

17 MARS 1964

TENDANCES ACTUELLES DES  
ETUDES HYDROLOGIQUES DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
ET TECHNIQUE OUTRE-MER



ORSTOM Fonds Documentaire

N° 329 56 *CA*

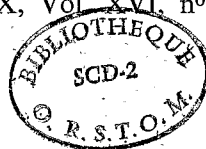
Cote 5 B

TENDANCES ACTUELLES DES  
ETUDES HYDROLOGIQUES DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
ET TECHNIQUE OUTRE-MER

PAR

J. RODIER

INGÉNIEUR EN CHEF A E.D.F.  
CHEF DU SERVICE HYDROLOGIQUE DE L'ORSTOM



# TENDANCES ACTUELLES DES RECHERCHE SCIENTIFIQUE

## SUMMARY

### **Present-day tendencies in hydrological studies of the Overseas Scientific Research and Engineering Bureau (ORSTOM-France)**

*The writer gives the solutions reached by the Hydraulic engineers of ORSTOM after fifteen years of work, in their effort to adapt themselves to local conditions as well as the needs of development.*

*He first of all points out the general direction of the research. Starting from modest objectives, they very quickly led to the forming of a basic network requiring numerous studies for its establishment.*

*At present, the work of the Water Engineers of ORSTOM is oriented in six directions.*

*1) Putting into use and improvement of the system of measuring stations; determining of the most suitable instruments for measuring level and flow; difficulties to overcome; best methods of proceeding.*

*2) Summary and interpretation of the elements of flow rate in large drainage basins. The double aim is to distinguish the hydrological characteristics of the river's rate of flow and to condense all existing crude data from observation, which must extend over at least ten to fifteen years.*

*3) Hydrology research of analytical nature on the drainage basins used in the experiments, this being one of the rare means for supplementing the short duration of observation periods. These basins may range from 1000 to 25 or 5 to 10 Km<sup>2</sup>. The equipment must include recording rain gauges (advantage of transmitting information by radio), measuring stations, evaporation measurement stations, sediment pits. The yearly hydrological balance may thus be set up systematically. Research on exceptional floods is much more delicate, and the work of ORSTOM often dealt with this point. Difficulties are increased still more in the large basins.*

*4) Study of one of the factors of hydrological cycle: evaporation, seepage, run-off, study of the intensity or of the spatial distribution of precipitation. Knowledge of the pattern of precipitation is at the basis of all studies; studies on*

# ETUDES HYDROLOGIQUES DE LA ET TECHNIQUE OUTRE-MER

par

**J. RODIER**

*Ingénieur en Chef à E.D.F.  
Chef du Service Hydrologique de l'ORSTOM*

*this subject are numerous. Measurements of evaporation, run-off of the carrying of solids in suspension (evaluation of the specific graduation) are undertaken.*

*5) Studies of the hydrological pattern in very special cases : Sahel zones, lake zones, semi-arid or arid zones.*

*6) United studies with other specialists, indispensable if one is to arrive as closely as possible with these problems : common research among hydrologists, hydrogeologists, geologists, sedimentologists, geochemists, etc.*

## RESUMEN

### **Tendencias actuales de los Estudios Hidrológicos del Departamento de Investigación Científica y Técnica de Ultramar (ORSTOM-France)**

*El autor expone las soluciones a las que han llegado los Hidrólogos del ORSTOM después de 15 años de trabajo, en su esfuerzo por adaptarse a las condiciones locales por una parte, a las necesidades de desarrollo por otra parte.*

*Precisa el autor en primer lugar la dirección general de las investigaciones. Habiéndose fijado en un principio objetivos modestos, dichas investigaciones dieron rápidamente por resultado la constitución de una red básica cuyo establecimiento requiere numerosos estudios.*

*Actualmente, la actividad de los Hidrólogos del ORSTOM está orientada en seis direcciones.*

*1) Explotación y mejoramiento de la red de las estaciones de aforos. Importancia de la verificación y del mantenimiento de la red; determinación de los aparatos más apropiados para medir las alturas y los caudales; dificultades que hay que superar; procedimientos más adecuados.*

*2) Análisis e interpretación de los elementos del régimen en los grandes valles. Ello persigue un doble objetivo : poner de manifiesto las características hidrológicas del régimen del río considerado, y observar todos los elementos brutos de observación existentes. Hay una gran dificultad que reside en la brevedad de los períodos de observación, que habría que procurar prolongar por lo menos diez o quince años.*

3) *Investigaciones de hidrología analítica sobre cuencas experimentales, que constituyen uno de los pocos medios existentes para suplir la brevedad de los periodos de observación. Estas cuencas pueden ser de 1000, 25 o 5 a 10 km<sup>2</sup>. El equipo debe comprender pluviógrafos (interés de las transmisiones de informes por radio); estaciones de aforos, estaciones de medidas de la evaporación, fosas de sedimentos. El balance hidrológico anual puede ser así establecido sistemáticamente. El estudio de las crecidas excepcionales es mucho más delicado y los esfuerzos del ORSTOM se han referido sobre todo a ese punto. Las dificultades son todavía mayores en las grandes cuencas.*

4) *Estudio de uno de los factores del ciclo hidrológico, evaporación, infiltración, chorreo, estudio de intensidad o de repartición espacial de las precipitaciones. El conocimiento del régimen de las precipitaciones se encuentra a la base de todo estudio; los estudios sobre este punto son numerosos.*

5) *Estudios de régimen hidrológico en casos muy particulares; zonas sahelianas, lacustres, semiáridas o áridas.*

6) *Estudios concertados con otros especialistas, indispensables si se quiere lograr un conocimiento lo más completo posible de estos problemas: investigaciones comunes entre hidrólogos, hidrogéologos, geólogos, sedimentólogos, geoquímicos, etc.*

\*  
\*

Il y a maintenant quinze ans que l'ORSTOM a entrepris l'étude systématique des régimes hydrologiques des anciens territoires et des départements d'Outre-Mer et il peut être intéressant de présenter les solutions aux-

quelles ont abouti les hydrologues dans leur effort pour s'adapter aux conditions locales d'une part, aux besoins du développement d'autre part.

## DIRECTIONS GÉNÉRALES DE RECHERCHES

A l'origine, les buts recherchés étaient fort modestes, mais si modestes soient-ils, ils étaient encore fort ambitieux par rapport aux moyens d'action.

Un simple exemple le montre : en 1949, on envisageait un simple hydrologue sans assistant, pour l'ensemble de la Côte-d'Ivoire, du Togo et du Dahomey. Il aurait été pourvu d'un seul véhicule (un Dodge 4 × 4 bien entendu, déjà titulaire d'une longue et glorieuse histoire).

