

La transposition des résultats des bassins représentatifs et ses problèmes

J. RODIER

Ancien Chef du Service Hydrologique de l'ORSTOM

RÉSUMÉ

Dans la plupart des cas, les bassins représentatifs sont aménagés en vue de la transposition des résultats obtenus à d'autres bassins versants non observés. Mais il n'est pas très fréquent que cette transposition soit effectuée avec succès. Cette transposition pouvant d'ailleurs être simplement ébauchée ou réalisée de façon systématique suivant les cas.

Après un rappel des principales causes des échecs on énumère les principes de base de la transposition : parfaite connaissance du bassin représentatif, définition précise et indépendante des variations climatiques du paramètre hydrologique à transposer, élaboration de régressions entre les caractéristiques hydrologiques et les différents paramètres physiographiques et climatologiques des bassins, bonne connaissance des bassins qui doivent bénéficier de la transposition.

Plusieurs exemples de transpositions effectuées à l'ORSTOM sont présentés avec les limitations de leur emploi et leurs insuffisances : Ils concernent les caractéristiques hydrologiques suivantes : crues décennales dans l'Afrique de l'Ouest et une partie de l'Afrique Centrale, courbe de distribution des écoulements annuels (y compris les années très sèches), dans le Sahel Tropical africain, écoulements moyens annuels en régions tropicales, crues décennales en zone forestière tropicale.

Les premiers et troisièmes cas utilisent des modèles globaux et le concept de bassin homogène, les seconds et le quatrième, le concept de bassin-type non homogène. Ce dernier cas montre le profit que l'on peut tirer de l'emploi du mini-simulateur.

ABSTRACT : *The transposition of representative basin results and its problems*

Most of the representative basins are equipped in view of the transposition of their results. But it is not so frequent that this transposition be realized successfully. This transposition may be simply sketched or may be carried out very carefully. After recalling the main reasons of failures, the basic principles of the transposition are presented : perfect knowledge of the representative basin, a precise definition of the hydrological parameter to be transposed, independent of the climatological variations, setting up of regressions between the hydrological characteristics and the physiographical and climatological parameters of the basins, good knowledge of the basins for which the transposition should be made.

Several examples of transposition carried out by ORSTOM are presented with the limitations of their use and their deficiencies. They are relative to following hydrological characteristics : 10-year floods in West Africa and part of Central Africa, distribution curve of annual runoff (including very dry years) in tropical african Sahel, mean annual runoff in tropical areas, 10-year floods in tropical forest areas.

The first and the third example use global model and homogeneous basin concept, the second and the fourth the concept of type basin not homogeneous. This last case shows what could be the benefit of the use of small sprinklers.

1. AVANT-PROPOS

Un certain nombre de transpositions systématiques de résultats de bassins représentatifs ont été effectuées par des chercheurs de l'ORSTOM. Les méthodologies employées sont différentes parce qu'elles étaient adaptées chaque fois à des buts différents, à des données de qualités différentes et à des moyens disponibles différents. Il faut dire aussi qu'au cours des années on a fait quelques progrès.

On en arrive quelquefois à considérer qu'il y a une « méthodologie ORSTOM » que l'on cherche à appliquer dans des conditions différentes de celles pour lesquelles ces méthodologies ont été mises au point. Cela peut donner des résultats curieux, d'autant plus que, tout au moins en ce qui me concerne, il y a bien des maillons du raisonnement qui n'ont jamais été explicités. Il n'y a pas de « méthodologie ORSTOM ». Il y a un certain nombre de problèmes à résoudre, pour lesquels on a cherché les solutions qui paraissaient les mieux adaptées. Mais derrière ces méthodologies, il y a des principes dont il convient de tenir compte et des concepts qui peuvent être utiles, même dans le cadre d'études menées de façon tout à fait différente comme le seront probablement les transpositions faites dans les années qui vont suivre, c'est pourquoi nous avons jugé utile d'exposer ci-après les problèmes essentiels de transposition qui se sont posés dans le cadre du Service Hydrologique de l'ORSTOM, non pas pour procéder à une récapitulation historique qui ne serait que d'un intérêt limité, mais parce que cela pourra servir à quelque chose. Il se peut même que certaines de ces méthodologies puissent être utilisées intégralement, mais cela devra être considéré comme une simple coïncidence, et il conviendrait de vérifier d'abord avec le plus grand soin si elles sont bien adaptées au problème à résoudre.

2. INTRODUCTION

En principe, les bassins représentatifs sont aménagés avec la ferme intention de transposer les résultats qui y sont obtenus sur d'autres bassins « semblables ». Deux cas un peu particuliers semblent à première vue échapper à cet objectif : les bassins utilisés surtout pour la formation scientifique et ceux sur lesquels on met au point des instruments ou des méthodologies particulières, encore est-il rare que des petits bassins soient utilisés exclusivement à cet usage. Mais, même dans ce dernier cas, les bassins versants doivent être choisis de telle façon que leurs caractéristiques climatologiques et physiogéographiques ne s'écartent pas trop de celles que l'on rencontre dans le cas général ou de celles qui correspondent à un régime hydrologique bien déterminé auquel on s'intéresse particulièrement. Il y a également le cas où on aménage une série de bassins représentatifs en régions difficiles dans le but plus ou moins officiel de suppléer aux lacunes ou aux défaillances du réseau hydrométrique national. L'effort important que l'on fait pour assurer les observations et mesures sur ces bassins conduit à de courtes séries de relevés de débits et de précipitations de qualité acceptable et, souvent même, de bonne qualité, plus facilement que dans le cadre de l'organisation des réseaux, organisation plus rigide et qui exclut toute opération coûteuse comme l'aménagement de bassins représentatifs. Ces derniers bassins ne permettent pas en général l'analyse du bilan hydrologique ou des études fines des processus. Peuvent être classés dans cette catégorie les bassins lancés avec des ambitions beaucoup moins modestes qui ne sont pas satisfaites par suite de moyens insuffisants, comme nos bassins de la Dumbea. Mais même dans ce cas, les résultats de ces bassins devraient donner lieu à des transpositions tout comme les résultats des stations du réseau contrôlant de petits bassins.

La transposition des résultats est donc une opération qui devrait être absolument générale chaque fois que l'on aménage un bassin représentatif. Et cependant, il est difficile de dire que dans la plupart des cas cette transposition ait été réussie. Nous irons jusqu'à dire que parfois on n'y songe même plus quand on arrive au stade de l'interprétation et l'on s'étonne après que les recherches sur bassins représentatifs ne soient pas prises au sérieux par tout le monde.

Effectivement, si on considère l'ensemble du millier de bassins représentatifs étudiés dans le monde, on trouve assez peu de cas où on ait mis au point une méthodologie acceptable pour cette transposition. Les échecs sont nombreux, Pourquoi ?

3. RAISONS PRINCIPALES DES ÉCHECS DE TRANSPOSITION DES RÉSULTATS

Avant d'évoquer ces raisons, il est nécessaire de poser certains problèmes de principe.

On ne trouve pas fréquemment dans la nature deux bassins versants rigoureusement identiques. C'est pourquoi on a dit quelquefois de certain bassin représentatif qu'il n'était représentatif que de lui-même. En fait certaines différences peuvent être négligées et on peut tenir compte d'autres différences par des corrections judicieuses des résultats. Mais dans quelle mesure peut-on apprécier que deux bassins versants présentent des caractéristiques suffisamment proches pour que l'on puisse procéder à la transposition ? Comment peut-on apprécier et surtout chiffrer leurs différences ? Comment peut-on apporter les corrections convenables aux résultats ? Autant de problèmes à résoudre.

