

Jean RODIER

DU SIMULATEUR DE PLUIE AUX BASSINS REPRÉSENTATIFS SAHÉLIENS

Editions de l'ORSTOM

La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les «copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective» et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, «toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite» (alinéa1er de l'article 40).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

ISSN: 0767-2888 ISBN: 2-7099-1074-8

Du simulateur de pluie aux bassins représentatifs sahéliens

RESUME:

A. Casenave et C. Valentin ont publié en 1989 un répertoire permettant de calculer sur parcelles élémentaires, l'infiltrabilité pour presque tous les états de surface de la zone sahélienne, d'où le ruissellement superficiel dominant dans cette zone.

A. Chevallier (1982) puis Albergel (1987) et Thébé (1987) avaient raccordé ces lames ruisselées sur parcelles, au ruissellement de certains bassins représentatifs sahéliens. La liaison était faite par une fonction de calage dont la validité laissait parfois à désirer.

La présente étude passe en revue les degrés de perméabilité globale des bassins tels qu'ils étaient représentés autrefois par des indices qualitatifs de perméabilité croissante P1 à P5 en calculant, à partir des données du simulateur et de celles observées sur les bassins représentatifs, les lames ruisselées respectives Lrc et Lro. Les comparaisons ont été faites autant que possible sur des bassins où le simulateur a été mis en oeuvre dans des conditions rigoureusement identiques pour les deux approches, pour deux averses-types : une pluie moyenne au sol de 50 mm (conditions du répertoire cité plus haut) et une pluie journalière ponctuelle de 70 mm dans le pluviomètre standard (conditions de calcul des coefficients de ruissellement choisies par Rodier et Ribstein, 1988).

Un tableau présente pour chaque indice de perméabilité un intervalle de valeurs Lrc et Lro pour ces deux cas et pour trois surfaces-types : 1 km², 5 km² et 20 km². Ce tableau joint au répertoire des états de surface facilitera le calcul des débits de crues.

On analyse également les causes de variations du coefficient de calage Kcal remplaçant la fonction de calage. Il s'écarte systématiquement de l'intervalle 0,80-1,1 lorsque la surface, la perméabilité et la dégradation hydrographique croissent. Des écarts notables sont dus au non-respect du protocole de mesure au simulateur et à l'insuffisance des cartes d'états des sols.

Mots clés :

Ruissellement, Infiltrabilité, Prédétermination des crues,

Simulateur de pluie, Bassin représentatif, Sahel,

Fonction de production.

The rainfall simulator and representative basins in the Sahel

ABSTRACT:

A. Casenave and C. Valentin published in 1989 procedures for the assessment of the infiltration capacities of most types of sahelian surface feature and thus of the surface runoff prevailing in this area.

Chevallier (1982) and then Albergel (1987) and Thébé (1987) had also linked the surface runoff depths given by the rain-simulator with the surface runoff observed in several representative basins by developing an adjustment equation, whose validity sometimes left something to be desired.

The present study reviews the whole range of the global permeabilities (infiltration capacities) of the basins as characterized in the past by qualitative indices of increasing permeability P1 to P5, computing from the rainfall simulator data and from observations in representative basins the respective surface runoff depths Lrc and Lro.

The comparisons were made as far as possible for basins where the simulator was used, for strictly identical conditions for both approaches and for two standard storms: rainfall of 50 mm depth at soil level (conditions for the procedure mentioned above) and daily rainfall of 70 mm in standard French pattern raingauges (conditions for the computation of the runoff coefficient chosen by Rodier and Ribstein, 1988).

The last table presents for each permeability index a range of values Lrc and Lro for both cases and three standard surfaces 1 km², 5 km² and 20 km². This table together with the procedures for surface features will facilitate flood prediction.

The factors affecting variations of the adjustment coefficient Kcal, replacing the adjustment equation, are analysed. This coefficient departs systematically from the range 0,8-1,1 as the basin area, the hydrographic degeneration and the permeability increase.