On cherchait :

1) à installer et étalonner *quelques stations de jaugeages repères* pour les divers types de régimes hydrologiques (dont la classification n'était pas encore faite); ceci devait constituer et constitue effectivement le noyau du futur réseau hydrométrique; en même temps, *la documentation ancienne était recherchée et revalorisée*; ce travail n'est pas encore terminé à l'heure actuelle mais les chances de nouvelles découvertes diminuent de jour en jour;

2) à fournir les *données essentielles* pour un certain nombre d'*aménagement*s (centrales hydroélectriques de Grandes Chutes, du Djoué, d'Edéa, de Boali, barrage de Tsiacompaniry, seuil de Zinga, etc.), ou pour résoudre des problèmes particulièrement importants, tels que celui de la capture du Logone.

Très vite, on a cherché à constituer un véritable *réseau de base* et, poussés par la nécessité, les hydrologues de l'ORSTOM ont entrepris de véritables recherches, indispensables à la résolution des problèmes pratiques qui leur étaient continuellement posés : études des déficits d'écoulement, mise au point d'une classification des régimes, études des crues et bilans hydrologiques sur bassins expérimentaux, études de l'écoulement dans les rivières sahéliennes, etc. Une partie importante de ces recherches a été effectuée en collaboration avec le *Service de l'Hydraulique de l'A.O.F.*

Actuellement, l'activité des hydrologues de l'ORSTOM est orientée dans six directions :

1) *Exploitation et amélioration du réseau de stations de jaugeages*, souvent en liaison avec les Services Techniques locaux. Dans certains pays, l'ORSTOM se borne à n'être qu'un simple conseiller dans ce domaine.

2) *Analyse et interprétation des éléments du régime sur les grands bassins*. Cette activité est étroitement liée à la précédente; elle donne lieu à la publication de volumineuses monographies sur les grands cours d'eau, monographies qui font le point sur nos connaissances de leurs régimes et rassemblent tous les éléments connus.

3) *Recherches d'hydrologie analytique sur bassins expérimentaux (2 à 100 km<sup>2</sup>), sur bassins dits de 1 000 km<sup>2</sup>.*

4) *Etude d'un des facteurs du cycle hydrologique : évaporation, infiltration, ruissellement, étude d'intensité ou de répartition spatiale des précipitations.*

5) *Etudes du régime hydrologique dans des cas très particuliers : zones sahéliennes, zones désertiques.*

6) *Etudes concertées avec d'autres spécialistes :*

- recherches communes géologues, hydrogéologues, hydrologues,
- recherches communes hydrologues, sédimentologues, géochimistes, etc.

Les limites ne sont d'ailleurs pas très tranchées entre ces diverses catégories. Beaucoup de recherches de 4<sup>ème</sup> catégorie sont faites sur bassins expérimentaux par exemple. Dans le même ordre d'idées, recherches appliquées et théoriques sont encore étroitement imbriquées. Jamais l'ORSTOM ne serait arrivé à obtenir la documentation actuelle sur les petits bassins sans les recherches d'hydrologie appliquée qui ont permis de tripler au moins le nombre des sites observés.

Nous ferons le point pour chacune des six catégories d'activité énoncées ci-dessus.

## EXPLOITATION ET AMÉLIORATION DU RÉSEAU HYDROMÉTRIQUE

C'est là une besogne ingrate. Comme le disait un de nos hydrologues : «Quand, par extraordinaire, j'ai fini de visiter toutes les stations de mon réseau (couvrant une superficie de 600 000 km<sup>2</sup>), cela va déjà mal aux premières que j'ai visitées». Ce n'est pas un travail de recherches et pourtant, il est impossible de procéder à des recherches sans réseau. Les fonds consacrés à cette activité constituent un investissement, et pourtant l'exploitation d'un réseau présente des caractères indéniables de fonctionnement, de sorte que la manne du Fonds d'Aide et de Coopération s'en détourne très volontiers.

Ce genre de travail devrait être dévolu à un Service local, fournissant les données de base à la fois aux ingénieurs des Travaux Publics et aux ingénieurs agronomes et, effectivement, c'est à peu près ce qui a été réalisé au Dahomey avec la collaboration de l'ORSTOM. Mais le manque d'hydrologues spécialisés et, surtout, de crédits a conduit souvent à la solution suivante : l'ORSTOM utilise ses experts et ses brigades pour l'exécution des mesures, l'installation des stations, l'interprétation des résultats; les Services Techniques payent directement ou indirectement les observateurs. L'ORSTOM publie, plus ou moins rapidement, les résultats. En fait, l'exploitation du réseau devient souvent une activité annexe d'une brigade chargée de recherches particulières et à qui on confie le contrôle des stations du réseau dans un rayon de 200 à 500 km pour la durée de la saison des pluies, ce qui est loin d'être la solution idéale.

Malgré cela, le réseau s'est développé, mais il a souvent été négligé pour des recherches sur bassins expérimentaux par exemple.

Les supports d'échelles en bois, provisoires, ont été remplacés presque partout par des fers en U solidement ancrés. Les éléments dépassent rarement 1 m pour qu'ils soient plus robustes et pour répartir les risques. Ils sont rattachés en nivellement à une borne et ce rattachement est contrôlé périodiquement.

Pendant très longtemps, nous avons dû prohiber l'emploi du *limnigraphe*, l'installation très coûteuse de

ces appareils aurait absorbé nos maigres crédits et les tournées n'auraient jamais été assez fréquentes pour maintenir en état de marche ces enregistreurs capricieux.

Cependant, depuis quelques années, les observateurs d'échelles trouvent souvent sans intérêt cette tâche régulière et quotidienne qui, même payée à son juste prix, ne correspond qu'à un salaire accessoire, et l'extension des réseaux conduit à installer des stations à des endroits inhabités. Il a bien fallu se résoudre à installer des limnigraphes à rotation hebdomadaire ou à déroulement continu, ce qui posait des problèmes infiniment plus difficiles à résoudre que ceux des limnigraphes à visite journalière des bassins expérimentaux.

L'installation doit être telle que le tube doit résister à une crue exceptionnelle. L'exemple récent du cyclone de la Martinique a montré que seuls les tubes très protégés n'ont pas été emportés : une telle installation est très coûteuse en l'absence de culée de pont ou de mur de quai. Dans certains cas, on a dû construire de véritables piles en rivières. Le limnigraphe à bulle offre théoriquement une solution idéale à ce point de vue. Pour ceux de l'IKOPA, le petit tube placé dans un tube en fer a été mis en place dans une saignée dans le rocher et le tout a été recouvert de béton, ce qui réduit les risques de vol et de sabotage. Mais, malheureusement, l'appareil lui-même n'est, après bien des années, qu'un prototype et il serait souhaitable que le constructeur fasse, pour mettre au point cet enregistreur, des efforts équivalents à ceux que déploient les hydrologues pour dépanner régulièrement les limnigraphes à bulle en service. Il serait pourtant normal de voir cet appareil équiper au moins la moitié des stations limnigraphiques, ce qui est loin d'être le cas.