Une première étape consiste à acquérir une parfaite connaissance des caractéristiques hydrologiques, climatologiques et physiogéographiques du bassin représentatif, et également une connaissance suffisante des caractéristiques climatologiques et physiogéographiques du ou des bassins versants auxquels on désire transposer les données du bassin représentatif. Ceci suppose que toutes les caractéristiques susceptibles d'avoir une action sur l'écoulement soient quantifiées ou au moins classifiées. Nous reviendrons plus loin sur ce point.

La seconde étape correspond à une excellente définition et une bonne estimation des résultats à transposer. Par exemple, si la transposition concerne l'écoulement moyen annuel, il est dangereux d'utiliser la simple moyenne des trois ou quatre écoulements annuels observés sur le bassin représentatif. Le procédé correct à utiliser consiste à mettre au point un modèle pluie-débit à partir des résultats déjà obtenus, à utiliser comme entrée dans le modèle une, ou mieux, plusieurs longues séries temporelles de précipitations pour des stations correspondant exactement au même régime pluviométrique que le bassin représentatif. Les longues séries d'écoulement annuels produits par le modèle permettront d'estimer une moyenne valable.

La troisième série d'opérations est l'élaboration correcte de relations ou plus souvent de régressions en vue d'estimer les corrections à apporter aux caractéristiques hydrologiques du bassin représentatif pour en déduire celle du ou des bassins pour lesquels on effectue la transposition. Par exemple, pour tenir compte de la différence de superficie, on aménage un ensemble de bassins représentatifs de telle façon que les plus grands englobent les plus petits, ce qui permet de déterminer la correction à effectuer qui peut être définie, par exemple, pour un débit de crue de retour T par une régression du genre $Q_T = A_T Q_1 \sqrt{S} AT$ étant une constante. Il est très difficile cependant, même dans ce cas simple, d'extrapoler les données d'un bassin de 10 km² à un autre bassin de 200 km². Dans le même ordre d'idée, il est impossible par des corrections de fournir des données pour un bassin imperméable en partant d'un bassin représentatif très perméable.

Si aucune des trois opérations n'est effectuée correctement, et ce n'est pas facile pour la première et la troisième, on court à l'échec en opérant la transposition, surtout si elle doit être précise. Bien entendu s'ajoutent à ces possibilités d'échecs : le cas où le bassin n'a pas été choisi de façon judicieuse, celui où la qualité des observations et des mesures n'a pas été suffisante et enfin le cas où la durée des observations a été insuffisante.

Il n'est pas fréquent que toutes ces conditions se trouvent remplies pour un bassin représentatif, mais même lorsqu'elles le sont, la transposition est parfois impossible pour certaines caractéristiques hydrologiques. Par exemple le débit minimum annuel sur de petits bassins dans certaines conditions géologiques (régions plus ou moins karstiques par exemple).

4. DIVERSES CATÉGORIES DE TRANSPOSITION

Toutes les transpositions ne demandent pas la même rigueur dans les opérations. Nous mentionnerons ci-dessous quelques-unes de ces catégories.

1) Les hydrologues souhaitent avoir une idée des processus hydrologiques dans une zone homogène. Par exemple, pour l'étude de la crue du projet pour un grand barrage, une partie du bassin versant est imperméable et la longueur des observations est insuffisante pour obtenir des informations valables sur l'écoulement provenant de cette partie des bassins pour des événements très rares, comme c'est le cas pour la crue du projet. L'étude d'un bassin représentatif dans cette zone prouve que dans cette partie du bassin les dernières fractions de l'averse correspondant à la crue du projet sont affectées d'un coefficient de ruissellement voisin de 100%. On peut ainsi parvenir à une bonne évaluation de la contribution de cette partie du bassin à la crue du projet.

2) Dans le cas de la mise au point d'un modèle déterministe, il est utile d'avoir une bonne connaissance des processus physiques qui ont une influence significative sur la structure du modèle. Un bassin représentatif peut répondre à cette question au moins partiellement.

3) L'hydrologue désire obtenir une estimation grossière concernant l'effet du traitement physique du bassin (suppression de la forêt, pratique culturale particulière) sur certaines formes de l'écoulement. Les bassins expérimentaux répondent à cette question par des transpositions qui ne sont pas très complexes si seule une estimation approchée ou une simple indication de tendance est nécessaire.

4) L'objectif est la transposition à des bassins non observés de caractéristiques hydrologiques permanentes déterminées sur des bassins représentatifs, caractéristiques telles que : débit moyen annuel (ou volume d'écoulement moyen annuel, ou lame d'eau écoulée moyenne annuelle en mm), crue décennale (ou correspondant à tout autre quantile), débit minimum moyen annuel, ou toute autre caractéristique y compris celles intéressant l'érosion ou la qualité de l'eau. Souvent la transposition est faite sur les paramètres du modèle de transformation pluie-débit et non sur les caractéristiques hydrologiques.

Pour certains régimes hydrologiques le débit de crue décennale peut être facilement transposé, car les problèmes posés par les différences de perméabilité des sols sont simplifiés, l'écoulement moyen annuel est plus difficile à transposer, en ce qui concerne le débit minimum annuel cette opération est dans de nombreux cas très difficile et parfois impossible. Les processus d'alimentation et de restitution des nappes sont complexes, en particulier l'hétérogénéité du sous-sol est un sérieux inconvénient, et même si le sol et le sous-sol sont homogènes il convient de rester prudent, surtout pour les très petits bassins versants. En ce qui concerne la transposition des paramètres des modèles, les difficultés varient beaucoup d'un cas à l'autre.

5. CLASSIFICATION DES BASSINS

Les bassins représentatifs peuvent être équipés pour répondre à certaines questions concernant une zone bien définie avec des conditions climatiques et physiographiques également bien définies : on a affaire à ce qu'on appelle une région hydrologique homogène (DUBREUIL 1965).

Même dans le cas de ces bassins en zone homogène, où la plupart des caractéristiques sont les mêmes, certains problèmes de transposition sont à résoudre : la superficie varie d'un bassin à un autre, généralement les caractéristiques concernant la pente ne sont pas les mêmes et l'utilisation des sols peut varier d'un bassin à un autre. Il est utile même, dans ce cas simple, d'équiper un groupe de bassins voisins présentant des superficies et des utilisations de sols différentes. Il est aisé de voir ici qu'une bonne planification pour le choix de bassins représentatifs facilite la transposition. La superficie ne pose pas de problèmes à chiffrer, pour les caractéristiques de pente ce n'est pas trop difficile, l'utilisation des sols crée quelques complications, mais la classification ne s'impose pas de façon aussi absolue que dans le cas suivant : les bassins représentatifs peuvent être équipés pour l'estimation des caractéristiques hydrologiques des petits bassins versants de tout un pays ou d'une région étendue, avec des caractéristiques très diverses. Dans un tel cas, la classification des bassins sur la base de leurs caractéristiques climatiques et physiographiques doit être mise au point en premier lieu. Cette classification deviendra par la suite une des bases de la transposition. La classification des bassins versants a été étudiée pendant plusieurs années par le groupe de travail de l'UNESCO sur les bassins représentatifs et expérimentaux. Deux documents donnent de bonnes informations sur ce sujet : le guide de l'UNESCO sur les bassins versants représentatifs et expérimentaux édité par V. OURIVAEF et C. TOEBES en 1970 et un ouvrage à diffusion limitée « La classification des bassins représentatifs et expérimentaux », rédigé par R. HADLEY 1975.

Le groupe de travail de l'UNESCO a considéré trois catégories de classifications : la macro-classification, la méso-classification et la micro-classification. Seuls les deux premiers types de classification sont décrits dans le second ouvrage cité.

