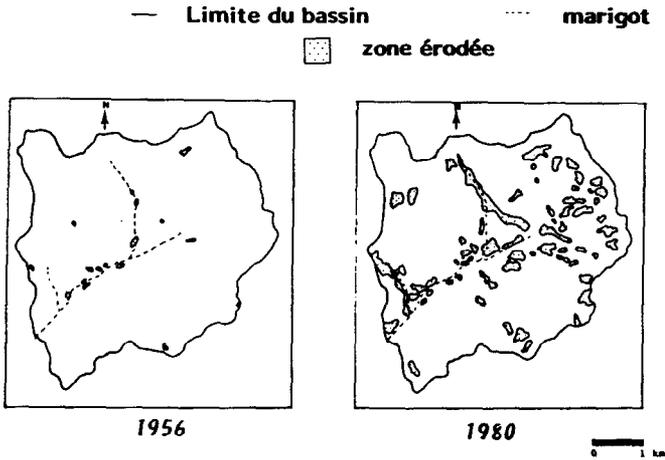
*La photo-interprétation*, quand elle est possible, doit s'imposer certaines règles rigoureuses : à chaque point d'observation, reporté sur un calque, correspond un type de grisé sur la photographie aérienne. Celui-ci se définit non seulement par sa teinte mais aussi par d'autres variables comme la présence de points blancs (termitières épi-gées érodées, ou taches nues) ou noirs (arbres) etc... Les relations établies ainsi entre les points d'observations (puis les unités) et les types de grisé doivent être bien établies et si possible énoncées sur un tableau. Cette "clé" d'interprétation permet de dresser le document cartographique. Assez souvent, il s'agit d'une esquisse et non d'une carte proprement dite. En effet, l'hétérogénéité des unités est souvent comparable à celle d'une carte de sols à petite échelle (par exemple à 1/200.000) dans la mesure où il s'agit de la représentation cartographique d'associations. Pour des études à grande échelle (par exemple à 1/5.000), il serait intéressant de fournir un document où seraient reportées non pas des unités, mais des lignes d'iso-différenciation. Il serait alors possible de mettre en évidence les éventuels décalages entre couvert végétal et organisations pédologiques superficielles.

#### *Choix des sites expérimentaux*

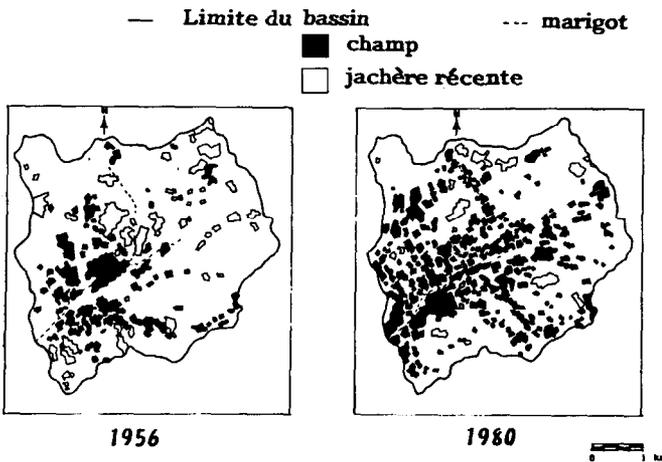
La dernière phase de ce travail consiste à proposer aux hydrologues l'emplacement d'un nombre limité de parcelles expérimentales. L'échelle des mesures (1 m<sup>2</sup>) est celle des "surfaces élémentaires" (cf. *supra*). Il est nécessaire de dresser la liste des différentes surfaces élémentaires constitutives des unités. Il arrive, par exemple en zone sahélienne, que le nombre de surfaces élémentaires soit inférieur au nombre d'unités cartographiques. Le nombre limité de parcelles (entre 10 et 15) réparties sur 3 sites permet alors de tester l'ensemble des situations.