Les limnigraphes à flotteurs eux-mêmes ne sont pas sans défaut; ce n'est pas la durée de déroulement de la bande qui conditionne pratiquement la fréquence des visites, c'est le nombre de pannes. On admet actuellement qu'il faut une visite tous les 15 jours pour avoir une certaine sécurité dans les enregistrements, c'est une des raisons principales qui militent en faveur de l'affectation

à plein temps d'au moins un agent technique à l'exploitation du réseau d'un pays, c'est ce qui est réalisé seulement en Côte-d'Ivoire, au Niger et au Tchad.

Pour les *mesures de débits*, l'emploi du canot pneumatique équipé d'un moteur hors-bord puissant s'est généralisé. La traversée des câbles en est grandement facilitée. A signaler l'emploi de câbles de nylon, mais le câble de 4 mm reste encore le plus fréquemment employé. Le canot d'aluminium et la pirogue ne jouent plus qu'un rôle secondaire; étant difficiles à transporter, ils sont laissés à poste fixe à des stations où est prévu un programme important de mesures; souvent d'ailleurs, on emploie dans le même but des catamarans métalliques.

La traversée des câbles étant devenue plus facile, le nombre de stations à câble fixe s'est peu développé, sauf sur les grands cours d'eau de Madagascar où les jaugeages de crues ont exigé l'installation de véritables stations télégraphiques. Trois d'entre elles ont une portée dépassant



Station d'un limnigraph en zone désertique.

sant 200 m; parmi celles-ci, la station du Mangoky présente une portée de 425 m. L'installation de ces stations exige beaucoup d'expérience. Ce serait une erreur de croire qu'il suffit de commander le matériel à un constructeur spécialisé et qu'il n'y aura aucune difficulté, par la suite, pour mettre en place ce matériel: la réalisation des ancrages, la mise sous tension des câbles exigent de l'hydrologue une certaine expérience.

6. L'exploitation de ces stations a montré que l'emploi de

nacelles s'imposait, le prix de celles-ci est compensé par la suppression de treuils très coûteux; le jaugeage est beaucoup plus rapide, la récupération et le nettoyage du moulinet ne sont plus une manœuvre de longue durée. Or, pour les grandes rivières, les jaugeages sont souvent imprécis par suite de deux facteurs: la mauvaise détermination de la profondeur et l'entrée de sable dans le moulinet.

Une grande attention est accordée à la *détermination des débits de crues passant dans les plaines d'inondation*, les sections sont équipées de manière à permettre ces mesures.

De façon générale, on cherche de plus en plus à éliminer les dernières stations à lit instable; lorsque c'est impossible pour la section de mesure, on cherche au moins à placer l'échelle ou le limnigraph dans une zone à lit stable, même si l'écoulement y est plus ou moins anarchique: c'est ainsi que sur la Betsiboka le limnigraph principal a été installé dans une zone de rapides où toute mesure est impossible. Les jaugeages sont faits plus à l'aval, à l'emplacement de l'ancienne station où l'écoulement est uniforme mais où le lit est instable.

Sur les grands fleuves, tels que l'Ogooué, l'emploi de dispositifs de jaugeages par intégration a permis de gagner beaucoup de temps sans diminuer la précision.

Pour les crues des très petits bassins, on emploie couramment la méthode de jaugeage continu, la courbe de tarage étant tracée, verticale par verticale. Lorsque la montée des eaux est extrêmement rapide pour ces petits cours d'eau, on procède aux mesures de débit uniquement à la décrue; la courbe de tarage est alors une courbe de décrue. La crue est tellement rapide que les erreurs effectuées pendant cette période sont sans influence sur la détermination du maximum de débit et du volume de la crue.

On attache une grande importance aux mesures des débits de basses eaux: des erreurs de 100% ont été relevées autrefois par suite d'extrapolations abusives de la partie inférieure de la courbe de tarage. Des tournées spéciales de mesures sont prévues pour l'ensemble du réseau. La principale difficulté est la mesure des très faibles vitesses et l'instabilité du lit plus grande lorsque les débits deviennent inférieurs à  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Il importe que la carte des vitesses soit telle que les zones à moins de  $10 \text{ cm/s}$  soient réduites au strict minimum.

On implante des sections spéciales de basses eaux: lorsque le débit est très faible, le débit est canalisé avant la mesure; on utilise des micromoulinets et, de façon générale, on choisit les meilleurs jaugeurs pour ces opérations, à moins que l'ingénieur hydrologue ne les fasse lui-même.

Pour les mesures de basses eaux, comme pour les autres, les jaugeages sont effectués de façon complète avec au moins 10 ou 12 verticales et au moins 4 à 6 points par verticale lorsque la profondeur le permet. Ce qui est long dans une série de jaugeages, c'est d'abord le voyage pour arriver à la station (surtout à l'hivernage) et la traversée du câble. Il ne serait pas raisonnable de

lésiner sur le nombre de points. Mais le temps passé sur chaque point ne doit pas être écourté, en principe cette durée doit être égale à une minute.

Les mesures aux flotteurs sont nettement moins employées qu'il y a dix ans, sauf dans les régions à cyclones où c'est souvent le seul moyen d'estimation des débits. L'observation systématique des délaissés de crues est beaucoup plus répandue qu'autrefois.

L'ORSTOM reste fidèle pour le dépouillement à la méthode de dépouillement par carte d'égalités vitesses. La méthode des paraboles est employée lorsque l'écoulement est très régulier ou quand la faible compétence du personnel rendrait dangereux l'emploi de la première méthode. La méthode arithmétique n'est utilisée que dans des cas tout à fait exceptionnels.

Les hydrologues sont devenus beaucoup plus difficiles qu'il y a 15 ans pour l'établissement des courbes de tarage. Dans un cas facile, une bonne courbe doit être

construite sur une vingtaine de points allant du minimum annuel au maximum annuel et bien répartis entre les diverses hauteurs. Dans les cas difficiles : Sénégal, Mangoky, Betsiboka, il faut largement dépasser la centaine de points. De façon générale, les formules de tarage sont tenues en suspicion, surtout lorsque les plaines d'inondation présentent une certaine largeur.

On emploie assez souvent, pour les extrapolations, la formule de STRICKLER MANNING, après mesure de la pente superficielle (surtout en zone aride,) et la méthode de STEVENS. Une très grande importance est attachée aux changements d'échelles et à la transformation des hauteurs en débits.