Notable deviations are observed when the operational procedure for the simulator are not met and especially when the map of surface features is imprecise.

Key words:

Surface runoff, Infiltration capacity, Flood prediction,

Rainfall simulator, Representative basin, Sahel,

Function of runoff production.

SOMMAIRE

- 1. INTRODUCTION
- 2. OBJET DE CETTE ETUDE
 - **Précipitations** 2.1.
 - 2.2. Lames ruisselées
 - 2.3. Problèmes de la pluie au sol
 - 2.4. Problèmes posés par la fonction de calage
 - 2.4.1. Mise en oeuvre des méthodologies, imprécision des estimations
 - 2.4.2. Conditions identiques pour l'estimation de Lrc et de Lro
 - 2.4.3. Causes fondamentales des écarts entre Lrc et Lro
 - 2.4.3.1. Interdépendance du ruissellement sur les parcelles, de l'amont vers l'aval
 - 2.4.3.2. Phénomènes affectant l'écoulement dans le chevelu hydrographique
 - Influence de la superficie du bassin 2.4.3.3.
 - 2.4.3.4. Influences diverses
- 3. BASES DE LA COMPARAISON DES LAMES RUISSELEES POUR DIFFERENTS INDICES DE PERMEABILITE Pi - MODE OPERATOIRE
- 4. BASSINS IMPERMEABLES (Imp ou P₂)
 - 4.1. Caractéristiques générales des bassins étudiés
 - Relations utilisées et choix de certains paramètres 4.2.
 - 4.2.1. Bassin de Jalafanka (Burkina-Faso)
 - 4.2.2. Bassin de Mouda I (Cameroun)
 - 4.2.3. Bassin de Mouda II (Cameroun)
 - 4.2.4. Bassin de Cagara Ouest (Burkina-Faso)
 - 4.3. Résultats
- 5. BASSINS PARTICULIEREMENT IMPERMEABLES (P.Imp ou P₁ P₂)
- 6. BASSINS RELATIVEMENT IMPERMEABLES (R.Imp ou P3)
 - Bassin de Polaka (Burkina-Faso) 6.1. Bassin de Koghnéré (Burkina-Faso) 6.2.
 - 6.3. Résultats
- BASSINS PERMEABLES (P OU P₄)
- 8. BASSINS TRES PERMEABLES
 - 8.1. Bassin de Mouda III (Cameroun)
 - 8.2. Bassin de Niamey Bao-Trésor (Niger) 8.3. Bassin de Badé II

(Tchad)

Bassin de Booro-Borotou 8.4.

(Côte-d'Ivoire)

- 8.5. Résultats
- 9. CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXE

1. INTRODUCTION

Beaucoup d'hydrologues ont rêvé et rêvent encore de quantifier l'aptitude globale au ruissellement d'un bassin versant, avant toute mesure de débit.

Avec beaucoup de réalisme C. Auvray, en 1962 s'était contenté de donner une classification qualitative des bassins en un certain nombre de catégories allant des plus imperméables aux plus perméables. Ce n'était certainement pas la première fois qu'un hydrologue adoptait une telle démarche, et il y a eu depuis de nombreux exemples de ce genre dans le Monde. Cette classification, telle qu'elle est donnée par J. Rodier et C. Auvray (1965), comprend cinq catégories : P1 rigoureusement plan (mais non horizontal) et rigoureusement imperméable à P5 très perméable avec ruissellement presque nul. Ces premiers critères de perméabilité (Pi) étaient complétés par un second critère (Ri) caractérisant le relief et les pentes. En 1988, Rodier et Ribstein ont remplacé ces symboles par les termes "très imperméables", "imperméables", "relativement imperméables", "perméables" et "très perméables"; ces termes semblaient mieux s'accorder au caractère subjectif de la classification mais cela ne changeait rien, naturellement, aux difficultés du classement d'un bassin dans la bonne catégorie.