La *représentativité* de chaque parcelle est établie en multipliant le pourcentage d'occupation de l'unité élémentaire correspondante au sein de l'unité, par le pourcentage d'occupation de cette unité dans le bassin versant. C'est cette donnée qui est ensuite utilisée dans le modèle hydrologique. Parfois, des contraintes d'ordre pratique (durée de campagne de simulation de pluie, inaccessibilité de certaines zones du bassin,...) imposent un nombre de parcelles inférieur au nombre des surfaces élémentaires. On s'efforce alors de procéder à de nouveaux regroupements d'unités, ou lorsqu'une telle opération s'avérerait contestable, la priorité est donnée aux surfaces élémentaires les plus représentées.

Un site expérimental compte entre 2 et 5 parcelles, en fonction du nombre de surfaces élémentaires à tester dans l'unité.



**Figure 3 - Evolution des zones érodées entre 1956 et 1980.**  
**Bassin de BOULSA (BURKINA FASO).**  
 d'après VALENTIN 1985 b



**Figure 4 - Evolution du parcellaire entre 1956 et 1980.**  
**Bassin de BOULSA (BURKINA FASO).**  
 d'après VALENTIN 1985 b

## AUTRES APPLICATIONS POSSIBLES

A l'heure actuelle, les modèles hydrologiques qui ont recours à des données de simulation de pluies (CASENAVE et al. 1982) nécessitent l'utilisation d'une *fonction de calage*. Celle-ci est la droite de régression des lames effectivement observées à l'exutoire du bassin sur les lames calculées (à partir des ruissellements mesurés sur les parcelles d'1 m<sup>2</sup>). Or ces fonctions de calage diffèrent d'un bassin à l'autre. Quels sont les variables qui régissent ces fonctions ? Les définir permettraient de reconstituer les lames ruisselées de bassins non observés. Le nombre de bassins étudiés à l'aide de la simulation de pluie est encore trop restreint pour entreprendre une telle étude. Quelques pistes néanmoins apparaissent : il semble notamment que l'hétérogénéité du bassin soit au moins aussi importante que sa superficie. La distribution des unités entre elles devrait être également prise en compte. Une carte des états de surfaces ne doit donc pas uniquement fournir le pourcentage occupé par chaque unité ; elle contient bien d'autres informations qu'il reste à exploiter.

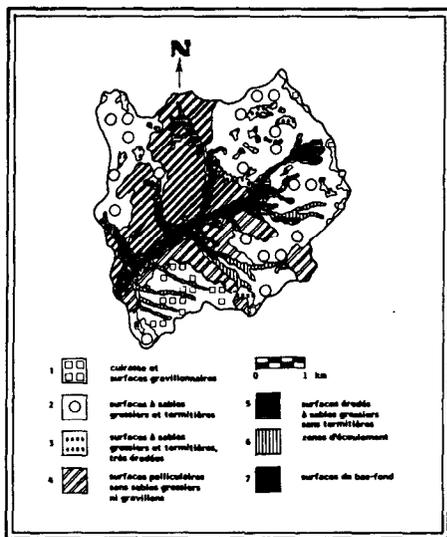
Grâce à la "vérité terrain" que constituent de tels documents, il est possible, comme nous l'avons vu, d'interpréter des images satellitaires et donc d'extrapoler dans l'espace les relations milieu-ruissellement (CHEVALLIER, LOINTIER & LORTIC, 1985). Pourquoi ne pas opérer une telle opération dans le temps ? Les clés de photo-interprétation définies plus haut peuvent être appliquées en effet à des clichés plus anciens. Elles permettent par exemple d'identifier sur un bassin les zones qui déjà étaient érodées, il y a plus de vingt ans (figure N°3), ainsi que la parcelle de l'époque (figure N°4). L'intérêt d'une telle démarche est patent lorsque l'on dispose des données hydrologiques contemporaines aux photographies aériennes : elle rend possible une vérification du modèle.

## EXEMPLE : LE BASSIN DE BOULSA-KOGHNERE (BURKINA FASO)

De dimensions réduites, 19,8km<sup>2</sup>, le bassin de KOGHNERE est situé sur le plateau mossi, au nord-ouest de Ouagadougou. Le substrat géologique est essentiellement constitué de granites à biotite. DUBREUIL et al. (1972) signalent qu'une note pédologique rédigée à l'occasion de l'étude de ce bassin à la fin des années cinquante indique la présence de :

- sols ferrugineux tropicaux généralement indurés en cuirasse,
- sols hydromorphes (à hydromorphie temporaire) argileux,
- des alluvions graveleuses en provenance des glacis.