Tout ceci peut sembler parfaitement terre à terre, mais on a dit souvent qu'il n'était pas possible de faire de la bonne hydrologie sans mesures correctes. Et faire des mesures correctes exige déjà de résoudre un bon nombre de problèmes difficiles.

## ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES ÉLÉMENTS DU RÉGIME HYDROLOGIQUE SUR LES GRANDS BASSINS

Actuellement, ces opérations sont effectuées très souvent dans le cadre de monographies qui ont pour double objet de *dégager les caractéristiques hydrologiques essentielles du régime* du fleuve considéré et de *conserver tous les éléments bruts d'observations existants*. Les monographies, dont le schéma général se rapproche beaucoup de celui publié par la *Société Hydrotechnique de France*, comprennent trois parties :

- les facteurs conditionnels *géographiques et climatologiques* avec une étude particulièrement poussée des *précipitations*,
- les données brutes de *débits* avec toutes justifications utiles sur le *calage successif des échelles*, le tarage, la qualité des observations, etc.,
- enfin, *l'analyse et l'interprétation*.

La seconde partie est séparée nettement de la troisième et aussi complète que possible, de façon qu'il soit possible par la suite d'utiliser les première et deuxième parties pour une nouvelle interprétation; celle-ci n'est effectuée qu'après une étude critique aussi approfondie que possible des données brutes.

La principale difficulté réside dans la brièveté des périodes d'observations. Tous les efforts ont été faits à ce sujet pour que l'on puisse disposer à quelques stations repères de périodes assez longues. Des recherches ont été effectuées depuis 15 ans pour retrouver les documents anciens et pour les revaloriser. L'exemple le plus frappant est celui de l'Ogooué, pour lequel on dispose maintenant de relevés de débits portant sur 30 ans alors qu'au moment des premiers jaugeages on ne disposait que

d'une période d'une quinzaine d'années de relevés de hauteurs d'eau. Le calage des anciennes échelles et la transformation en débits a présenté un travail considérable.

Actuellement, pour la zone tropicale et la zone tropicale de transition, on dispose de relevés continus portant sur une cinquantaine d'années à 4 ou 5 stations et on connaît, au moins dans les grandes lignes, les variations d'hydraulicité sur 70 ans.

Dans la zone équatoriale, la situation est moins bonne, la station la plus ancienne est celle de Lambaréné sur l'Ogooué, déjà citée. Récemment, on a pu obtenir en Côte-d'Ivoire quelques éléments sur l'hydraulicité remontant à une trentaine d'années.

De façon générale, on dispose à peu près partout d'un premier réseau très lâche de stations observées depuis 10 à 15 ans.

On voit donc que la *détermination du débit moyen annuel interannuel* n'est pas sûre si on s'en tient à une simple moyenne. On prolonge presque toujours la période par corrélation avec les données pluviométriques, mais cette corrélation n'est pas toujours effectuée à partir de la hauteur pluviométrique moyenne annuelle. Il a été parfois nécessaire d'utiliser des index pluviométriques plus ou moins complexes, assez proches de la lame d'eau écoulée et obtenus en séparant les précipitations du début de la saison des pluies de celles de la fin, chaque partie des précipitations annuelles étant affectée d'un coefficient différent déterminé par étude des corrélations. Ceci a été utilisé au Dahomey par exemple.



La distribution des précipitations en Afrique de l'Ouest est sensiblement gaussique, tout au moins dans l'intervalle compris entre le 1er et le dernier décile, ce qui, dans de nombreux cas, permet une meilleure détermination des précipitations annuelles et, par suite, du débit moyen annuel interannuel.

Dans certains pays, tels que la Réunion ou la Nouvelle-Calédonie, les débits varient beaucoup d'une année à l'autre et sont difficiles à mesurer avec précision, mais, pour les zones très arrosées, le déficit d'écoulement est faible par rapport aux précipitations. Il peut être de 1 m par exemple, alors que la hauteur de précipitations moyenne est de 8 m. La détermination directe de la lame d'eau écoulée à partir des débits donne donc des résultats assez valables bien que la hauteur d'eau précipitée annuellement soit souvent assez mal connue. On a souvent constaté dans ces pays des variations très importantes des précipitations annuelles portant sur une assez longue durée, cinquante ans par exemple. Ceci impose des réductions importantes sur les moyennes de débits calculées sur les 10 ou 15 dernières années; la réduction peut être de 15 à 25%.

Pour le calcul des *crues exceptionnelles*, les formules mathématiques *ne sont considérées que comme un simple outil* dont, *a priori*, il convient de vérifier la bonne adaptation aux phénomènes. Elles sont éliminées sans pitié dès que la moindre cause physique leur est défavorable. Les relations gaussio-logarithmiques donnent souvent de bons résultats.

Pour les grands cours d'eau d'Afrique de l'Ouest, les hydrologues procèdent ainsi. Tout d'abord, au cours de l'exploitation du réseau, on a recherché soigneusement toutes données concernant le niveau maximal atteint dont se souviennent les riverains. Cela remonte rarement au delà de 20 ans et dans certains cas favorables, au delà de 40 ans. Les pentes sont mesurées, les sections relevées de façon à extrapoler, sans trop de difficulté, les courbes de jaugeages et à transformer les niveaux en débits.

On cherche ensuite à donner une fréquence au maximum relevé depuis le début des observations; on est puissamment aidé à cet effet par les relevés des rares stations repères et les relevés pluviométriques (mais ceux-ci ne remontent pas au delà de 1922). Parfois, il y a une bonne corrélation entre précipitations annuelles et maximum annuel, ce qui permet d'augmenter la longueur de la période d'observations des valeurs maximales annuelles, mais malheureusement ce cas est très rare (Chari à

Fort-Lamy). La période de retour du maximum observé est généralement comprise entre 10 et 30 ans.

Puis, pour toutes les stations repères de même régime, on détermine le rapport entre la crue de la fréquence que l'on a ainsi estimée et la crue centenaire ou millénaire et on choisit, pour la station considérée, une valeur de ce rapport en tenant compte de la superficie du bassin, du réseau hydrographique, de l'existence ou de l'absence de plaine d'inondation, etc.; une fois le résultat obtenu, on procède à des comparaisons les moins vagues possibles avec la pluviométrie.

Si la période d'observation directe dépasse 20 ans, on tente timidement un ajustement à une relation statistique.

S'il s'agit de cours d'eau très irréguliers comme ceux de Madagascar, on se résout à employer la méthode de la courbe enveloppe, mais on indique toujours sur ce diagramme la courbe correspondant à la fréquence décennale qui, généralement, est vaguement connue. Pour des bassins versants de moyenne importance, les hydrologues de l'ORSTOM procèdent à une étude statistique de l'épisode pluvieux de 4 jours, 8 jours ou 15 jours, étudient la correspondance pluie-débit et en déduisent le débit de crue exceptionnelle en faisant appel quelquefois à des méthodes telles que celle de l'hydrogramme synthétique de LARRIEU.

