

Etats de surface et transposition des données hydrologiques

A. CASENAVE & C. VALENTIN

Orstom, BP 11416, Niamey, Niger

Résumé Pour répondre aux demandes des aménageurs, les hydrologues ont longtemps cherché à mettre au point une méthode permettant de déterminer, sans observations ni mesures de débits, les caractéristiques hydrologiques des petits bassins versants. Les auteurs montrent à partir de l'évolution, au cours du temps, des différentes techniques (bassins représentatifs, simulation de pluie) utilisées par les hydrologues et pédologues de l'Orstom pour résoudre ce problème, comment ils en sont arrivés au concept d'état de surface, base actuelle de la transposition des résultats hydrologiques dans toute la zone aride et semi aride d'Afrique.

The concept of soil surface features as a tool for predicting runoff production from ungauged catchments

Abstract Because of the need expressed by planning agencies, over a long period of time hydrologists have attempted to develop a method to predict the hydrological properties of ungauged basins. Several approaches have been used including the monitoring of representative basins. This method was associated later with rainfall simulation. These extensive studies have led the hydrologists and soil scientists of Orstom to arrive at the concept of « soil surface features unit » which has become the basis for predicting runoff in the arid and semiarid zones of Africa.

LES DIFFICULTES DES PREMIERS TRAVAUX

Dans le milieu des années 1950, les hydrologues de l'Orstom, pour répondre aux demandes des aménageurs, ont entrepris une série d'études de Bassins versants Représentatifs et Expérimentaux (BRE), principalement en vue de déterminer les écoulements et les crues de fréquence rare.

Un des principaux objectifs de ces études était de mettre au point des règles simples permettant la transposition des résultats des BRE à des bassins n'ayant fait l'objet d'aucune mesure.

Le but des hydrologues était d'élaborer, à partir de l'analyse d'un échantillon le plus consistant possible, une typologie des bassins versants, fondée sur des paramètres caractéristiques du milieu (paramètres physiques – indices de compacité, de pente ..., grands types de couvert végétal, nature géologique du substratum, grands types de sols), facilement mesurables.

Lors des premières synthèses de ces résultats, que ce soient ceux des crues décennales (Rodier & Auvray, 1965) ou des écoulements (Dubreuil *et al.*, 1975; Rodier, 1976) ils se sont heurtés à un certain nombre de difficultés:

- Bien que plus de 300 BRE aient été étudiés, la transposition à un bassin dont les caractéristiques sortent des valeurs moyennes de l'échantillon n'est possible qu'en introduisant des corrections (Rodier & Ribstein, 1988), ce qui altère la précision des résultats.
- Impossibilité de donner un mode de calcul précis de la crue décennale en zone forestière, les coefficients de ruissellement y variant dans des proportions telles, sans qu'on puisse en déterminer exactement les causes, qu'il n'était même pas possible de classer ces bassins dans des catégories d'aptitude au ruissellement, comme on l'avait fait pour la zone de savane. Il semblait que l'absence de connaissance sur le comportement hydrodynamique des sols forestiers, était à l'origine de cet échec.
- Difficulté à quantifier l'aptitude au ruissellement d'un bassin. Faute de mieux, on avait classé les bassins en cinq catégories, mais plus à partir des résultats observés que de critères objectifs. Cette déficience semblait provenir d'une incapacité à prendre en compte les caractéristiques pédologiques des bassins. La nature des sols n'apparaissait pas, lors de l'analyse statistique des résultats (Dubreuil *et al.*, 1975) comme un facteur discriminant vis à vis du ruissellement, ce qui pouvait paraître, *a priori*, comme surprenant.

Cette difficulté résultait tant de la demande des hydrologues qui refusaient de prendre en compte la complexité des bassins versants, ceux-ci devant être traités statistiquement comme des entités homogènes, que de la réponse des pédologues, sous forme de cartes pédologiques, fondées sur des critères morphogénétiques non représentatifs des caractéristiques hydrodynamiques des sols et sur une vision verticale et réductrice des sols (cartographie s'appuyant sur la définition d'unités de sols homogènes compris dans des limites abruptes et verticales) inadaptées aux besoins des hydrologues. Par là même, les problèmes n'étaient pas posés à la même échelle: d'une part celle du profil, d'autre part celle du bassin versant.