Lors de la prospection de terrain menée en début de saison sèche (décembre) à l'occasion d'une campagne de simulation de pluies, 54 points d'observations ont été décrits, le long de cheminements de 13 km. Ces points ont ensuite été regroupés selon 7 unités (figure N°5). Comme l'indique la légende, les principaux critères retenus pour la définition des unités sont des *paramètres d'états de surface* : granulométrie des organisations superficielles, affleurement de cuirasse, hydromorphie de surface, présence de termitières (facilement identifiées sur photographies aériennes).



**Figure 5 - Organisations superficielles du bassin de BOULSA (BURKINA FASO)**

## DIFFUSION DE LA MÉTHODE

La démarche qui vient d'être brièvement présentée semble avoir acquis une fiabilité suffisante pour être diffusée. Un premier essai a récemment été tenté dans cette voie. Un petit bassin versant sahélien (GAGARA-EST), situé au nord du Burkina Faso, a été cartographié par quelqu'un (A), déjà rompu à la méthode, et par une personne inexpérimentée (B). Les travaux de terrain ont été menés conjointement et la clé de photo-interprétation a été fournie à (B).

Le tableau N°2 permet la comparaison des pourcentages d'occupation des 7 unités retenues (après regroupement) établis à partir des deux documents dressés indépendamment.

**TABEAU N°2** : Comparaison des pourcentages d'occupation des unités cartographiques d'un petit bassin sahélien établis par quelqu'un formé à la technique (A) et quelqu'un d'inexpérimenté (B).

Individu	Surface du bassin (km <sup>2</sup> )	Unités						
		1	2	3	4	5	6	7
B	31,3	9,8	11,4	10,2	17,4	28,4	3,0	19,8
A	30,4	10,7	11,7	11,1	17,3	26,3	10,3	12,7

Il apparaît deux distorsions (unités 6 et 7), de l'ordre de 7 %, qui résultent de la difficulté d'identification de surfaces érodées (unité N°7). Pour les autres unités, les écarts sont réduits, du moins au regard de la précision escomptée par les hydrologues. Cet essai d'initiation à cette technique de cartographie des états de surfaces semble assez encourageant. Aussi, deux autres pédologues ont depuis acquis cette technique et l'ont appliquée au TOGO (JANEAU, 1985 b), et au NIGER (IRIS, 1985).

## CONCLUSION

Trois constatations semblent apporter la validation de cette démarche :

- 1) elle est l'application directe de résultats acquis depuis une dizaine d'années sous simulation de pluie qui ont permis la mise en évidence d'une certaine *hiérarchie* parmi les *facteurs* intervenant sur l'hydrodynamique superficielle, et ceci pour différentes zones climatiques.
- 2) dans la mesure où cette méthode tend à se normaliser, elle devient susceptible d'être diffusée, au prix d'une *initiation* qui n'est pas nécessairement longue.
- 3) elle est *opérationnelle* : d'une part elle répond à la demande des hydrologues en facilitant la prévision du volume des crues, elle contribue d'autre part à l'*étude plus fondamentale* de leur *genèse*, et du fonctionnement hydrologique des petits bassins versants.

Ces différentes remarques ne doivent pas toutefois masquer certaines réalités :

- 1) ce type de cartographie est *perfectible*. Dépendant de l'acquis scientifique, il est, par nature, évolutif.
- 2) cette démarche n'est probablement *pas la seule à être opérationnelle*. Elle n'est exclusive d'aucune autre. Sa principale caractéristique réside dans sa simplicité de mise en oeuvre.