Nous parlerons des petits bassins à propos des bassins expérimentaux.

De façon générale, on détermine non seulement le débit de crue exceptionnelle, mais son hydrogramme. Pour dessiner ce dernier, l'étude des précipitations exceptionnelles et des valeurs exceptionnelles du coefficient d'écoulement sont d'un puissant secours.

Sur un moyen bassin ou même un assez grand bassin étudié depuis moins de 15 ans, les *bassins expérimentaux* sont particulièrement utiles, ils permettent de déterminer les zones dangereuses et les zones de tout repos et, par comparaison avec des bassins mieux connus, ils aident l'hydrologue à tâtonner dans les pénombres qui entourent la crue centenaire et la nuit de ce que l'on appelle la crue millénaire.

Les *étiages* sont généralement définis par leur valeur médiane et non par leur valeur moyenne, ceci est encore plus important dans ce cas que dans celui des crues.

Le calcul de l'étiage absolu de fréquence décennale utilise largement les corrélations avec les précipitations antérieures et la méthode de la charnière, telle qu'elle a été exposée par M. ROCHE au Congrès de l'U.G.G.I. de Helsinki.

## RECHERCHES D'HYDROLOGIE ANALYTIQUE

(bassins expérimentaux, bassins de mille km<sup>2</sup>)

Ce type de recherches a pris un grand développement depuis 1955 pour les deux raisons suivantes :

1) il n'y avait pratiquement aucune station en Afrique de l'Ouest sur les petits cours d'eau;

2) les recherches de ce genre constituent un des rares moyens pour suppléer à la brièveté des périodes d'observations.

A la date du 1er octobre 1963, soixante-quatorze bassins expérimentaux ont été aménagés par l'ORSTOM seul, deux par la S.C.E.T. et l'ORSTOM en collaboration, cinq par les Travaux Publics et l'ORSTOM, un par l'ORSTOM en collaboration avec le B.R.G.M.

Indépendamment des recherches sur le cycle hydrologique, on cherche à déterminer les caractéristiques hydrologiques pour une superficie standard de 25 km<sup>2</sup>.

Au début des recherches de ce genre, un seul bassin était observé. C'est maintenant un cas exceptionnel. On substitue au bassin unique un ensemble de bassins, « emboîtés » si possible : trois au maximum, de façon à couvrir toute une gamme de superficies. La dépense n'est pas beaucoup plus forte mais les données recueillies sont plus nombreuses et plus significatives.

A l'origine, le bassin de 25 km<sup>2</sup> était celui qui était suivi avec le plus de soin, les bassins plus petits faisaient l'objet de recherches plus superficielles.

Actuellement, la tendance est inverse, c'est le bassin de 5 à 10 km<sup>2</sup> qui est le bassin principal : il est plus facile de trouver une petite superficie homogène et il est plus facile également de faire une étude fine sur une surface de ce genre. Mais la station de 25 km<sup>2</sup> reste importante car, entre 5 et 25 km<sup>2</sup>, les régimes voient une évolution très nette.

L'équipement n'a guère changé depuis dix ans; après quelques essais d'équipement complet par *pluviographes*, on en est revenu à deux *enregistreurs* par bassin. Il est fréquent de tracer un réseau de pistes jeepables spécial pour relever les pluviomètres. Deux essais d'équipement de pluviographes à télétransmission avec poste central d'enregistrement sont à noter : un en Côte-d'Ivoire et un en Guyane, tous deux en forêt. Au prix de très grands efforts d'entretien du réseau, très fréquemment mis à mal par chutes d'arbres et coups de foudre, il a été possible d'obtenir une exploitation à peu près régulière du bassin. Mais la véritable solution est le *pluviographe radio* : un premier essai en Guinée s'est traduit par un échec. Il ne semble pas impossible maintenant de parvenir à une transmission correcte des signaux, pendant l'orage. Mais en tout état de cause, il est nécessaire que l'agent technique du bassin soit un bon technicien radio qui procède à des contrôles fréquents des transmissions.

Pour les *stations de jaugeages*, les passerelles en tube MILLS sont toujours très employées, elles sont encadrées par une ou deux digues pour arrêter les débordements, causes d'imprécisions. Les déversoirs et jaugeurs PARSHALL sont de plus en plus utilisés sur les très petits cours d'eau, mais de sérieux déboires ont été rencontrés avec les déversoirs souvent ensablés à l'amont. Autant que possible, les formules des déversoirs et des jaugeurs sont vérifiées par des jaugeages suivant le bon vieux principe de scepticisme qui constitue une des bases de l'hydrologie. Les jaugeages continus sont souvent la règle.

La petite station climatologique aménagée au centre du bassin est pourvue maintenant d'un équipement

correspondant surtout à la *mesure de l'évaporation sur nappe d'eau libre* considérée comme un repère d'évapotranspiration, un lysimètre serait trop coûteux.

Les *mesures de perméabilité* en place, trop décevantes, n'ont pas été poursuivies.

L'aménagement d'une *fosse à sédiments* sur un petit affluent du cours d'eau drainant 5 à 10 km<sup>2</sup> serait à généraliser mais, coûtant du temps et de l'argent, elle n'est réalisée que lorsque les crédits le permettent.

Des calques standard ont été mis au point pour chaque bassin. Ils comportent pour chaque averse : la *carte des isohyètes*, les *hyétogrammes* des enregistreurs et l'*hydrogramme*.

Avec la *courbe de tarage* et la liste *complète* des averses à tous les pluviomètres, ces documents constituent l'ensemble des données brutes qui serviront pour l'interprétation et l'analyse, même si elles sont faites 10 ans après. Il est essentiel de marquer une séparation entre ces données brutes qui doivent être élaborées le plus tôt possible et la suite des opérations qui pourront d'ailleurs être effectuées en plusieurs temps. Il est fréquent, par exemple, que l'on utilise ces données uniquement pour le calcul des fortes crues, quitte à les reprendre plus tard pour d'autres recherches. Souvent la liste des débits moyens journaliers est jointe à ces documents, y compris la période de tarissement qui suit la saison sèche.

Le *bilan hydrologique annuel* est fait systématiquement, il ne comporte pas de difficultés. La recherche des crues exceptionnelles est beaucoup plus délicate et c'est pourquoi les efforts de l'ORSTOM ont surtout porté sur ce point.