Ces deux types de classifications qui ont été mis au point avec la collaboration de P. DUBREUIL et de l'auteur, peuvent permettre dans une certaine mesure, et avec beaucoup de prudence, de comparer les résultats de bassins représentatifs de plusieurs pays, et surtout d'identifier de grandes catégories de bassins, mais pour permettre la planification des bassins et de la transposition, il faut aller plus loin et considérer la micro-classification qui seule permet d'assurer que deux bassins sont identiques (à la surface près).

Les deux premières classifications comprennent déjà un grand nombre de rubriques, et à première vue la complexité de la micro-classification, qui descend encore davantage dans le détail, peut rebuter l'hydrologue. Mais dans la pratique, il est impossible de tenir compte de tous les facteurs susceptibles d'avoir une influence et c'est d'ailleurs inutile. Il ne faut pas oublier que la macro et la méso-classification ont été étudiées à l'échelle mondiale. Dans la pratique, la micro-classification est simplement approximative et concerne au maximum une très grande région pour laquelle de nombreux paramètres ne sont plus à considérer ; en outre on ne considère que les facteurs prépondérants pour la région considérée et pour les caractéristiques hydrologiques à étudier. On verra plus loin que pour l'Afrique de l'Ouest, les facteurs climatiques ont été réduits en ce qui concerne l'étude des crues sur petits bassins versants à très peu de chose : après subdivision en trois grandes zones climatiques il n'est plus resté qu'un seul paramètre : la hauteur de précipitations annuelle. Une étude beaucoup plus fine ajouterait peut-être un ou deux paramètres permettant de mieux caractériser la violence des averses convectives correspondant à des conditions particulières d'exposition. On ne peut pas présenter ici plus de détails sur la micro-classification, car chaque exemple de transposition sur une grande surface exige, si on veut rester efficace, une classification différente.

En effet, le besoin de réduire au minimum le nombre de paramètres caractérisant les bassins et ses conditions climatiques, compte tenu des faibles possibilités offertes par le nombre limité de bassins représentatifs, conduit d'un pays à un autre, d'une caractéristique hydrologique à une autre et même d'un Service hydrologique à un autre à des choix différents de paramètre à considérer.

Quelques exemples sont donnés à ce sujet dans le guide de l'UNESCO cité plus haut. Mais il ne faudrait pas conclure à une anarchie totale dans le choix des paramètres à considérer.

Les classifications présentent un bon nombre de points communs. Par exemple, indépendamment des paramètres climatiques : (très souvent les précipitations et l'évaporation) le facteur le plus important dans presque tous les cas correspond aux propriétés du sol et du sous-sol caractérisées par un seul indice tel que : la profondeur du sol, les relations entre divers éléments du sol, un indice lié aux caractéristiques géologiques, etc.

La solution du problème de la caractérisation quantitative des propriétés hydriques des sols est la clef de la transposition. Des solutions approchées ont été trouvées pour certains cas, mais il n'y a pas de solution générale. Dans certains cas, l'influence du sol et du sous-sol peut être plus ou moins marquée par le type d'occupation des sols et les diverses pratiques culturales et là le problème peut devenir beaucoup plus complexe.

Les caractéristiques liées à la pente jouent un rôle moins important, sauf lorsque la pente est très forte sur les versants, l'effet de la pente devient alors prépondérant et l'effet amortisseur de la couverture végétale devient peu opérant tout au moins sur l'écoulement superficiel. Quelques exemples de classifications seront donnés plus loin.

6. PRINCIPES DE LA TRANSPOSITION

On ne considère ici que le quatrième type de transposition mentionné plus haut, c'est-à-dire la plus complète. Une bonne partie des principes de cette transposition a été énoncée par P. DUBREUIL au Colloque AISH-UNESCO de Wellington 1970. Nous avons dû en citer quelques-uns au début de cet exposé, ce qui permettra d'alléger un peu ce paragraphe.

La définition des zones homogènes, la planification correcte, le choix judicieux des bassins représentatifs et la parfaite description du ou des bassins représentatifs sont des préliminaires à la connaissance des caractéristiques climatologiques et physiographiques des bassins représentatifs ou de l'ensemble des bassins qui feront l'objet de la transposition. Il a déjà été question de la classification des bassins en ce qui concerne les zones hydrologiques homogènes (P. DUBREUIL) qui en principe correspondent à un ensemble bien défini de valeurs des paramètres choisis caractérisées pour une région géographique donnée, le Nord-Est du Brésil par exemple, par les indices P3K1S3 (précipitation moyenne annuelle supérieure à 800 mm/an, terrain imperméable sur socle précambien, pentes modérées). L'exemple donné ici est particulièrement simple, la classification a donné toutes satisfactions, compte tenu des conditions de l'écoulement et des problèmes posés. On est parfois obligé de considérer des combinaisons beaucoup plus complexes de paramètres pour définir une zone homogène. C'est une chance de pouvoir représenter les facteurs climatologiques par le simple indice P. Si on ne veut pas s'imposer des complications inutiles, la zone homogène doit être définie non sur le plan mondial mais dans une grande région correspondant à des conditions climatiques assez voisines, par exemple la zone sahélienne au Sud du Sahara, la zone tropicale au sens large qui comprend cette zone sahélienne rassemble déjà des conditions trop diverses. On peut utiliser ces principes dans de vastes régions où les diverses caractéristiques varient très progressivement, mais on peut également les appliquer avec un peu plus de précaution à des régions accidentées telles que l'Équateur, certaines parties de l'Est africain (où on passe rapidement du Sahel à un étage alpin) ou de l'Europe occidentale. Ces régions se présentent alors comme une véritable mosaïque de surfaces de faibles étendues ; à l'intérieur de chacune d'elles les conditions de l'écoulement restent les mêmes et une zone homogène correspond alors à toutes les parcelles de la mosaïque qui présentent les mêmes conditions. Ceci nous amène à dire un mot de l'homogénéité.

En fait, un petit bassin est rarement homogène, il comporte en général au moins trois types de sols différents : sols de plateaux, sols de pente et sols de fond de vallée, et il y a bien pire. En première approximation et en toutes connaissances de causes on a dû considérer les bassins comme globalement homogènes : l'indice de perméabilité doit tenir compte des influences de sols de perméabilités différentes, mais on verra qu'on peut faire mieux et dans ce cas la zone homogène ne correspond plus à des bassins avec une perméabilité donnée, mais à des bassins présentant sensiblement le même type de paysages avec les mêmes composants qui eux ont une perméabilité bien déterminée. Le cas le plus caractéristique est celui de la région de l'Ader Douchi au Niger dont il sera question plus loin. On a considéré l'hétérogénéité en ce qui concerne la perméabilité mais rien n'empêche d'en faire autant pour une combinaison de couvertures végétales si elles constituent le facteur dominant.

Le choix des bassins représentatifs n'est jamais parfait : ce n'est qu'après l'interprétation des résultats que l'on peut vraiment savoir si ce choix a été parfaitement judicieux. L'essentiel est que ce choix ne soit pas trop défectueux et qu'on sache bien en quoi il est défectueux et quelles corrections doivent être apportées aux données pour pouvoir transposer. C'est ici que se pose le problème de la superficie des bassins expérimentaux. Pour plusieurs raisons ceux-ci ne couvrent que de faibles surfaces et dans ce cas le cycle hydrologique présente un caractère particulier. Même si la dimension est assez grande pour que le bassin comprenne ce qu'on appelle la « tête de l'eau » en pays non désertique, l'écoulement de base est insuffisant, par contre l'écoulement souterrain oblique est trop important par rapport à ce qu'il serait sur un bassin de 30 à 60 km², donc ils ne permettent pas la transposition à des bassins même de 5 à 15 km² par exemple pour les débits de basses eaux. Une étude des débits de base à l'aval des bassins expérimentaux peut permettre de pallier cet inconvénient.