## BIBLIOGRAPHIE

- ALBERGEL (J.), BERNARD (A.), 1984 a. 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.), 1984 b. Etude des paramètres hydrodynamiques des sols sous pluies simulées. Estimation du ruissellement sur le bassin versant de KAZANGA. ORSTOM, OUAGADOUGOU, 100 p. + annexes, 25 fig.
- ALBERGEL (J.), RIBSTEIN (P.), VALENTIN (C.), 1985. L'infiltration : quels facteurs explicatifs ? Analyse des résultats obtenus sur 48 parcelles testées avec un simulateur de pluie au BURKINA FASO. Communication aux Premières Journées Hydrologiques de Montpellier - Septembre 1985 - 25 p., 14 fig., 9 réf.
- BOIFFIN (J.), 1984. La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse Paris, 320 p. + annexes.
- BOULAIN (J.), 1966. La cartographie des sols et la Pédologie. Cah. ORSTOM. sér. Pédol., IV (1) : 3-7.
- BOULET (R.), HUMBEL (F.X.), LUCAS (Y.), 1982. Analyse structurale et cartographie en pédologie. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., XIX (4) : 323-351.
- CASENAVE (A.), GUIGUEN (N.), SIMON (J.M.), 1982. Etude des crues décennales des petits bassins versants forestiers en Afrique Tropicale. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., XIX (4) : 229-252.
- CASENAVE (A.), CHEVALLIER (P.), GUIGUEN (N.), SIMON (J.M.) 1982. Simulation de pluie sur bassins versants représentatifs. Cah. ORSTOM, XIX (4) : 207-297, sér. Hydrol.
- CHEVALLIER (P.), 1982. Simulation de pluie sur deux bassins versants sahéliens (Mare d'Oursi, Haute-Volta). Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., XIX (4) : 253-297.

- CHEVALLIER (P.), VALENTIN (C.), 1984. Influence des micro-organisations pelliculaires superficielles sur l'infiltrabilité d'un type de sol sahélien. Journées du Groupe Français d'Humidimétrie Neutronique. Montpellier, 13-14 novembre 1984.
- CHEVALLIER (P.), LOINTIER (M.), LORTIC (B.), 1985. Water levels of a sahelian lake (mare d'Oursi - Burkina Faso). Intern. Works. on Hydrologie Applications of Space Technology. AISH.Cocoa Beach, USA, août 1985. Poster Session.
- CHEVALLIER (P.), CLAUDE (J.), POUYAUD (B.), BERNARD (A.). Pluies et crues au Sahel. Hydrologie de la mare d'Oursi - Burkina - (1976-1981). Trx et Doc. de l'ORSTOM (à paraître).
- COLLINET (J.), 1984. Hydrodynamique superficielle et érosion comparées de quelques sols ferrallitiques sur défriches forestières traditionnelles (Côte d'Ivoire). *in*: Challenges in African Hydrology and Water Resources. IAHS Publ. N° 144 : 499-516. 8 fig., 3 tabl., 11 réf.
- COLLINET (J.), LAFFORGUE (A.), 1979. Mesures de ruissellement et d'érosion sous pluies simulées pour quelques types de sols de Haute-Volta. ORSTOM, Abidjan, 129 p.
- COLLINET (J.), VALENTIN (C.), 1979. Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielles. Nouvelles perspectives. Applications Agronomiques. Cah. ORSTOM, sér. Pédol. XVII (4) : 283-328.
- COLLINET (J.), VALENTIN (C.), ASSELINE (J.), HOEPPFNER (M.), HARANG (P.), PEPIN (Y.), 1980. Ruissellement, infiltration et érosion en zones sahéliennes et subdésertiques. Bassin versant de Galmi et cuvette d'Agadez. ORSTOM, Abidjan, 38 p.
- DUBREUIL, (P.L.), 1985.- Commentaires au sujet de la cartographie des états de surface. GOUTTES & SPLASH - 2 (3): 21-22.
- DUBREUIL (P.), CHAPERON (P.), GUISCAFRE (J.), HERBAUD (J.), 1982. Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux. Années 1951 - 1969 - ORSTOM, Paris, 916 p.