Généralement, on suppose que la *crue décennale* sur un bassin de 25 km<sup>2</sup> est déterminée par l'averse décennale moyennant un certain nombre de réserves. Dans certains cas où la saturation du sol joue un rôle primordial, ces réserves deviennent si graves que la détermination de la crue exceptionnelle par le procédé indiqué ci-après perd de sa précision et de sa sûreté. Mais revenons au cas général en Afrique de l'Ouest et supposons déterminée l'averse décennale avec toutes ses caractéristiques : hauteur, hyétogramme, répartition dans l'espace, conditions de saturation antérieures. Il suffit de déterminer le rendement de cette averse ou coefficient de ruissellement et la forme de l'hydrogramme. Le deuxième élément est le plus facile à obtenir. Pour les fortes averses, telles que l'averse décennale, l'écoulement se produit sous la forme de ruissellement superficiel ou s'en rapproche, de sorte qu'on peut utiliser la théorie des hydrogrammes unitaires, non comme un ensemble de lois, mais comme une simple recette. Un soin particulier est accordé à l'analyse simultanée des précipitations et des hydrogrammes de façon à bien déterminer les périodes d'intensités responsables de telle ou telle singularité de l'hydrogramme et, par suite, la durée limite qu'on prend égale, au maximum, à la moitié du temps de montée des averses les plus courtes.

Pour des ruissellements peu intenses, la forme de l'hydrogramme varie avec l'importance de l'écoulement; c'est pourquoi, très tôt, nous avons pris en considération pour la crue décennale surtout les averses dont la hauteur est égale à la moitié ou aux 2/3 de celle de cette averse décennale, même si leur durée dépasse un peu la durée limite.

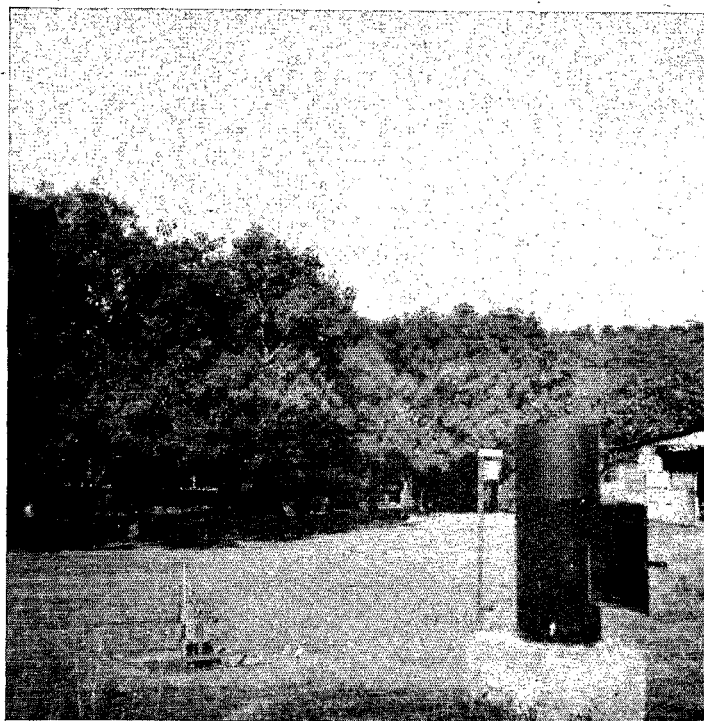
Les hydrogrammes de ruissellement sont représentés par des tableaux donnant pour chaque averse les débits du maximum et à des intervalles de temps égaux avant et après ce maximum, les volumes de ruissellement étant ramenés à une unité commode. On ne dessine plus les hydrogrammes de ruissellement.

Pour déterminer le rendement d'une averse, on peut soit estimer les pertes en mm/h : capacité d'infiltration ou d'absorption, et les retrancher de l'intensité des précipitations telle qu'elle est représentée sur les hyétogrammes, soit calculer le rapport entre volumes de ruissellement et volumes de précipitations ou coefficient de ruissellement. La première méthode, la plus séduisante, n'est plus beaucoup employée; cependant, la détermination de la pluie d'imbibition (André BOUCHARDEAU), ou limite à partir de laquelle une averse donne lieu à écoulement ou ruissellement, paraissait pleine de promesses, mais la mise au point d'un diagramme moyen d'intensité de précipitation pour l'ensemble du bassin ainsi que l'hétérogénéité dans la perméabilité des sols constituent de très sérieux obstacles. Mais il n'est pas impossible que l'on revienne à ce procédé quand l'étude de l'intensité des précipitations aura progressé. Il est en tous cas fort utile actuellement pour les terrains particulièrement perméables.

On étudie donc généralement le *coefficient de ruissellement*, donnée fort grossière mais sans prétention. Il s'agit de déterminer sa valeur pour une averse donnée : annuelle ou décennale ou même de fréquence plus rare, mais pour un bassin donné il varie avec la hauteur de cette averse, son hyétogramme, le degré de saturation antérieur du sol, l'état de la végétation. Il faudrait caractériser chacune de ces propriétés par un index bien déterminé, puis par une étude de régression multiple, mettre au point des abaques schématisant la transformation pluie-débit, en fonction de ces divers index. Ceci est très délicat car il est difficile de définir de tels index et, d'autre part, le nombre d'averses observées dont on dispose est souvent insuffisant pour employer les régressions multiples.

Quelques réussites ont été enregistrées en mettant en jeu deux facteurs : la hauteur de précipitations utile  $P_u$  (1), qui élimine dans une faible mesure les hyétogrammes de forme inusitée, et l'index de saturation de KOHLER

$$I_s = \sum \frac{P_{ai}}{(t_i)^n}$$



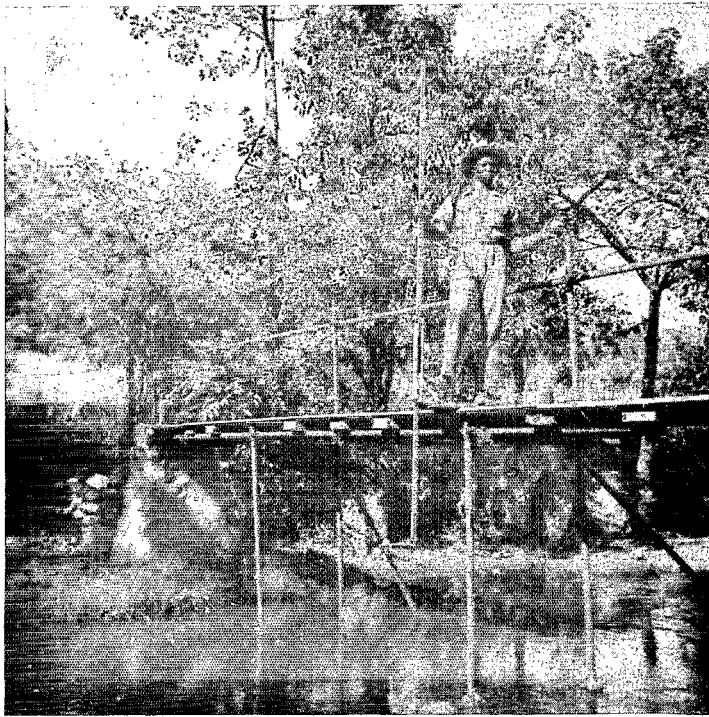
Bassin expérimental de Douning – Station climatologique.