On n'insistera jamais assez sur l'importance d'une parfaite connaissance du bassin représentatif. Combien d'hydrologues ont procédé à de savantes interprétations sans même avoir parcouru à pied deux ou trois itinéraires sur le bassin représentatif. Deux points souvent négligés sont le régime des petites nappes temporaires à faible profondeur qui joue un très grand rôle dans l'écoulement et la mise au point des cartes périodiques de l'état des cultures (au moins trois à six par an suivant le climat). Très souvent la caractérisation des sols est trop sommaire.

Il s'agit en second lieu de bien définir la ou les caractéristiques hydrologiques à transposer. Ceci passe souvent par l'extrapolation d'une valeur trouvée sur un court échantillon observé pour aboutir à une valeur correspondant à une longue série temporelle. Ce qui suppose l'existence de longues séries climatologiques de référence.

Actuellement, la transposition bute sur deux difficultés : le petit nombre de longues séries de précipitations dépouillées à court pas de temps, 1 heure ou 1/2 heure (1/4 d'heure serait l'idéal) et le très petit nombre d'études de la structure spatiale des averses sur de courts pas de temps pendant de très longues périodes. Ceci gêne considérablement la reconstitution de longues séries de crues pour des bassins représentatifs trop grands pour qu'on puisse utiliser des modèles globaux ou ceux pour lesquels il est difficile d'admettre que la plupart des averses présentent à peu près le même diagramme de variations d'intensités dans le temps, ce qui est un cas extrêmement courant.

On passe ensuite à l'analyse de l'influence des facteurs conditionnels dominants sur la caractéristique hydrologique que l'on étudie ou les paramètres du modèle pluie/débit liés à cette caractéristique. Ceci suppose l'équipement de plusieurs bassins représentatifs couvrant de 1 à 100 ou à 500 km² pour une même zone homogène ou, au moins, d'un ensemble de bassins correspondant à plusieurs superficies et plusieurs indices de pentes ou de couverts végétaux ou de toute autre nature. C'était d'ailleurs là une des opinions les plus courantes au Colloque d'Helsinki. Le choix des bassins doit être tel qu'on couvre une large gamme de variations pour ne pas avoir à extrapoler. La façon de dégager les relations entre paramètres et caractéristiques hydrologiques importe peu tant qu'elle reste correcte, qu'il s'agisse de régressions multiples, de constructions graphiques ou de toute autre méthode. Mais il importe que cette analyse soit étayée par une bonne compréhension des processus sur le terrain et à cet effet le mini-simulateur de pluie, ou tout autre infiltromètre, est un outil puissant quoique assez lourd et coûteux.

Il reste maintenant à connaître suffisamment les bassins sur lesquels on va transposer une ou plusieurs caractéristiques hydrologiques du ou des bassins représentatifs. Dans la pratique cette étude doit être beaucoup plus extensive que l'analyse des facteurs de l'écoulement sur le bassin représentatif lui-même. Le maximum que l'on puisse faire dans certains cas c'est une étude extensive sur le terrain de l'écoulement pendant une période pluvieuse ou pendant la période de basses eaux, s'il s'agit de transposition d'étiages. Dans le premier cas, les débits de crues sont déterminés a posteriori d'après les délaissés de crues (ce que Y. BRUNET-MORET appelle l'hydrologie contemplative). On peut aussi faire une campagne de simulateur de pluie sur les types de sols qui en valent la peine. La majeure partie de l'information est à recueillir sur cartes de toutes natures, sur photographies aériennes et maintenant par les moyens de la télédétection, mais les cartes lithologiques à échelle convenable ne sont pas toujours disponibles, les cartes géomorphologiques encore moins, les cartes pédologiques ne sont pas des cartes d'aptitude des sols au ruissellement ou à l'infiltration. Il faut toujours une reconnaissance au sol qui, non seulement porte sur les caractéristiques des bassins, mais aussi sur l'aspect du lit des cours d'eau de différents ordres géomorphologiques qui permet de recueillir des indices conduisant à des recoupements pour les caractéristiques hydrologiques qui seront fournies par la transposition. Dans ce qui suit on présente quelques exemples de transpositions effectuées par l'ORSTOM. On a cherché dans chaque exemple à mettre en évidence la méthodologie, qui n'est pas toujours évidente, à la lecture des différentes publications qui les concernent et à montrer certains côtés défectueux de ces transpositions en vue d'éviter qu'à l'avenir on ne reprenne sans retouche ces méthodologies. Dans bien des cas les méthodologies utilisées seront dépassées dans quelques années, mais certains éléments, certaines approches pourront encore rendre service.

7. EXEMPLE DE TRANSPPOSITION DE LA CRUE DÉCÉNNALE

La connaissance de la crue décennale était essentielle pour la construction de petits barrages réservoirs et de petits ponts en Afrique occidentale et dans une partie de l'Afrique Centrale. Pour cette raison trois bassins représentatifs avaient été aménagés à partir de 1952 et des études systématiques sur des groupes de bassins ont été entreprises dès 1955. Les principes des régions hydrologiques homogènes n'étaient pas encore clairement définis à cette époque, mais chaque groupe de bassins représentatifs était choisi dans la région la plus importante par son étendue et la plus dangereuse (par exemple les zones imperméables du Nord Cameroun ou les grès de Bandiagara). Les mesures sur les bassins étaient effectuées en vue d'une bonne évaluation des crues, mais les autres facteurs hydrologiques n'étaient pas négligés. Par la suite, pour tous les bassins représentatifs équipés pour d'autres objectifs, l'organisation des mesures était telle qu'il ne serait pas trop difficile d'estimer la crue décennale dans tous les cas.

Vers 1961 près de 60 groupes de bassins (de 2 à 6 bassins par groupe) avaient été étudiés. L'écoulement de surface étant bien net, dans presque tous les cas le principe de l'hydrogramme unitaire avait été adopté pour l'analyse. L'évaluation de la crue décennale était faite en deux temps :

1) estimation du coefficient de ruissellement ou d'écoulement,

2) évaluation de deux paramètres de l'hydrogramme unitaire : temps de montée ou temps de base et le rapport du débit de pointe au débit moyen pris sur la durée du temps de base. A cette époque, pour chaque groupe de bassins, on mettait au point un rapport donnant, à titre d'exemple, l'estimation du débit maximal de la crue décennale et de son volume. Quelquefois, on donnait quelques directives pour la transposition.

En 1961 C. AUVRAY a proposé la synthèse des résultats alors disponibles avec des règles pratiques précises pour la transposition et une première note a été présentée à une réunion scientifique à Monrovia. Avec quelques légères améliorations, J. RODIER avec l'appui du Comité interafricain d'Etudes hydrologiques a repris cette synthèse et l'a publiée en 1965.

L'évaluation de la crue décennale sur chaque bassin était simplifiée grâce au travail gigantesque de dépouillement des précipitations journalières entrepris et mené à bien par Y. BRUNET-MORET.