LA SIMULATION DE PLUIE

L'échec partiel de ces méthodes stochastiques a amené les hydrologues à une approche plus déterministe qui est à l'origine des programmes de simulation de pluie.

L'une des difficultés rencontrées par les hydrologues dans les études de ruissellement ou les pédologues dans les études des phénomènes érosifs résulte de la rareté et de l'irrégularité des pluies naturelles, d'où la nécessité de prolonger les études sur plusieurs années, surtout en zone sahélienne, pour obtenir des résultats fiables. Il est apparu qu'un progrès pouvait être réalisé en s'affranchissant des aléas des pluies naturelles par la technique de simulation des pluies.

Un premier appareil, dérivé du simulateur mis au point par Swanson, a été utilisé, de 1975 à 1980, par une équipe multidisciplinaire de l'Orstom, sur des sites échelonnés de la zone tropicale humide à la zone sahélienne (Côte d'Ivoire, Burkina Faso, Niger). Outre des résultats importants sur la modélisation de l'infiltration (Lafforgue, 1977) et les processus érosifs (Collinet, 1984, 1988), le principal apport de cette équipe a été de mettre en évidence l'influence primordiale des états de surface sur l'hydrodynamique en zone sahélienne (Collinet & Lafforgue, 1979; Collinet & Valentin, 1979).

Ce simulateur de pluie présentait toutefois un certain nombre de défauts: la lourdeur et le coût du dispositif et surtout l'impossibilité de faire varier l'intensité de la pluie lors d'une averse et donc de reproduire des pluies naturelles.

Parallèlement à ces travaux, les pédologues mettaient au point un mini simulateur de pluies (Asseline & Valentin, 1978) beaucoup plus léger d'emploi et permettant de modifier l'intensité de la pluie au cours d'une averse.

Ce nouvel appareil est utilisé pour la première fois par les hydrologues dans le cadre d'une étude des crues décennales des bassins forestiers (Casenave *et al.*, 1982). Les tests, sous pluies simulées, des sols de la plupart des bassins forestiers antérieurement étudiés de façon classique, permettent de mettre au point une nouvelle technique de détermination des crues décennales pour ces bassins (Casenave *et al.*, 1982).

A partir de 1980, cette nouvelle technique a été progressivement étendue à toute la zone soudano-sahélienne (Burkina Faso, Niger, Mali, Sénégal, Cameroun, Togo, Fig. 1). Les résultats acquis au cours de 10 années de mesures sous pluies simulées, le long d'un transect climatique allant de la forêt tropicale humide (Casenave *et al.*, 1982) au Sahara (Valentin, 1985), ont permis de mettre en évidence et de hiérarchiser les facteurs intervenant, dans le milieu naturel, sur l'hydrodynamique superficielle (Valentin, 1986), (Fig. 2).

Forêt tropicale ($P > 1600$ mm)

Les différents travaux montrent l'influence prépondérante des organisations internes de la couverture pédologique sur l'infiltration.