En 1965, ce classement était effectué à partir de la position des courbes de précipitations limites provoquant le ruissellement en fonction d'un indice d'humidité du sol, par exemple le temps écoulé depuis la dernière pluie supérieure à 5-10 mm. Cette procédure est sans doute à peu près acceptable pour le Sahel où la précipitation limite donnée par ces courbes après trois jours sans pluie permet de définir dans des cas simples la perméabilité globale (voir fig. 1). Mais, ce procédé restait, bien sûr, inutilisable pour un bassin non observé. Certes, on avait assez vite remarqué que certaines natures de sols (comme les sols d'érosion, de type "hardé", "naga", etc.) étaient très imperméables; cette prise de conscience fut par contre plus longue pour le "reg": nous avons, il y a bien longtemps, classé à tort un bassin de "reg" en P3, au lieu de P2, parce que sa couverture de cailloux nous avait incités à penser que, comme beaucoup plus au Sud, ces cailloux auraient facilité l'infiltration! Quoi qu'il en soit, le classement d'un bassin quelconque en P3 reste (même maintenant) une opération délicate!

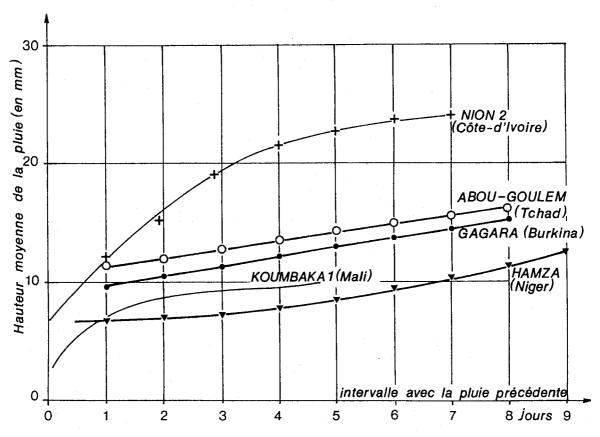


Fig. 1 Précipitation limite d'écoulement (ou pluie d'imbibition) pour différents bassins expérimentaux.

Dès le début, la très forte hétérogénéité des sols naturels rencontrés nous a fait considérer l'infiltromètre MUNTZ comme une technique inadaptée au contexte sahélien et nous ne l'avons que très peu utilisée pour faciliter le classement.

Ce n'est que beaucoup plus tard que fut entrevue la possibilité d'améliorer ce classement, grâce à deux éléments complémentaires :

- la thèse de Valentin (1981) sur les organisations pelliculaires superficielles permettait enfin de mieux expliquer la variabilité de la perméabilité superficielle des sols sahéliens ;
- la mise en oeuvre du mini simulateur de précipitations par Casenave (1982) et son équipe fournissait une méthode fiable pour reconnaître et quantifier in situ cette perméabilité.

De fait, le pas décisif avait été franchi dès 1978, lorsque Casenave et Guiguen, en milieu forestier (dans le cadre d'une convention avec le CIEH dont l'objectif était la prédétermination des crues décennales des petits bassins forestiers) avaient pu calculer, pour une averse de hauteur donnée, la lame ruisselée résultante Lrc. Pour ce faire, si Lri était la lame ruisselée mesurée au mini simulateur sur chaque état (i) de surface de sol, une composition barycentrique des divers Lri obtenus, selon le pourcentage a.i de superficie occupée par chaque état de surface dans le bassin, fournissait Lrc:

$$Lrc = a1.Lr1 + a2.Lr2 + a3.Lr3... = \sum_{ai} L_{ri}$$
 (1)

Cette valeur calculée Lrc pouvait alors être comparée sans difficulté à la lame ruisselée observée Lro sur le bassin avec la même hauteur d'averse naturelle. Le fait important était que les régressions linéaires entre Lrc et Lro ne variaient pas trop d'un bassin à un autre. Un moyen puissant d'extrapolation à des bassins non jaugés avait donc bien été mis en évidence.