On évaluait par une étude statistique sur de longues séries temporelles d'observations de pluies journalières la pluie décennale sur 24 heures. Pour cette averse on prenait en compte pour les caractéristiques de l'averse autres que sa hauteur : (diagrammes d'intensité et conditions d'humidité préalables du sol) les valeurs les plus fréquentes que l'on trouvait pour les fortes averses, ceci en vue d'obtenir pour la crue correspondant à cette averse un débit maximum qui soit assez voisin de celui de la crue décennale. Le procédé correct aurait consisté à utiliser un modèle analogue à celui qui sera défini plus loin en adoptant comme entrée une longue série temporelle de précipitations journalières et de rechercher la crue décennale par une analyse des débits de la longue série temporelle de crues qui en aurait résulté, mais nous n'utilisions pas d'ordinateur à cette époque, ce qui rendait cette opération impossible. Le modèle très simple évoqué plus haut : application d'un coefficient de ruissellement à l'averse décennale pour obtenir le volume de crue, puis répartition du volume d'après la forme de l'hydrogramme unitaire (temps de base + coefficient K rapport du débit maximum à la moyenne prise sur le temps de base) était alors appliqué à cette pluie décennale. Auparavant on avait déterminé l'averse décennale moyenne sur la surface du bassin versant grâce à un coefficient d'abatement variable avec la surface. Les valeurs de ce coefficient avaient été déterminées de façon empirique, l'étude systématique de G. VUILLAUME sur ce point n'a été faite que plus tard, les différences sont d'ailleurs assez faibles. Il s'agissait donc d'un modèle global qui stricto sensu ne pouvait guère s'appliquer qu'à des bassins couvrant moins de 40 ou 50 km².

La transposition portait sur trois éléments du modèle : le coefficient de ruissellement pour l'averse décennale (hauteur variant de 85 à 120 mm) dans la zone étudiée, le temps de base et le coefficient K (on pourrait ajouter le coefficient d'abatement). En ce qui concerne la prise en compte des facteurs de l'écoulement, il n'y avait pas de difficulté pour les données climatologiques : pendant la saison des pluies les variations de l'évapotranspiration sont négligeables d'une zone climatique à une autre dans la région étudiée, la forme du diagramme d'intensité est la même, sauf dans la zone littorale, la hauteur de précipitation annuelle, qui joue indirectement un rôle sur la saturation du sol, reste la même sur de longues bandes peu inclinées sur les parallèles et on avait fait le choix de trois zones de couvertures végétales Sahel, tropical de transition et forêt correspondant à trois bandes de pluviométries différentes. Enfin le fait de partir d'une averse décennale permet même de tenir compte du renforcement local de cette dernière dû à des caractéristiques particulières d'exposition. La prise en compte des facteurs physiographiques était beaucoup plus difficile. Tout d'abord on admettait a priori que le bassin était homogène, simplification parfois hardie. Puis on avait choisi trois paramètres : la superficie du bassin S, la pente R et un indice global de perméabilité du bassin P. On a vu plus haut que le couvert végétal : steppe et savane boisée et forêt, avait été lié aux caractéristiques générales du climat. Enfin, on avait négligé en première approximation l'utilisation du sol, ce qui était justifié pour des précipitations annuelles inférieures à 1 000-1 200 mm où d'ailleurs les pluies sont les plus violentes et les zones cultivées peu étendues.

Les savanes cultivées ou non, dans la zone forestière, étaient incluses dans la seconde zone : régime tropical de transition. Des bassins en région tropicale humide entièrement cultivée et présentant une pente notable avec fort ruissellement et forte érodibilité étaient à peu près exclus de cette étude.

Pour la pente on avait considéré six catégories prenant en compte à la fois la pente longitudinale et la pente transversale. Chaque indice R correspondait à des données quantitatives. Cette prise en compte de la pente aurait dû être complétée par la nature du réseau hydrographique et la forme plus ou moins longue du bassin, cela n'a pas été fait.

Pour la perméabilité globale du bassin nous n'avions trouvé aucun indice s'appuyant sur des données quantitatives. Les bassins étaient simplement classés de façon qualitative en six catégories : P1 complètement imperméable, P6 très perméable, on était arrivé à classer les bassins représentatifs en utilisant les courbes limites de ruissellement avec en abscisse un indice de précipitations antérieures, en ordonnées la hauteur limite de précipitation donnant lieu à un ruissellement pour un indice donné de précipitation antérieure. Les ordonnées de ces courbes étaient en relation étroite avec la perméabilité globale. Après quelques jours sans pluie on trouvait une précipitation limite de 30 mm pour P5 et 3 mm pour P1. Mais on ne pouvait pas appliquer cette méthode à des bassins non étudiés, il fallait se contenter d'une rapide inspection des sols et de comparaisons de caractère qualitatif. De sérieuses difficultés peuvent résulter de ce manque de rigueur comme cela sera expliqué plus loin. Les relations entre le coefficient de ruissellement et la superficie du bassin ont été déterminées graphiquement pour la plupart des catégories P et

R des deux groupes : Sahel et régions tropicales. On s'est interdit de donner une expression mathématique de ces courbes qui n'étaient que de simples ébauches et qui ne méritaient pas de savantes interprétations que certains ont été parfois tentés de faire. Mais il n'a pas été possible de tracer les mêmes courbes à partir des données des bassins représentatifs de forêt, le nombre de ces bassins étant insuffisant et le problème de perméabilité des sols beaucoup plus délicat que dans les deux autres zones. Tous ces éléments étaient utilisés pour la transposition de K.

Pour tracer les mêmes courbes pour le temps de montée et le temps de base on a considéré que l'influence de la perméabilité était négligeable, le sol étant saturé lors de la crue décennale. On a tracé ces courbes de façon empirique en fonction de la superficie pour les divers indices de pente. La dispersion était importante en partie parce qu'il n'avait pas été tenu compte de la longueur des bassins. En région tropicale de transition on avait dû tracer deux séries de courbes, les unes pour le début, les autres pour la fin de la saison des pluies (influence des variations dans le temps du couvert végétal) ; K était déterminé pour chaque zone climatique en fonction de la superficie du bassin.

Les applications de ces directives de transposition depuis 1965 et la comparaison avec les données des bassins représentatifs qui n'avaient pas été pris en compte pour cette étude ont montré que les écarts par rapport aux valeurs observées étaient inférieures à 50%, ce qui est admissible pour la plupart des cas.

Les trois reproches les plus importants que l'on peut faire à cette transposition sont les suivants :

- 1) La détermination de la catégorie P est subjective principalement pour les catégories P3 et P4.
- 2) L'hypothèse de base d'un bassin homogène est dangereuse.
- 3) Cette transposition ne peut être faite avec succès que par un hydrologue averti ayant un bon sens du terrain.

Ajoutons que bien entendu les abaques ne sont applicables que pour les régions naturelles pour lesquelles ils ont été faits.

8. TRANSPOSITION DE LA COURBE DE DISTRIBUTION DES DÉBITS MOYENS ANNUELS

En 1975 pendant la sécheresse au Sahel il a semblé utile de procéder à une étude systématique de l'écoulement pour l'ensemble des zones désertiques, sub-désertiques et sahéliennes jusqu'à la frontière du Soudan en vue de l'estimation des écoulements en années sèches de périodes de retour 10 ans et 100 ans. La caractéristique à transposer était donc la courbe de distribution des écoulements annuels, plus particulièrement entre la valeur médiane et les valeurs correspondant aux années très sèches. On a tout d'abord procédé à une analyse fréquentielle des hauteurs de précipitations moyennes annuelles. Après avoir éliminé les stations dont le régime s'écartait un peu des caractéristiques habituelles pour des raisons physiques : stations côtières de l'Atlantique, certaines stations du delta intérieur du Niger, on a — par une méthode voisine de celle des stations-années — établi les courbes types de distribution pour les diverses valeurs médianes de précipitations variant de 250 à 750 mm, de 50 en 50 mm ; ces courbes sont valables sur toute la bande du Sahel. Si on connaissait la valeur moyenne du coefficient d'écoulement K_e pour un régime donné correspondant à 500 mm par exemple et la valeur de K_e pour chaque fréquence on pourrait déterminer directement les courbes de distribution des écoulements.