$P_{ai}$ , précipitation antérieure de rang  $i$   
 $t_i$ , temps séparant cette précipitation de l'averse étudiée.

Pour simplifier, on prend parfois  $n = 1$ , mais on a obtenu sur certains bassins de bons résultats avec  $n = 2/3$ . Ce qui est certain, c'est que  $n$  varie avec le type de bassin et de climat. Les résultats ont été aussi bons en forêt qu'en savane pour serrer de près la valeur du coefficient de ruissellement. On voit que l'influence de l'intensité des précipitations est pratiquement négligée, ce n'est pas un très grave inconvénient s'il ne s'agit que de tornades tropicales généralement intenses.

Il existe des moyens simplifiés d'utiliser l'index de saturation : par exemple, en considérant  $Q_0$ , débit du cours d'eau avant le début de la crue. On a enregistré en Afrique de bons résultats, comme en France sur l'Alrance, mais la dispersion expérimentale est toujours plus forte qu'avec  $I_s$  et elle est souvent inadmissible pour permettre l'estimation du coefficient de ruissellement.

Peu de choses ont été faites jusqu'ici à l'ORSTOM pour la prise en compte de l'intensité. La principale difficulté est la détermination d'un index qui soit valable pour les averses multiples. Quant à l'état de la végétation, comme sa croissance est très rapide, on coupe en deux parties les observations de la saison des pluies chaque fois que cette caractéristique présente une réelle importance pour l'écoulement.



Bassin expérimental de Dounfing – Passerelle de jaugeage.

Lorsque le nombre d'averses est insuffisant, les hydrologues de l'ORSTOM emploient toujours le vieux procédé qui consiste à considérer le tableau des caractéristiques des averses et des crues, lequel contient tous les facteurs importants pour l'écoulement et, rassemblant toute leur expérience, ils essaient d'imaginer, à l'aide de ce tableau, quelles seraient les réactions du bassin à l'averse décennale et ... il leur arrive de temps en temps de renoncer à toute estimation, surtout après la première année d'observations.

En ce qui concerne les crues décennales, on est arrivé à une collection de données telle que les recoupements sont possibles. On peut dire maintenant que, pour une grande partie de l'Afrique à l'ouest du Congo, l'exécu-

tion d'études systématiques, comme celles qui avaient été lancées en 1955 pour l'Afrique-Occidentale française, est devenue inutile, puisque les matériaux d'observations sont suffisants. Ceci ne veut pas dire qu'il ne soit pas raisonnable d'en prévoir dans des études plus vastes qu'ils faciliteront.

Nous verrons plus loin d'autres applications des bassins expérimentaux. Il faut noter que l'ensemble des observations accumulées constitue une base analogue aux relevés des stations du réseau et que leur exploitation est loin d'être terminée. Même pour les crues exceptionnelles, la synthèse est à peine commencée.

Si ce type de recherche a permis d'effectuer de sérieux progrès dans la connaissance du régime des très petits bassins, il n'a pas permis d'avancer beaucoup dans l'étude des crues des bassins versants de 500 à 2 000 km<sup>2</sup>, ceux que l'on appelle les bassins de «1 000 km<sup>2</sup>». Il s'agit de cours d'eau pour lesquels le réseau de stations de jaugeages est d'un faible secours.

Un nouvel élément intervient de façon importante en Afrique pour des cours d'eau de cette importance : *la position de l'épicentre de l'averse*. Il y a 2 ou 3 ans, on avait essayé d'aborder cette étude en ajoutant à un ensemble de bassins expérimentaux une station de jaugeages pour 500 km<sup>2</sup>, une autre pour 1 000 km<sup>2</sup>.

Les résultats ne sont pas négligeables, mais ils sont insuffisants et l'estimation *a priori* des crues devient assez hasardeuse. Il faut que les principaux tributaires du cours d'eau de 1 000 km<sup>2</sup> soient étudiés avec soin, ce qui exige plusieurs stations de 200 km<sup>2</sup>, outre la station de 1 000 km<sup>2</sup>, et une bonne densité de pluviomètres, d'où la nécessité de parcourir en tous sens des régions où le réseau de pistes n'est pas assez dense. Par ailleurs, une fois les aménagements réalisés, on se trouvera devant un problème statistique nettement plus difficile que pour le bassin expérimental type de 25 km<sup>2</sup>. Cependant, avec l'aide du *Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques*, un premier bassin de 1 000 km<sup>2</sup>, aménagé sur des bases rationnelles a été mis en exploitation en 1962 au Tchad.

## ÉTUDE D'UN DES FACTEURS DU CYCLE HYDROLOGIQUE

La connaissance du *régime des précipitations* est à la base de toute étude sur bassin expérimental. Actuellement, une vaste étude sur les précipitations journalières de faible fréquence et les intensités est en cours pour l'Afrique de l'Ouest.

Pour la majeure partie des régions étudiées, la distribution des averses peut être représentée par une relation gaussio-logarithmique. Les courbes intensités-durées ont été mises au point pour les pays où dominent les tornades. On y voit une cassure très nette, correspondant au passage du corps de l'averse à la traîne de l'averse.

Les cartes d'isohyètes pour précipitations journalières de fréquence décennale et les courbes d'intensités-durées ont déjà été mises au point pour le Sénégal, le Mali, la Haute-Volta et le Niger.

Les précipitations à caractère continu n'ont pas encore été abordées; elles donneront certainement lieu à des représentations moins nettes.

La répartition des précipitations dans l'espace pour une averse donnée peut être étudiée à partir des résultats des observations sur bassins expérimentaux.

L'ORSTOM a déjà fait des études théoriques sur ce point, mais souvent, dans la pratique, on se contente encore d'utiliser un coefficient d'abattement entre précipitation maximale ponctuelle et précipitation moyenne sur le bassin.

En ce qui concerne l'évaporation, on avait pensé marquer une progression entre : études sur bacs évaporatoires, études d'évaporation de végétation aquatique, lysimètres.

En fait, dès 1956, on s'est surtout ingénié à améliorer la technique de mesure d'évaporation sur bac. On a cherché à mettre au point des enregistreurs de précipitations pour :

- 1) tenir compte de la pluie,
- 2) contrôler le lecteur,
- 3) essayer de mesurer l'évaporation horaire.