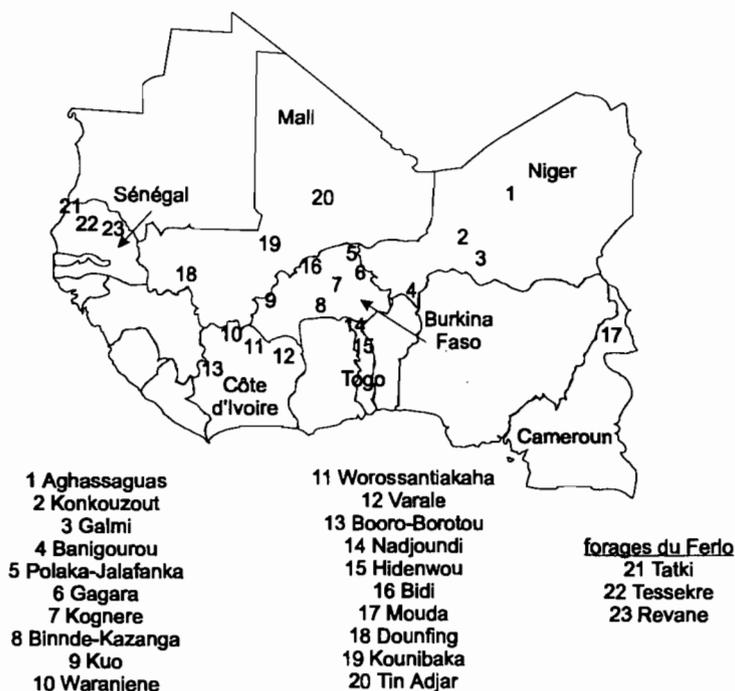


Fig. 1 Carte de situation des sites étudiés.

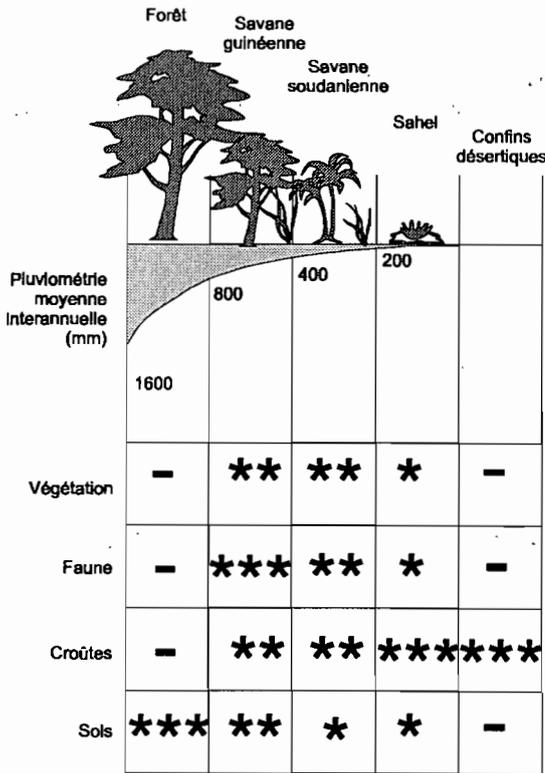


Fig. 2 Hiérarchie des facteurs conditionnels du ruissellement.

Savane humide (800 < P < 1600 mm)

Cette zone est la plus complexe puisque l’infiltration y dépend à la fois des organisations pédologiques internes et des états de surface lesquels sont sujets à des variations saisonnières importantes.

Savane sèche 400 < P < 800 mm)

Dans cette zone il n’existe pas de relation nette entre l’aptitude au ruissellement et les organisations pédologiques internes. En revanche, les états de surface semblent déterminants pour l’hydrodynamique superficielle. Trois variables (pourcentage de couvert végétal, activité faunique et réorganisations de surface) suffisent à expliquer significativement, le coefficient d’infiltration.

Zone sahélienne ss (200 < P < 400 mm)

Ce sont les caractères d’états de surface qui conditionnent l’hydrodynamique. Toutefois, contrairement à la zone précédente, ce sont les organisations pédologiques superficielles

qui ont un rôle prépondérant, le couvert végétal étant moins dense et beaucoup plus fugace.

Zone désertique ($P < 200$ mm)

Ce sont les seules réorganisations superficielles qui conditionnent l'infiltrabilité.

LES ETATS DE SURFACE

Toutes ces études ont confirmé, pour la zone soudano sahélienne, le rôle prépondérant des caractéristiques de surface sur l'infiltrabilité, au premier rang desquelles se classent le couvert végétal, l'activité faunique, le microrelief et le type de croûte.