Pour ces régions climatiques la lame d'eau écoulée en millimètres varie très largement avec la superficie du bassin jusqu'à s'annuler dans certains cas ; c'est pourquoi l'étude a été entreprise séparément pour six classes de superficie : moins de 2 km², 2 à 10 km², 10 à 40 km², 40 à 500 km², 1 000 à 10 000 km², plus de 10 000 km². En fait pour les deux dernières classes il s'agit de transfert de données de réseaux. Mais pour les 4 premières catégories, et surtout les 3 premières, on a procédé de façon plus ou moins explicite à la transposition de données de 50 bassins représentatifs. Pour certains d'entre eux présentant plutôt des conditions extrêmes : bassins perméables ou imperméables correspondant à une première série de bassins types, la distribution fréquentielle des écoulements annuels a été déterminé avec le modèle simplifié de GIRARD 1975 pour le Sahel tropical, avec comme entrées trois longues séries temporelles de précipitations journalières correspondant au même régime pluviométrique et à la même valeur médiane de la hauteur de précipitation annuelle que celles observées sur ces bassins. Puis par une combinaison des données établies directement avec un peu moins de sécurité sur les autres bassins représentatifs telles que : écoulement annuel médian en millimètres, ou écoulement annuel sec de période de retour 10 ans ou 20 ans, ou écoulement annuel humide de période de retour 10 ou 20 ans avec l'interpolation entre les deux courbes de distribution définies plus haut, on a pu définir la courbe de distribution fréquentielle des écoulements annuels pour ces autres bassins représentatifs.

On avait auparavant déterminé pour chacun des premiers bassins types les variations de la courbe de distribution des écoulements avec le climat et plus précisément avec la valeur médiane de précipitation annuelle P med. Ce seul paramètre suffit. On avait procédé ainsi : comme dans le Sahel la distribution temporelle moyenne des précipitations au cours de l'année varie peu avec la hauteur de précipitation à l'intérieur de l'intervalle 250-750 mm/an, on a pu utiliser les courbes de distribution fréquentielle des écoulements établis pour la première série de bassins types et pour une valeur de P med bien déterminée. Considérons un de ces bassins types avec une

valeur de $P_{med} = 500$ mm, si pour ce régime pluviométrique la valeur de période de retour décennale sèche était de 300 mm par exemple avec une valeur d'écoulement E_{10} bien déterminée, l'écoulement annuel pour exactement le même bassin type qui serait situé dans une autre zone pluviométrique du Sahel, admettant une valeur de $P_{med} = 300$ mm, est très voisin de la valeur E_{10} trouvée plus haut. On peut ainsi établir point par point la courbe correspondant à $P_{med} = 300$ mm. Ceci suppose outre la même répartition temporelle des précipitations, à peu près la même densité de couvert végétal. Cette transposition admissible entre 450-500 mm et 250 mm ou 750 mm ne le serait pas si on transposait les données d'un bassin avec $P_{med} = 250$ à un autre pour lequel P_{med} serait égal à 750 mm (ce n'était pas le cas) les écarts de régimes pluviométriques étant trop importants.

On a ainsi défini pour chaque bassin type de la première série le faisceau de courbes de distribution correspondant aux diverses valeurs de P_{med} . Ce sont ces faisceaux de courbes qu'on a utilisés pour les interpolations mentionnées plus haut d'où ont été déduites les courbes des autres bassins types, puis les faisceaux de courbes pour chacun de ces bassins avec les différentes valeurs de P_{med} . On a également utilisé les variations des valeurs des coefficients d'écoulement K_e et on a vérifié si le tout présentait un ensemble cohérent.

Revenons sur cette notion de bassin type qui a remplacé celle de bassin homogène, c'est de ce concept que part toute l'opération de transposition correspondant aux caractéristiques physiques des bassins (essentiellement le sol et la pente, la végétation à l'état naturel restant à peu près la même). Ainsi qu'il a été dit plus haut, un bassin versant est rarement homogène, il est constitué au moins de sols caractéristiques des plateaux, des pentes et des fonds de vallée, donc d'au moins trois unités constituantes en toposéquence. Pour des sols à substratum cristallin on peut trouver 7 ou 8 constituants. Un bassin type correspondant à une zone géologique bien déterminée est constitué par une association bien définie de diverses unités dont les proportions sont déterminées et avec des caractéristiques de pentes et de végétation bien définies. Comme dans la partie du Sahel qui était étudiée il n'y avait guère que de la végétation naturelle et pas de montagne, on avait négligé les variations de couvert végétal et traité très sommairement le problème du relief.

C'est ainsi que les régions du Sahel à sous-sol cristallin étaient représentées par 4 bassins types :

- a) le type Abougoulem, avec 80% de sols assez perméables et 20% de sols perméables ou très perméables ;
- b) le même type, mais avec une pente moyenne plus faible ;
- c) le type Barlo, avec 35% de sols perméables ou très perméables et au moins 25% de sols imperméables ;
- d) le type Cagara pour lequel le substratum est recouvert de vertisols imperméables pour 90% de la surface.

Depuis 1980 il est possible de définir un 5^e bassin type semblable à celui du Barlo, avec 50 à 70% de la surface imperméable (granit sain avec une mince couverture de sable).

Nous n'insisterons pas sur les résultats obtenus, indiquons simplement que pour un bassin de 5 km² recevant 500 mm par an (valeur médiane), la lame d'eau écoulée pour cette même année médiane passe de 7 mm à 45 mm, ce qui montre que la définition de 4 bassins types n'est pas un raffinement inutile et qu'une marge d'erreurs notables peut être trouvée pour un bassin type donné sans qu'il en résulte d'inconvénients graves.

Ce qui a été dit ci-dessus correspond aux bassins à substratum cristallin. Au total on a étudié ainsi six catégories de bassins correspondant chacune à un substratum différent. Ces six « régions » géologiques couvrent la majeure partie du Sahel tropical. Certaines régions géologiques ne comprennent qu'un bassin type.

Pour des superficies de 5 et 25 km² on a représenté l'ensemble des courbes de distribution des divers bassins types.

À l'intérieur de chaque catégorie de superficie on aurait dû fournir les éléments pour effectuer les corrections correspondant aux variations de superficie. Ceci a été fait pour la mise au point des diagrammes de base. On a admis, ce qui était à peu près admissible, que l'interpolation entre les diagrammes standard 5 km² et 25 km² et une légère extrapolation dans les deux sens permettraient de répondre à cette question. Mais au-delà de 40 km² ce n'est souvent pas possible de procéder ainsi.

Compte tenu de ce qui précède la transposition peut être effectuée ainsi :

- 1) Déterminer la superficie totale ou active du bassin et classer le bassin dans la catégorie de superficie qui lui convient.
- 2) Déterminer la valeur médiane de la hauteur de précipitation P_{med} .
- 3) Classer le bassin dans une des six régions géologiques étudiées ; s'il ne peut être classé dans aucune c'est l'aventure, il ne reste plus qu'à chercher à se faire une idée de la perméabilité du bassin par l'examen du réseau hydrographique pris comme indicateur de la violence du ruissellement.
- 4) Vérifier si la pente moyenne est assez faible ou modérée. Une partie du bassin à forte pente mais très perméable est sans grand effet sur le ruissellement.
- 5) Vérifier que la couverture végétale correspond à peu près à la moyenne de la zone climatique.
- 6) Situer le bassin qu'on étudie par rapport à un ou deux bassins types et par interpolation ou légère extrapolation déterminer la courbe de distribution la plus proche sur le diagramme de l'ensemble des courbes pour 25 km² ou 5 km². Cette courbe de distribution correspond à une superficie de 5 km² ou 25 km² et une valeur de P_{med} voisine de celle du bassin-type.