Plus tard, des constations similaires furent faites au Sahel, du moins dans leurs prémices, puisqu'il s'avèrera malheureusement que les régressions entre Lrc et Lro n'étaient plus les mêmes au Sahel lorsque l'on passe d'un bassin à un autre. Mais depuis, il a été possible de retrouver les causes des écarts à la courbe moyenne (protocole pas assez strict, cartes des états de surface insuffisantes, etc.). Nous reviendrons plus loin sur les causes de ces écarts.

Cet ensemble de recherches a été complété en 1989 par le répertoire des "Etats de Surface de la Zone Sahélienne" par Casenave et Valentin qui, après avoir donné toutes instructions utiles pour l'identification de ces états de surface, ont présenté une série de fiches donnant les coefficients d'infiltration (compléments à 1 des coefficients de ruissellement utiles Kru) pour des indices d'humidité de Kohler IK égaux à 0 et à 20 et une hauteur de précipitation utile au sol (Pus = 50 mm).

L'indice d'humidité de Kohler utilisé est donné par la relation :

$$IKn = (IK^{n-1} + Pu^{n-1})e^{-at}, a = 0.5$$
 (2)

t est l'intervalle de temps en jours séparant les pluies n et n-1.

Ces fiches donnent l'équation précisant Lri (voir équation (1)).

$$Lri = APu + BIK + CPuIK + D \quad Pu (pluie utile)$$
 (3)

avec les valeurs des paramètres A, B, C, D pour chaque état de surface i.

On notera que cette équation (3) apparaît comme le simple produit de deux fonctions linéaires de la pluie (Pu) et de l'indice d'humidité IK :

$$Lri = (a + b.Pu)(c + dIK)$$
(3')

Il devient alors en principe possible, de déterminer avec une certaine objectivité les valeurs de Lrc pour la plupart des bassins du Sahel, moyennant quelques réserves qui seront précisées par la suite.

Il s'agit bien déjà d'un excellent résultat, même si la méthode pour l'obtenir n'est pas triviale.

Pour chaque averse dont la précipitation moyenne PmA sur le bassin, mesurée à 1 mètre du sol, correspond à une précipitation utile au sol PmS, on trouve donc une lame d'eau ruisselée observée Lro et une lame d'eau ruisselée calculée Lrc (par l'équation (1)) qui sont en assez bonne corrélation pour un contexte géoclimatique donné.

On appelle "fonction de calage", la droite de régression entre Lrc et Lro, d'équation générale :

$$Lro = a.Lrc + b$$
 (4)

b est en principe positif (il lui arrive exceptionnellement d'être négatif) et il est le plus souvent proche de zéro. Comme on ne considère de plus, que de fortes valeurs des précipitations, on fera dans ce qui suit comme si b était nul et on écrira :

$$Lro = a Lrc$$

On appellera alors a "coefficient de calage" et il sera noté Kcal dans la suite du document.

Même si cette approximation peut apparaître insuffisamment rigoureuse, elle reste en accord avec le degré de précision admis dans les opérations effectuées plus loin.

La procédure ainsi décrite est ce que l'on appelle "le modèle simulateur".

2. OBJET DE CETTE ETUDE

L'objet est de définir un mode de transfert non subjectif entre les indices P1, P2, P3, P4 et P5 de Rodier-Auvray (1965) et les lames de ruissellement Lrc, déterminées par le modèle simulateur.

Dans le but de réduire les risques d'utilisation des résultats des études anciennes de bassins versants hydrologiques, il a souvent été demandé quelles seraient les lames ruisselées Lrc, déterminées par le modèle simulateur (schématisé par

l'équation (1)), qui correspondraient à chacun des indices Pi de Rodier-Auvray et ceci pour des valeurs données des précipitations moyennes sur un bassin versant.