L'étude des processus et l'analyse des facteurs des réorganisations superficielles, associées à la description des microhorizons ont amené Casenave & Valentin (1989; 1992) à la définition d'une typologie morphogénétique des principales croûtes sahéliennes. De l'identification de ces grands types de croûte, et d'autres critères relatifs à l'activité faunique et au travail du sol, découle une typologie des principales surfaces élémentaires. A chacune correspond un comportement hydrodynamique particulier, caractérisé par un certain nombre de paramètres de l'infiltration et du ruissellement.

A l'échelle directement supérieure, celle du petit bassin versant, la combinaison de ces surfaces élémentaires mène à la définition du concept d'état de surface, base d'une méthode cartographique originale (Valentin, 1986). Les unités définies dans cette méthode répondent à des critères d'homogénéité tant au niveau de leur dynamique évolutive qu'à celui de leur fonctionnement hydrologique.

EXEMPLES D'UTILISATION HYDROLOGIQUE DES CARTES DES ETATS DE SURFACE

Le « modèle simulateur »

A chaque surface élémentaire définie dans la typologie de Casenave & Valentin (1989) correspond une équation permettant de calculer, pour chaque averse, la lame ruisselée en fonction de la pluie utile et de la pluviométrie antérieure (Casenave, 1986).

Pour chacun des états de surface déterminés dans la cartographie d'un bassin versant, on calcule la fonction de production du ruissellement, en combinant les équations donnant la lame ruisselée de chaque surface élémentaire, au *pro rata* du pourcentage de surface occupé par chacune d'elles. De même, la fonction de production du bassin résulte de la somme pondérée des fonctions de production des différents états de surface. La différence d'échelle entre les surfaces élémentaires et des bassins de plusieurs dizaines de km² oblige à passer par une phase de calage entre les lames ruisselées ainsi calculées et un échantillon de lames réellement observées. La Fig. 3 montre un exemple de relation entre lames ruisselées observées et lames calculées par le modèle simulateur sur le bassin versant de savane de la Comba au Congo. La droite de régression entre lames calculées et lames observées est une fonction de calage propre à chaque

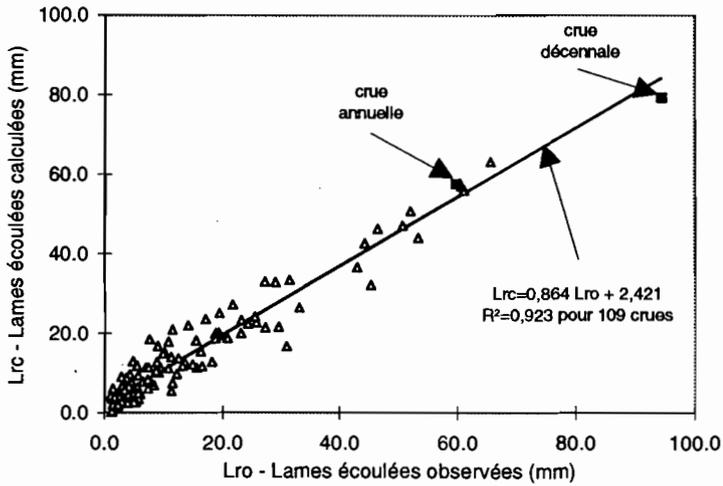


Fig. 3 Fonction de calage: bassin de la Comba.

bassin. Les études actuelles visent à expliciter les facteurs physiographiques des bassins qui déterminent ces différentes fonctions de calage. Ce « modèle simulateur » a été utilisé pour calculer certaines caractéristiques hydrologiques de petits bassins versants.

Prédétermination des crues de récurrence décennale

Pour répondre au problème de dimensionnement et de coût d'amortissement de petits ouvrages hydrauliques, les hydrologues de l'Orstom ont été amenés à définir, par analogie avec la législation française, une crue « décennale ». L'absence de chroniques de débits sur les petits bassins versants interdisant un calcul direct par ajustement d'une loi théorique aux valeurs observées, ils ont défini la crue « décennale » comme étant la crue provoquée par une lame précipitée sur le bassin, de récurrence décennale; toutes les autres conditions étant moyennes (Rodier & Ribstein, 1986).