Trois types d'enregistreurs ont été étudiés. Ils ont conduit à une exploitation normale. Mais le développement d'un réseau, constitué par ces appareils, aurait des limites, car ils ne peuvent pas être confiés à tous les agents techniques. Ils ont permis de vérifier un fait déjà constaté par G. HIEZ, en Guyane : les erreurs apportées par la différence de dilatation du bac et de la masse d'eau qu'il contient.

Le réseau actuel est constitué généralement par des bacs Colorado enterrés de 1 m<sup>2</sup>. L'évaporation est toujours mesurée en déterminant le volume évaporé, le niveau de l'eau étant ajusté à une pointe fixe.

Un certain nombre de bacs de classe «A» ont été placés à côté des bacs Colorado, pour permettre la comparaison des résultats sur le plan international. Les bacs sont presque toujours placés à côté d'une petite station

climatologique mesurant les différents facteurs de l'évaporation, sauf le rayonnement. Pour combler cette lacune, des installations plus complètes sont en cours au Tchad.

Un seul bilan a été fait jusqu'ici : celui du Lac Tchad.

La détermination systématique des déficits d'écoulement annuels, complétée par des bilans hydrologiques des bassins expérimentaux, permet déjà d'obtenir un premier aperçu de l'évapotranspiration réelle; mais des études lysimétriques ne seraient pas superflues.

Des tâches plus urgentes ont nécessité l'arrêt des mesures d'infiltration systématiques par les méthodes MUNTZ et PORCHER. Le caractère très sommaire de ces méthodes, surtout utiles pour la détermination des bassins en cours d'irrigation, ne les rendait pas très encourageantes; peut-être seront-elles reprises plus tard avec une méthodologie différente.

Le ruissellement est étudié de façon globale, averse par averse sur bassins expérimentaux : on cherche actuellement à mettre au point une méthode d'étude plus fine de ce phénomène sur le terrain.

Les transports solides en suspension sont mesurés sur moyens et grands cours d'eau par des procédés très simples : prélèvements par seau ou pompe Japy. Un seul appareil un peu compliqué est employé : la bouteille de DELFT qui capte les sables pour lesquels une certaine distorsion est à noter à la pompe Japy.

Sur les bassins expérimentaux, les fosses à sédiments viennent compléter les parcelles d'érosion, mais elles sont encore trop rares. On cherche à évaluer la dégradation spécifique en T/an/km<sup>2</sup> et les variations de sa moyenne depuis la tête des bassins jusqu'aux cours d'eau les plus importants.

## ÉTUDES HYDROLOGIQUES DANS DES CAS TRÈS PARTICULIERS

Les études de cours d'eau en zone sahélienne telles que celles du Chari et du Logone sont moins pratiquées qu'il y a 7 ou 8 ans. La technique est maintenant bien au point, mais les zones lacustres qui restent à étudier : Niger et Sénégal, exigent des moyens considérables et actuellement seules des zones très restreintes font l'objet de campagnes de recherches; cependant, l'expérience acquise au Tchad permet de meilleurs résultats avec de moindres efforts.

Pour les régions arides et semi-arides, rappelons la méthode mise au point par l'ORSTOM :

1) Une brigade extensive, dirigée par un ingénieur : parcourt le pays pendant la période où il peut se produire des averses, relève un réseau de pluviomètres totalisateurs, visite un certain nombre de stations hydro-

métriques pourvues d'échelles à maximum, mesure les débits qu'elle peut, reconstitue les maximums grâce aux délaissés de crue, observe un pluviographe mobile.

2) Une brigade fixe, dirigée par un agent technique : observe un bassin expérimental et l'oued le plus proche de façon continue.

L'hydraulicité est rattachée à celle donnée par le pluviomètre du poste le plus proche. Une certaine avance a été prise dans ce domaine où il a été possible de constater :

- 1) que les crues sahariennes ne sont pas un mythe (même au Tibesti),
- 2) que le ruissellement qui se produit certaines années peut être largement suffisant pour alimenter les nappes.

## ÉTUDES CONCERTÉES AVEC D'AUTRES SPÉCIALISTES

Les premières ont été des études mixtes entre hydrologues et pédologues pour les recherches concernant le bilan hydrique du sol à Madagascar. M. RIQUIER en a tiré des conclusions intéressantes, mais ses études n'ont pas été poursuivies, faute de crédits et par suite d'un personnel chercheur pas assez nombreux.

Signalons encore deux autres essais du même genre; l'un, au Tchad, concernait l'étude du ruissellement et de l'infiltration avec la collaboration pédologue-hydrologue; au Moyen-Congo, les mêmes partenaires avaient cherché à effectuer une étude commune de l'érosion, des transports solides et du ruissellement.

Ces essais n'ont pas produit beaucoup de résultats par suite du manque de moyens. Cependant, de telles études sont indispensables. Il est impossible d'étudier érosion et transports solides sans observer précipitations et ruissellement, ce qui exige au moins la collaboration des pédologues et des hydrologues.

Celle-ci peut être relativement facile si les deux spécialistes font partie du même organisme.

Depuis deux ans, il semble que de telles études aient plus de chances de succès, car elles sont régulièrement financées et elles font partie du programme général de recherches de l'ORSTOM.

On peut citer deux exemples :

1) L'étude du *bassin expérimental* de Korhogo par

les géologues du B.R.G.M. et les hydrologues de l'ORSTOM en vue de la recherche du processus d'alimentation de la nappe. Les hydrologues étudient le cycle hydrologique averse par averse jusqu'à la fin de l'infiltration primaire. Les géologues observent les variations de la nappe à partir d'un réseau dense de pluviomètres, et les variations de débits des sources en suivant de très près les variations des précipitations et du ruissellement.

2) Ce qu'on appelle à l'ORSTOM le «Projet MANGIN», du nom de son promoteur. Sédimentologues, géologues, pédologues et hydrologues étudient sur le bassin du Bandama, avec les variations du ruissellement, l'ensemble des phénomènes d'érosion et de sédimentation, depuis les parcelles expérimentales jusqu'à l'estuaire, les matières dissoutes, le cycle géochimique, etc.

Ces deux types d'études seront certainement reproduits ailleurs, dès que la méthodologie en sera bien au point.

Au vu de ce qui précède, on mesure toute l'importance de la tâche à accomplir, des retards pris en certains domaines, des quelques résultats obtenus en d'autres. On devine surtout la disproportion entre le coût des observations sur le terrain et celui du travail d'interprétation et d'analyse au bureau. Il n'y a pas lieu de s'en scandaliser; c'est là une des caractéristiques essentielles des recherches hydrologiques.