Il est actuellement possible de le faire, sans trop de difficultés, sur les bassins représentatifs qui ont été, à la fois observés de façon classique (- > Lro) et étudiés au simulateur (- > Lrc). La généralisation de ces résultats pose néanmoins un certain nombre de difficultés dans le contexte sahélien.

Dans ce paragraphe, nous aborderons d'abord la comparaison entre les diverses caractéristiques intervenant dans le "modèle simulateur" avec celles, naturelles, mesurées dans la méthode traditionnelle d'étude des bassins versants, puis nous présenterons les problèmes liés à la fonction de calage.

2.1. Précipitations

Les pluies étudiées au simulateur sont des événements pluvieux dont la hauteur Pus est mesurée au sol sur une faible surface et dont les plus faibles intensités ne descendent pas en-dessous de 30 mm/h.

Les pluies sur le bassin sont aussi des événements pluvieux, mais il est sage de les rattacher à des précipitations journalières qui seules sont relevées par les réseaux météorologiques nationaux. Elles sont observées sur des bassins avec des pluviomètres dont la bague est à 1,50 m du sol et au Sahel, en espace bien dégagé, ils recueillent une hauteur de précipitations nettement inférieure à la hauteur des pluies au sol. On obtient pour chaque averse, ou chaque pluie journalière, une hauteur de précipitation moyenne "Association" que l'on désignera par PmA, obtenue à partir de un ou plusieurs pluviomètres. (C'est la valeur Pm que l'on retrouve dans presque tous les rapports sur les bassins représentatifs, y compris les plus récents). On peut en déduire une valeur de pluie utile, PuA, correspondant à l'averse principale après élimination des fractions d'intensité les plus faibles, inférieures à un certain seuil. La hauteur maximale de précipitation ponctuelle observée en un pluviomètre, pour une averse donnée sur un bassin, sera désignée par PpA.

Heureusement, les rapports entre ces diverses hauteurs de précipitation sont maintenant assez bien connus pour que l'on puisse passer de l'une à l'autre sans trop de difficulté.

Vuillaume (1974) a donné des diagrammes permettant de passer de PpA à PmA pour diverses fréquences, diverses superficies de bassins et diverses hauteurs de précipitations annuelles. Rodier et Ribstein (1988), se basant principalement sur les travaux de Le Barbé (1982) à Ouagadougou et Bouvier (1985) à Niamey, ont présenté des diagrammes-types pour des hauteurs de pluies journalières de 70 mm et 100 mm permettant de passer de PmA à PuA pour divers seuils d'intensité. Enfin, Chevallier et Lapetite (1986) ont donné une régression permettant de passer de PpA à PpS (pluie ponctuelle au sol).

Une première difficulté apparaît :

Si l'on ne tient pas compte de la distinction pluie "Association" - pluie au sol, la démarche classique est donc :

$$PpA \rightarrow PmA \rightarrow PuA$$

cette dernière devant être comparée à la pluie "simulateur" Pus.

La prise en compte de la pluie au sol devrait se faire au niveau PpA - > PpS, avant d'enchaîner avec -> PmA -> PuA.

En fait, on pratique plus souvent : PuA -> PuS.

Nous reviendrons plus loin sur ce point très important.

2.2. Lames ruisselées

Dans le contexte sahélien, on sait depuis longtemps que le schéma d'écoulement de surface pour la production du ruissellement est une approximation peu contestable. Sur une parcelle élémentaire de bassin versant naturel auquel on applique le "modèle simulateur", Lr est la lame d'eau ruisselée superficielle "en nappe" sur la parcelle. Lrc est alors la somme de ruissellements élémentaires de ce genre, en admettant qu'il n'y a pas d'intéractions entre les ruissellements d'une parcelle et de celle située à l'aval : c'est à dire que le ruissellement provenant de l'amont ne favorise pas le ruissellement de la parcelle aval, ou au contraire, ne s'infiltre pas, partiellement ou totalement, dans cette parcelle aval. Le modèle retenu veut que l'eau ruisselant sur les parcelles parvienne immédiatement au chevelu hydrographique, puis au collecteur principal.