Le calcul de la lame ruisselée correspondant à la crue décennale peut se faire soit:

- directement en appliquant le modèle simulateur à une pluie décennale tombant dans des conditions d'humectation des sols moyennes; ou
- indirectement en générant à partir d'une série pluviométrique de longue durée une série de lames ruisselées à laquelle on ajuste une loi statistique.

Pour estimer la validité de la méthode on a calculé la lame ruisselée décennale sur des petits bassins versants étudiés antérieurement de façon classique. Les résultats sont présentés dans le Tableau 1.

Extrapolation des cartes d'états de surface

Les bassins versants de la mare d'Oursi, situés au nord du Burkina Faso, ont fait l'objet d'observations hydropluviométriques classiques pendant six années (Chevallier *et al.*, 1985).

Tableau 1 Calcul des lames ruisselées décennales (étude classique et modèle simulateur).

Bassins	Lame ruisselée décennale étude classique du bassin (mm)	Lame ruisselée décennale modèle simulateur (mm)
Jalafanka (Burkina Faso)	42,1	45,4
Polaka (Burkina Faso)	22,2	20,8
Binnde (Burkina Faso)	32,1	33,1
Kazanga (Burkina Faso)	33,2	28,4
Kuo (Burkina Faso)	28,0	26,6
Korhogo (Côte d'Ivoire)	29,0	30,1
Varale 1 (Côte d'Ivoire)	17,9	17,6
Varale 2 (Côte d'Ivoire)	19,3	20,5
Comba (Congo)	98,8	95,7
Kountkouzout (Niger)	24,0	28,2
Banigorou (Niger)	5,5	3,9

A partir de la cartographie des états de surface du bassin de Polaka (9,14 km²) (Valentin, 1981), une extension géographique à l'ensemble du bassin de la mare d'Oursi (263 km²) a été faite à partir d'une image Landsat (Lointier & Lortic, 1984). Cette cartographie étendue ainsi que les fonctions de production du ruissellement déterminées sous pluies simulées ont été introduites dans le modèle à discrétisation spatiale de Girard *et al.* (1981). Le modèle a été testé pour le calcul de la limnimétrie de la mare d'Oursi en 1978, 1979 et 1980. On peut constater sur la Fig. 4 la remarquable adéquation du modèle.

Transposition de la cartographie des états de surface

La carte des états de surface de la mare d'Oursi a été transposée aux deux bassins versants de Gagara, situés à une cinquantaine de kilomètres à l'est de ceux d'Oursi (Albergel, 1987). En introduisant ces états de surface et les fonctions de production associées dans le même modèle à discrétisation spatiale, Albergel (1987) a reconstitué, en utilisant les précipitations réellement observées à Gagara, les volumes annuels écoulés en 1985. Le Tableau 2 permet de comparer les volumes calculés et observés.

CONCLUSION

Un modèle de reconstitution des lames ruisselées, fondé sur la cartographie des états de surface et sur la détermination, sous pluies simulées, des fonctions de production du ruissellement a été mis au point. On a montré que cette cartographie des états de surface était extrapolable à des surfaces plus grandes et transposables à d'autres bassins par télédétection et pouvait être couplée à une modélisation à petit pas de temps permettant