- 7) Procéder aux interpolations nécessaires pour se ramener à la valeur de P med du bassin étudié.
 8) Procéder aux corrections de superficie pour se ramener à la valeur de S du bassin étudié.

La différence entre les résultats obtenus et la valeur réelle de l'écoulement est peut-être de 100% en année sèche décennale pour un bassin très perméable ce qui est sans importance dans ce cas, et de 25 à 40% pour un bassin imperméable. Naturellement l'erreur serait nettement plus faible pour la valeur médiane de l'écoulement.

Dans ce cas également la transposition ne peut être faite que par un hydrologue averti. Les cartes existantes sont insuffisantes pour permettre la détermination des caractéristiques physiographiques et les comparaisons avec les bassins types. Une étude au sol avec complément par photographie aérienne est indispensable. La télédétection pourra rendre de très grands services pour ces opérations.

9. TRANSPOSITION DE L'ÉCOULEMENT MOYEN ANNUEL

En 1975 P. DUBREUIL et G. VUILLAUME ont entrepris de transposer seulement l'écoulement annuel en millimètres, mais par une méthodologie plus rigoureuse et en éliminant tous les paramètres de caractère subjectif telle que la perméabilité globale. Pour des bassins couvrant 10 à 100 km² ils ont utilisé l'analyse des régressions multiples pour les zones intertropicales et semi-arides tropicales à partir des données de 150 bassins représentatifs étudiés surtout en Afrique. L'analyse classique par les régressions multiples n'a pas donné de bons résultats. Mais l'utilisation de procédés graphiques et l'étude séparée des quatre parties principales de cette zone (steppe semi-aride-Sahel), régions tropicales, régions tropicales humides, régions équatoriales (forêt) ont permis d'aboutir.

Le paramètre climatique le plus significatif était Pr

$$Pr = \sum_1^{12} (P_m - \frac{1}{36} ETB)$$

P_m : précipitation moyenne mensuelle en mm.

ETB : évaporation annuelle mesurée dans le bac Colorado enterré.

Dans l'exemple précédent on avait utilisé le paramètre P med : valeur médiane de la hauteur de précipitation annuelle, ceci était admissible pour le Sahel mais pas pour les régions tropicales humides et équatoriales pour lesquelles P med ne suffit pas à caractériser le climat.

Les bassins n'étaient pas considérés comme homogènes. Le gros avantage sur la méthodologie précédente était qu'on tenait compte du pourcentage de la superficie cultivée dans le bassin. Pour la première région climatique étudiée, steppe semi-aride, l'équation était la suivante :

$$EC = 0,15 Pr - 1,3 C - 0,37 G + A$$

Ec : écoulement annuel en mm

C : pourcentage de terre cultivée

G : pourcentage de sable, grès ou quartzite

A : termes présentant différentes valeurs : + 135, + 90, + 55, + 20 mm

A décroît avec la superficie du bassin et croît avec le potentiel de ruissellement représenté par les caractéristiques du lit du cours d'eau (prise en compte de la dégradation hydrographique) et le caractère plus ou moins clairsemé de la végétation.

La pente restait sans influence pour la raison précisée plus haut : il n'y a pas de montagne dans la région sahélienne étudiée. La détermination de A est le point faible de cette méthode. Pour une hauteur de précipitation annuelle de 500 mm

A peut être plus de 4 fois supérieur à la somme des trois autres termes et sa détermination est assez qualitative.

Pour la seconde région climatique, l'équation est :

$$Ec = 0,47 Pr - 33 \log S + 0,54 Ds + A$$

$$Ds = \text{Différence de niveau spécifique} = \text{indice global de pente} / \sqrt{s}$$

S : superficie du bassin

A : terme présentant les valeurs -35 -55 -85 -105 -185 déterminées à partir des caractéristiques du lit des rivières et de la nature du sol.

On peut faire la même remarque que pour l'équation précédente, mais la valeur de A est moins forte par rapport aux autres termes que dans le cas précédent.

Pour les régions tropicales humides :

$$E_c = 0,47 Pr + 1,5 C + (a DS + b) + A$$

$a = 1,78$ $b = -50$ pour une végétation clairsemée avec des feux de brousse
 $a = 1,20$ $b = -175$ pour une couverture végétale dense ou des sols sableux.

A présente trois valeurs +175, +50, -75 mm décroissantes avec la superficie du bassin.

Pour la dernière région (zones forestières) l'équation est :

$$E_c = 1,05 Pr + 0,92 D - 960$$

Pour les deux derniers cas les résultats sont très satisfaisants et il n'y a pas d'éléments subjectifs dans la détermination des paramètres.

10. TRANSDITION DES CARACTÉRISTIQUES DE LA CRUE DÉCENNALE EN ZONE FORESTIÈRE

En 1976 le Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques a demandé à l'ORSTOM d'essayer de résoudre le problème de la crue décennale dans ces régions qui était resté sans solution en 1965. Des recherches systématiques ont été entreprises à la fois sur la physique du sol et l'écoulement. Avant l'aboutissement de ces recherches on a préparé une note préliminaire sur la base des résultats de 27 bassins représentatifs en forêt tropicale, dont 24 en Afrique.

En vue de faciliter les comparaisons, les études ont été faites pour la crue correspondant à une averse standard de 120 mm en 24 heures. Il était facile de passer de cette crue à la crue décennale. Le long de la côte la hauteur de précipitation journalière décennale est de l'ordre de 200 mm, mais partout ailleurs en forêt tropicale humide la hauteur de précipitation annuelle décennale est comprise entre 100 et 150 mm.

On a utilisé en général les mêmes principes de calcul que dans l'étude de 1965, mais pour l'estimation du coefficient de ruissellement l'approche rappelle un peu celle des bassins types : on a défini six catégories de bassins en relation avec la nature du sol et la pente. En général, le bassin n'est pas considéré comme homogène.

La catégorie I correspond à des sols argileux imperméables en surface ou à 10 à 50 cm sous la surface du sol $KR \neq 60\%$.

Les catégories II et III présentent diverses proportions de sols imperméables.

La catégorie VI correspond à des sols perméables et à une faible pente $KR \neq 5\%$.

Il n'est pas possible d'utiliser convenablement le principe des bassins types, car en forêt il est difficile d'établir la carte d'aptitude au ruissellement des sols et même d'estimer l'aptitude au ruissellement d'un type de sol donné, ainsi que cela sera expliqué plus loin.

En ce qui concerne le temps de base et le temps de montée on a tracé des courbes analogues à celles tracées en 1965 pour les crues décennales dans d'autres régions tropicales. Ces courbes sont des fonctions linéaires de \sqrt{s} pour des bassins assez compacts : $T = a \sqrt{s} + b$, a étant fonction de l'indice de pente global du bassin, ce qui est logique. Par rapport à l'étude de 1965, on a apporté une amélioration en tenant compte de la longueur du bassin par un terme correctif lié à l'indice de compacité de Gravelius.

$$I = \frac{\text{Périmètre}}{2 \sqrt{ns}}$$

Cette correction est nulle pour I compris entre 1,20 et 1,30.

En première approximation il n'y a pas à tenir compte du couvert végétal qui reste à peu près le même.

Le coefficient $K = \frac{Q_{\max}}{M}$ (M moyenne de l'écoulement moins l'écoulement de base, pendant le temps de base) a été déterminé en fonction de la pente et de la superficie du bassin, il reste compris entre 1,9 et 2,4. Ici également on note une nette amélioration par rapport à 1965.