Dans la réalité du bassin naturel l'écoulement résulte, d'une part, des processus concernant l'ensemble des versants, où l'on retrouve plus ou moins bien seulement ce qui a été décrit dans le cas du ruissellement des parcelles élémentaires, et, d'autre part, des processus concernant le chevelu hydrographique qui draîne ces parcelles, processus qui sont de nature différente.

S'il ne se passe rien d'extraordinaire dans le chevelu hydrographique (peu de dégradation = peu de pertes), le schéma reste plausible.

D'ailleurs, à supposer même qu'observations et mesures soient bien faites, le ruissellement correspondant à une averse est intégré dans un hydrogramme qui mélange les diverses formes d'écoulements (si elles existent). Fort heureusement, les vitesses des différentes sortes d'écoulement ont des ordres de grandeur différents, et de plus, au Sahel, le ruissellement superficiel est prépondérant et assez facile à séparer, sur l'hydrogramme, des autres formes de l'écoulement. Certes, pour des bassins dont au moins une partie importante est perméable, il existe parfois une forme de ruissellement superficiel qui apparait dans les parties basses du bassin sur des sols saturés jusqu'en surface par l'eau infiltrée au préalable sur les versants (Chevallier, 1988). Ce ruissellement particulier, rare au Sahel, sera confondu avec le ruissellement superficiel en nappe des sols imperméables (il serait d'ailleurs bien difficile de les séparer!). A cette exception près et dans ce qui suit, les lames ruisselées observées Lro ne concernent dans presque tous les cas, que les seuls ruissellements superficiels, après séparation des autres formes d'écoulement. Les valeurs adoptées dans ce travail seront donc le plus souvent plus faibles que celles données dans les rapports originaux des bassins (c'est en particulier le cas pour tous les bassins de l'étude de la Mare d'Oursi (Chevallier et al., 1985)).

S'il y a dégradation hydrographiques les phénomènes deviennent plus complexes.

Un paragraphe spécial sera consacré à la "fonction de calage", définissant la relation entre lames d'eau calculées Lrc et lames d'eau observées Lro.

2.3. Problèmes de la pluie au sol

Cette question, bien mise en évidence par J. Rodda, a un rôle capital dans la présente étude, parce que ce qui "intéresse" le bassin, comme la parcelle, au sens hydrologique, c'est la pluie au sol, qui intervient aussi dans la détermination de IK. Avec beaucoup de précautions quant à sa validité et son domaine d'application, Chevallier et Lapetite (1986) ont présenté pour diverses stations, la régression :

$$PpS = A.PpA + B \tag{5}$$

Ils présentent aussi une courbe donnant la variation, en fonction de la latitude, du rapport entre la pluie journalière de fréquence de retour annuelle au sol (obtenue à partir de (5)) et la même pluie journalière annuelle mesurée dans un pluviomètre ASSOCIATION à 1,5 mètre.

Deux remarques importantes doivent être faites :

1°) Pour un même bassin, les coefficients A et B de (5) varient dans de larges proportions selon l'exposition du pluviomètre : s'il est relativement bien abrité

$$A = 1$$
 et $B = 0$

Si au contraire, il est très exposé, sur une ligne de crête par exemple, A prend de fortes valeurs et B aussi (s'il est positif).

Dans un bassin bien encaissé, on peut aussi avoir

$$PpS = PpA$$

Ce cas n'aura pas à être pris en considération dans les exemples suivants. On notera que dans le cas de la Mare d'Oursi où la station climatologique de Jalafanka était particulièrement bien exposée, A atteint 1,48 (valeur extrême, atténuée par le fait que dans ce cas, B égale -2).

2°) Tous les auteurs qui se sont penchés sur cette question au Sahel, ont répété les uns après les autres, que le coefficient de corrélation de la régression (5) était "excellent", ce qui n'a qu'une signification relative et plus théorique que pratique, lorsque le champ de variations est suffisamment grand.