- DUBREUIL (P.), VUILLAUME (G.), 1975. Influence du milieu physico-climatique sur l'écoulement de petits bassins intertropicaux. Public. AISH Symp. Tokyo - N° 117 : 205-215, 3 fig., 2 réf.
- DUBREUIL (P.), MORELL (M.), SECHET (P.), 1975. Comportement et interactions des paramètres physiques des petits bassins versants semi-arides et intertropicaux. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol. 13 (1) : 13-36, 8 fig., 6 tabl., 5 réf.
- ESCADAFAL (R.), 1981. L'étude de la surface du sol dans les régions arides (Sud tunisien). Recherches Méthodologiques. ORSTOM, Gabès, 64 p.
- ESCADAFAL (R.), POUGET (M.) - Luminance spectrale et caractères de la surface des sols en région aride méditerranéenne (Sud tunisien). Colloque de Wageningen (Pays-Bas) 1985 - (à paraître).
- GIODA (A.), 1983. Etude du rapport pluie - débit sur un petit bassin de savane à l'aide d'un infiltromètre à aspersion (Korhogo - Côte d'Ivoire). ORSTOM, Abidjan, 84 p.
- GIRARD (G.), MORIN (G.), CHARBONNEAU (R.), 1972. Modèle - précipitation - débit à discrétisation spatiale. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol. (4) : 35-52 - 7 fig.
- GUEHL (J.M.), 1984. Utilisation des méthodes tensio-neutroniques pour l'étude des transferts hydriques dans le sol en milieu ferrallitique guyanais. Science du sol. N° 1 : 35-49.
- HENIN (S.), GRAS (R.), MONNIER (G.), 1969. Le profil cultural. L'état physique du sol et ses conséquences agronomiques. MASSON & Cie (édit.). PARIS, 332 p.
- IRIS (J.M.), 1985. Cartographie des organisations superficielles du bassin versant d'Agassaphas. République du Niger - ORSTOM, Adiopodoumé, 12 p., 1 fig., 2 tabl., 6 réf.
- JANEAU (J.L.), 1985 a. Dispositif de prise de vue à la verticale. Gouttes & Splash - 2 (2) : 17-18.
- JANEAU (J.L.), 1985 b. Compte rendu de mission au Togo du 5 au 19 mai 1985. ORSTOM, Adiopodoumé, 12 p., 1 fig.

- MAIGNIEN (R.), 1969. Manuel de prospection pédologique. Initiat. Doc. Techniques de l'ORSTOM N° 11, 132 p.
- MANICHON (H.), 1982. Influence des systèmes de culture sur le profil cultural : élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse - Paris - 214 p., + annexes.
- MOUGENOT (B.), 1983. Caractérisation et évolution des états de surface en relation avec la dynamique des sels dans le delta du Sénégal. Méthodologie et résultats partiels de la campagne 1982-1983. ORSTOM, Dakar, 50 p.
- POSS (R.), VALENTIN (C.), 1983. Structure et fonctionnement d'un système eau-sol-végétation : une toposéquence ferrallitique de savane (Katiola - Côte d'Ivoire). Cah. ORSTOM, sér. Pédol., XX, 4 :
- SAVY (L.), 1985. Présentation d'un système informatique de calculs de surfaces. ORSTOM, Adiopodoumé, 9 p.
- VALENTIN (C.), 1981 a. Esquisse au 1/25.000ème des différenciations morpho-structurales de la surface des sols d'un petit bassin versant sahélien (Polaka-Oursi, Nord Haute-Volta). ORSTOM, Abidjan, 11 p.
- VALENTIN (C.), 1981 b. Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertiques (Agadez - Niger). Dynamique et conséquences sur l'économie en eau. Thèse 3ème cycle. Univ. Paris VII, 229 p.
- VALENTIN (C.), 1982. Esquisse à 1/25.000ème des organisations superficielles d'un petit bassin versant soudanien (BINNDE, Centre Sud de la Haute-Volta). ORSTOM, Ouagadougou, 18 p.
- VALENTIN (C.), 1983. Organisations superficielles de Kazanga. Centre-Sud de la Haute-Volta. Esquisse à 1/50.000ème d'un bassin versant de 56 km<sup>2</sup>. ORSTOM, Abidjan, 13 p.
- VALENTIN (C.), 1985 a. Effects of grazing and trampling on soil deterioration around recently drilled water holes in the Sahelian Zone. *in* : "Soil Erosion and Conservation" Soil Conservation Society of America (edit.) : 51-65.

VALENTIN (C.), 1985 b. Le bassin versant de Boulsa - Koghneré (Burkina Faso). Organisations superficielles. Interprétation des photographies aériennes de 1956 et de 1980. ORSTOM, Adiopodoumé, 19 p., 3 fig., 7 tabl., 4 réf., 4 pl. photos.