La principale difficulté consiste à classer un bassin donné dans une des six catégories, et ce qui est très important c'est le cas de la catégorie I, la plus dangereuse. Certains sols peuvent présenter sous une épaisseur de 20, 30 ou 100 cm de sol relativement perméable un horizon de graviers et d'argiles compacts imperméable ou très peu perméable. Dans ce cas après les premières averses de la saison des pluies le sol se comporte comme s'il était imperméable depuis la surface et le coefficient de ruissellement passe à 60%. En outre l'action de la microfaune sur la perméabilité du sol n'est pas toujours évidente. Pour cette raison cette méthodologie a été considérée comme pré-

liminaire. Mais entre temps un mini-simulateur a été mis au point pour une surface de 1 m², et A. CASENAVE a déterminé la méthodologie d'emploi de cet appareil en forêt tropicale. Il a alors entrepris d'analyser le ruissellement sur de petites surfaces des divers types de sols de chacun des bassins représentatifs observés il y a plus ou moins longtemps par l'ORSTOM en Côte d'Ivoire. Actuellement tous les bassins représentatifs dont l'écoulement était difficile à analyser ont été l'objet de cette expérimentation et on est ainsi parvenu aux deux résultats suivants :

1) Si sur les diverses toposéquences d'un bassin la perméabilité des couches superficielles du sol décroît de l'amont à l'aval, il est possible de combiner pour une averse donnée (120 mm par exemple avec le hétérogramme le plus fréquent) les divers écoulements (écoulement de base exclu) provenant des divers types de sol en prenant en compte la surface couverte par chaque type de sol. L'écoulement global ainsi reconstitué est en bonne corrélation avec l'écoulement global obtenu à partir de l'analyse de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin. Les premières valeurs étant légèrement supérieures aux secondes, ce qui s'explique très bien. Pour ce cas très fréquent une étude systématique au minisimulateur donne une bonne idée du coefficient de ruissellement et permet de classer le bassin.

2) La lame d'eau infiltrée pour une averse de 100 mm au milieu de la saison des pluies est en corrélation étroite pour les divers types de sols avec le pourcentage d'agrégat stable après divers traitements, le pourcentage de sable grossier, le pourcentage de matière organique. Mais la régression est différente pour chacune des trois catégories de sol suivantes :

- sol sans couche de graviers,
- sol avec couche de graviers profonde,
- sol avec couche de graviers à faible profondeur.

Ces deux résultats vont permettre de classer les bassins de forêt en sept catégories au lieu de six catégories choisies dans la note préliminaire (adjonction d'une catégorie intermédiaire) et de résoudre ainsi le problème de la transposition de la crue décennale pour les bassins forestiers en Afrique de l'Ouest.

11. CONCLUSION

Ces exemples de transposition ne doivent pas être considérés comme des *modèles*, on les a présentés pour montrer, suivant le facteur hydrologique considéré, les conditions naturelles, les moyens de calcul et le temps disponible pour l'étude, etc., comment adapter la méthodologie.

D'autres méthodologies plus ou moins différentes sont employées et doivent être utilisées dans d'autres régions. Mais il semble que les méthodes décrites plus haut peuvent être essayées dans d'autres parties du monde avec les mêmes conditions naturelles :

- Principale variable climatologique : les précipitations.
- Possibilité d'utiliser uniquement les hauteurs de précipitation journalières en admettant que les pluies d'une journée sont concentrées en une seule averse.
- Toutes les crues sont concentrées pendant la saison des pluies.
- Les conditions physiographiques sont les mêmes sur de très grandes étendues.
- Superficie des bassins inférieure à 100 km².

On notera que ces conditions favorables existent sur une grande partie des régions tropicales. Mais la situation est très différente pour d'autres pays. En Afrique du Nord, par exemple, les problèmes de transposition concernant les crues sont beaucoup plus difficiles. Un bon modèle pluie-débit pour les crues doit utiliser comme données d'entrée non les précipitations journalières, mais l'intensité des précipitations calculée sur des intervalles de 15 minutes ou à la rigueur 30 minutes. De bonnes séries temporelles de longue durée d'intensité pluviale ne sont pas très fréquentes.

En outre, les crues peuvent se produire à un moment quelconque de l'année. Enfin le sol et le sous-sol présentent une variété beaucoup plus grande qu'en Afrique tropicale. Il n'est pas évident que le principe des bassins types puisse être utilisé avec succès.

Ces exemples de transposition ne correspondent pas à des solutions définitives. Par exemple, la plupart des méthodologies utilisées jusqu'ici supposent l'emploi de cartes, de photographies aériennes, un examen très soigneux des bassins. Il est rare que les cartes des sols usuelles soient utilisables pour l'hydrologie, qu'on dispose de bonnes cartes lithologiques à une échelle convenable, de cartes d'utilisation des sols. L'emploi bien adapté de la télédétection, de nouveaux types de modèles tels que ceux à discrétisation spatiale et bien d'autres progrès permettront d'alléger la méthodologie de la transposition et de l'adapter à des bassins de plus de 100 km². Ces nouvelles méthodologies pourront être très différentes de celles décrites plus haut. Mais beaucoup de travail reste encore à faire et, en tout état de cause, un certain nombre de principes énoncés dans cet article pourront rendre encore service pendant longtemps.

BIBLIOGRAPHIE

- DUBREUIL (P.) – 1965 – Contribution à l'étude d'implantation de bassins représentatifs de régions hydrologiques homogènes. AISH-Publication n° 66. Symposium de Budapest sur les bassins représentatifs et expérimentaux. Gentbrugge.
- RODIER (J.), AUVRAY (C.) – 1965 – Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique occidentale. Comité interafricain d'Etudes hydrauliques. *ORSTOM, Service Hydrologique*, Paris.
- DUBREUIL (P.) – 1970 – Le rôle des paramètres caractéristiques du milieu physique dans la synthèse et l'extrapolation des données hydrologiques recueillies sur bassins représentatifs. AISH-Publication n° 96, Symposium sur les résultats de recherches sur bassins représentatifs et expérimentaux. Wellington.
- TOEBES (C.), OURIVAEV (V.) – 1970 – Representative and experimental basins, an international Guide for research and Practice. *UNESCO*, Paris.
- VUILLAUME (G.) – 1974 – L'abattement des précipitations journalières en Afrique intertropicale. Variabilité et précision de calcul. *Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie*, vol. XI, n° 3, Paris.
- DUBREUIL (P.), VUILLAUME (G.) – 1975 – Influence du milieu physioclimatique sur l'écoulement de petits bassins intertropicaux. AISH-Publication n° 117, Symposium sur les caractéristiques hydrologiques des bassins fluviaux, Tokyo.
- GIRARD (G.) – 1975 – Modèles mathématiques pour l'évaluation des lames écoulées en zone sahélienne et leurs contraintes. *Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie*, vol. XII, n° 3, Paris.
- HADLEY (R.) – 1975 – Classification of Representative and Experimental Basins. First preliminary edition. *UNESCO Distribution limited SC/75/WS/66*, Paris.
- RODIER (J.) – 1975 – Evaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel Tropical africain. *Travaux et documents de l'ORSTOM*, Paris.
- SIMMERS (I.) – 1975 – The use of regional hydrology concepts for spatial translation of stream flow data. AISH-Publication n° 117, Symposium on the Hydrological characteristics of river basins, Tokyo.
- RODIER (J.) – 1976 – Estimation des débits de crues décennales pour les petits bassins forestiers en Afrique Tropicale. Etude préliminaire. *Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie*, vol. XIII, n° 4, Paris.
- CASENAVE (A.) – (Will be published in 1982) – Etude des crues décennales des petits bassins forestiers en Afrique Tropicale. Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques. *ORSTOM*, Paris.