Dans le cadre de ce travail, les données de Jalafanka (Mare d'Oursi) ont été revues, ainsi que le rapport PpS/PpA. Quelle que soit la classe de hauteur considérée, on retrouve bien des valeurs médianes voisines de 1,4, mais avec une forte dispersion (par exemple, pour une PpA > 40 mm, le rapport PpS/PpA, sur neuf observations, varie de 1,02 à 1,67). Il serait donc vain de dire que la corrélation est "très bonne". Cette dispersion avait d'ailleurs découragé Pouyaud d'aller plus loin quand il avait, le premier, constaté au Lac de Bam que PpS était nettement différent de PpA. Il était déjà clair que cette dispersion était due à l'extrême variabilité de la vitesse du vent d'une averse à l'autre et que toute interprétation nécessitait sa prise en compte! Or, les bassins versants où la vitesse du vent a été mesurée dans des conditions fiables ne sont pas légions. Encore faut-il ajouter que la vitesse du vent n'est alors connue qu'à la seule station climatologique, qui n'est pas forcément représentative de la situation de tous les pluviomètres installés sur le bassin versant. Cette même variabilité, interannuelle cette fois, avait conduit Claude et al. en 1978 à donner pour ce même site de Jalafanka un rapport PpS/PpA voisin de 1,27 au lieu de 1,4, alors qu'il n'y avait encore que deux ans d'observations.

Deux années d'observations sont certainement insuffisantes par suite de la dispersion pour un tel site : à partir des données du poste d'Azel (Niger), portant sur trois ans d'observations, Chevallier et Lapetite (1986) ont trouvé un rapport PpS/PpA = 2, valable pour les régions Nord du Sahel. On doit considérer ce chiffre 2 comme une valeur record tout à fait provisoire et dans le cadre de cette étude, on s'est limité à l'isohyète annuelle (ASSOCIATION) 400 mm, en s'appuyant essentiellement sur les données de la Mare d'Oursi. La régression a été par ailleurs simplifiée et réduite au seuLrapport PpS/PpA, ce qui est légitime, compte tenu de la dispersion par ailleurs indiquée!

2.4. Problèmes posés par la fonction de calage

Si toutes les hypothèses qui ont été formulées plus haut pour le bon fonctionnement du "modèle simulateur" étaient vérifiées par la réalité des bassins naturels, on devrait avoir Lrc = Lro. Bien sûr, cela a d'autant plus de chance d'être vrai que le bassin ruisselle beaucoup : pour un bassin théorique parfaitement imperméable et d'assez petites dimensions pour ignorer la reprise évaporatoire, on est sûr d'avoir Lrc = Lro! Dans la réalité, cela se produit parfois sur de faibles surfaces et dans ce cas on a : a = 1 et b = 0 dans l'équation (4); mais souvent les écarts entre Lrc et Lro sont notables et parfois même assez élevés (voir 2.4.3.).

Le schéma le plus classique est alors un bassin dont l'imperméabilité est croissante en allant vers son aval.

On ne peut revoir ici le détail de toutes les causes annoncées des écarts entre Lrc et Lro. Albergel (1988) en fournit une liste assez complète; on se limitera dans ce qui suit à reprendre celles qui sont suffisamment fréquentes pour présenter une certaine importance pour notre étude.

2.4.1. Causes liées à l'imprécision des estimations et à la mise en oeuvre des méthodologies

Il est possible de laisser de côté les erreurs de mesure (qui concernent essentiellement Lro), les seules causes parfois sensibles portent sur une extrapolation hasardeuse de la courbe d'étalonnage (ce qui est assez rare sur bassin versant ORSTOM), ou une densité vraiment insuffisante des pluviomètres.