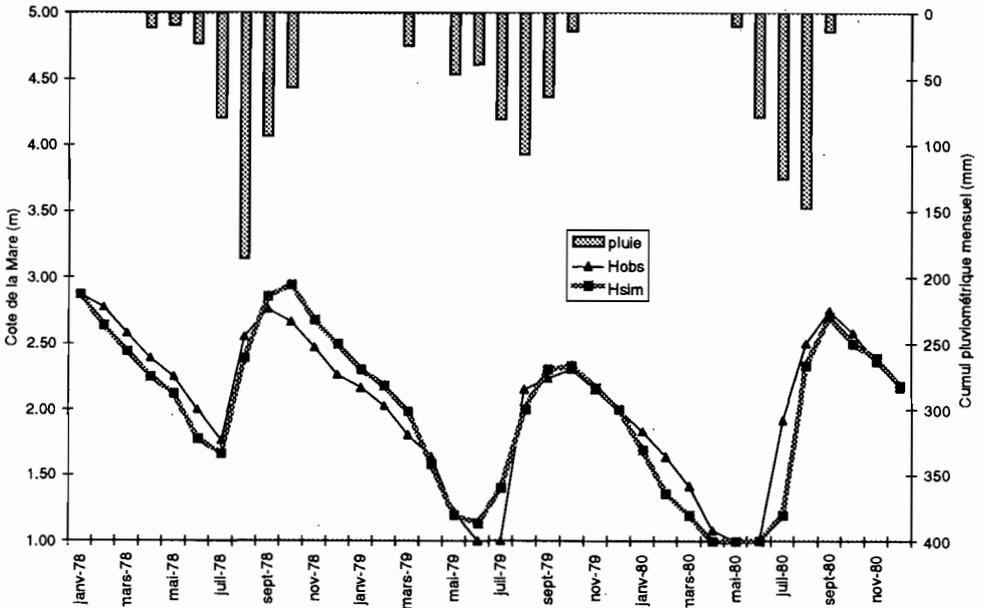


Fig. 4 Modélisation des niveaux de la Mare d'Oursi (Burkina Faso) — d'après Chevallier *et al.* (1985).

ainsi une simulation des écoulements, la prédétermination des crues de fréquence rare et la transposition des résultats à un bassin non observé.

Même si, comme l'a écrit J. A. Rodier, la cartographie des états de surface « représente un progrès par rapport aux pratiques antérieures qui consistaient à classer, à vue d'oeil, un bassin en catégorie imperméable, relativement imperméable ou perméable, avec des coefficients de ruissellement pouvant parfois varier de plus de 100% à l'intérieur d'une seule catégorie », tous les problèmes ne sont pas pour autant résolus. De nouveaux progrès sont à espérer par une meilleure utilisation de la cartographie des états de surface dans les modèles mathématiques de reconstitution du ruissellement et une meilleure prise en compte du relief et des fonctions de transfert du ruissellement.

Nous avons noté, au début de cet article, les difficultés de compréhension qui ont existé, pendant de nombreuses années, entre pédologues et hydrologues du fait de leurs approches différentes. Depuis cette époque, les progrès réalisés de part et d'autre, ont donné plus de cohérence aux deux démarches:

- Les pédologues ont peu à peu délaissé l'approche typologique à partir de grands profils caractéristiques pour l'étude en trois dimensions des volumes qui constituent la couverture pédologique. Les analyses détaillées de cette couverture pédologique les ont conduits à considérer l'hydrodynamique tant comme facteur que comme conséquence de l'autodéveloppement des systèmes de transformations pédologiques.

Tableau 2 Volumes écoulés annuels observés et calculés (1985) sur les bassins de Gagara.

Bassin	Volumes écoulés observés (10^3 m^3)	Volumes écoulés calculés (10^3 m^3)
Gagara est	1535	1470
Gagara ouest	1185	1176

- Les hydrologues, enclins naguère à privilégier l'approche statistique des phénomènes de ruissellement, se sont orientés vers une approche plus déterministe. Comprendre les processus physiques pour mieux les prévoir implique tout naturellement la prise en compte des flux d'eau au sein de la couverture pédologique. D'où la mise en oeuvre d'études expérimentales à des échelles inférieures à celle du bassin versant représentatif: parcelles, microbassins. De ce fait, pédologues et hydrologues partagent de nos jours les mêmes objectifs, les mêmes méthodes et les mêmes échelles d'analyse.

REFERENCES

- Albergel, J. (1987) Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Du m^2 au km^2 . Etude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse doct. Univ. Paris VI.
- Asseline, J. & Valentin, C. (1978) Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah. Orstom, sér. Hydrol.* 15(4), 321-349.
- Casenave, A. (1986) L'apport de la simulation de pluie dans l'analyse des phénomènes de ruissellement et d'infiltration: quelques exemples d'applications hydrologiques. *Ann. CNFGG*, sect. 6 (Hydrologie) 5, 35-48.
- Casenave, A., Guiguen, N. & Simon, J. M. (1982) Etude des crues décennales des petits bassins versants forestiers en Afrique tropicale. *Cah. Orstom, sér. Hydrol.* 19(4), 229-252.
- Casenave, A. & Valentin, C. (1989) Les états de surface de la zone sahélienne: influence sur l'infiltration. Orstom, Coll. didactiques.
- Casenave, A. & Valentin, C. (1992) A runoff capability classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of West Africa. *J. Hydrol.* 130, 231-249.
- Chevallier, P., Claude, J., Pouyaud, B. & Bernard, A. (1985) *Pluies et crues au Sahel. Hydrologie de la mare d'Oursi (Burkina Faso). 1976-1981*. Orstom, Coll. Travaux et Documents, no. 190.
- Collinet, J. (1984) Hydrodynamique superficielle et érosion comparée de quelques sols ferrallitiques sur défriches forestières traditionnelles (Côte d'Ivoire). In: *Challenges in African Hydrology and Water Resources* (ed. par D. E. Walling, S. S. D. Foster & P. Wurzel) (Proc. Harare Symp., July 1984), 499-516. IAHS Publ. no. 144.
- Collinet, J. (1988) Comportements hydrodynamiques et érosifs de sols de l'Afrique de l'ouest. Thèse Univ. Louis Pasteur Strasbourg.
- Collinet, J. & Lafforgue, A. (1979) *Mesures de ruissellement et de l'érosion sous pluies simulées pour quelques types de sols de Haute Volta*. Orstom, Abidjan.
- Collinet, J. & Valentin, C. (1979) Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications agronomiques. *Cah. Orstom, sér. Pédol.* 17(4), 283-328.
- 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.
- Girard, G., Ledoux, E. & Villeneuve, J. P. (1981) Le modèle couplé. Simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains dans un système hydrologique. *Cah. Orstom, sér. Hydrol.* 18(4), 195-280.
- Lafforgue, A. (1977) Inventaire et examens des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. *Cah. Orstom, sér. Hydrol.* 14(4), 299-344.
- Lointin, M. & Lortic, B. (1981) *Mare d'Oursi. Traitement numérique de la vue Landsat du 4 février 1976*. Orstom, Cayenne.
- Rodier, J. A. (1976) Evaluation de l'écoulement annuel dans les régions tropicales sèches d'Afrique occidentale. *Cah. Orstom, sér. Hydrol.* 13(4), 269-306.
- Rodier, J. A. & Auvray, C. (1965) *Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km^2 en Afrique occidentale*. Orstom-CIEH, Paris.
- Rodier, J. A. & Ribstein, P. (1986) Transposition des données hydrologiques, utilisation des bassins représentatifs pour la prédétermination des crues et l'estimation des apports au Sahel. In: *Colloque International sur la Révision des Normes Hydrologiques Suite aux Incidences de la Sécheresse*. CIEH.
- Rodier, J. A. & Ribstein, P. (1988) *Estimation des caractéristiques de la crue décennale pour les petits bassins versants couvrant de 1 à 10 km^2* . Orstom, Montpellier.
- Valentin, C. (1981) *Esquisse au 1/25000 des différenciations morphostructurales de la surface des sols d'un petit bassin versant sahélien (Polaka-Oursi-Nord Haute Volta)*. Orstom, Abidjan.
- Valentin, C. (1985) *Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertiques (Agadez-Niger). Dynamique et conséquences sur l'économie en eau*. Orstom, Coll. Etudes et Thèses.
- Valentin, C. (1986) Différencier les milieux selon leur aptitude au ruissellement: une cartographie adaptée aux besoins hydrologiques. *Journées Hydrologiques de l'Orstom à Montpellier*, 50-74. Orstom, Coll. Colloques et Séminaires.