Les imprécisions liées à la méthodologie concernent surtout le choix d'un protocole d'emploi du simulateur mal adapté au contexte sahélien. Ceci est surtout vrai pour les tout premiers essais sahéliens du simulateur et nous y reviendrons par la suite. Il faut aussi citer le cas où l'équation (3) donnant Lri est mal adaptée, notamment parce que le choix de l'indice de Kohler lui-même n'est pas le meilleur pour tous les types de sols ou parce que le choix habituel de a = 0,5 dans l'équation (2) est impropre. On a notamment vérifié que les équations (3) données dans certains rapports conduisent probablement à des valeurs surestimées pour les raisons citées ci-dessus.

Il ne faut pas non plus oublier que la fonction de calage prend en compte une Lro voisine de la fréquence décennale, qui n'a pas été observée réellement dans certains cas, mais qui est extrapolée et qui, pour certains bassins, peut la tirer vers des valeurs extrêmes.

Il n'en demeure pas moins que la principale cause d'imprécision reste une cartographie trop imprécise des bassins versants et de leurs états de surface. Albergel (1987) et Thébé (1987) ont très justement insisté sur ce problème de la nécessité d'une cartographie détaillée des états de surfaces. Il est notamment des

cas où les états de surface les plus imperméables correspondent à une multitude de petite taches très dispersées (de sols érodés par exemple) et seule la télédétection peut laisser espérer leur identification convenable. Il peut aussi y avoir des erreurs importantes sur la superficie véritable du bassin versant (calcul de Lro). Le cas de Jalafanka (Mare d'Oursi) est exemplaire, puisque le ruissellement en nappe peut divaguer d'une averse à l'autre, selon la force et la direction des rafales de vent, sur un petit bassin dont les limites ne sont matérialisées par aucune bordure. La totalité de l'écoulement, produit par la totalité de la superficie théorique du bassin, ne rejoint pas alors la station de jaugeage de l'exutoire (communication verbale (et "mouillée") de Pouyaud). Cela s'est déjà vu ailleurs aussi.

Enfin, dans le cadre de la présente étude, il y a aussi le problème du tracé de la courbe Lro = f (PmA) qui peut prêter à discussion : on ne travaille pas en effet directement sur les valeurs observées averse par averse de Lro, mais sur des lames ruisselées déduites, qui correspondent (d'après cette courbe Lro = f (Pma)) à des valeurs données de PmA.

2.4.2 Nécessité de la prise en compte de conditions identiques pour les estimations de Lrc et de Lro.

On vient de voir (§ 2.1. et § 2.2.) que dans la définition des précipitations et des lames écoulées, on a pris la précaution d'adapter les mêmes niveaux de conceptualisation des phénomènes, afin que les estimations de Lrc et de Lro soient cohérentes et donc comparables. On se rapportera de même à des bassins de pente assez faible (indice global de pente voisin de 7 m/km) comparable à celle des parcelles de simulation. Enfin, les valeurs de Lro des bassins seront corrigées pour correspondre à trois surfaces standard de bassins fictifs, égales à 1 km², 5 km² et 20 km². (Voir 2.4.3.3.).

On s'est également efforcé de se placer dans des conditions climatiques identiques qui sont à peu près celles de la Mare d'Oursi (Burkina-Faso) avec une pluie annuelle comprise entre 400 et 450 mm et un rapport PpS/PpA voisin ou égal à 1.4.

2.4.3. Revue des causes fondamentales des écarts constatés entre Lrc et Lro

Quelles qu'aient été les précautions prises dans la détermination de Lrc et Lro, on ne peut empêcher qu'apparaissent des écarts notables entre L rc et Lro.

2.4.3.1. Interdépendance du ruissellement sur les parcelles, de l'amont vers l'aval

Rien n'oblige le ruissellement, dans la partie aval d'une toposéquence à se plier à l'hypothèse d'être indépendant du ruissellement des parcelles situées plus à l'amont (c'est même l'inverse qui serait étonnant). Chevallier (1988) a par exemple, très nettement montré sur le bassin de Booro-Borotou que l'infiltration, à l'aval, de ruissellements superficiels produits par les parcelles situées plus à l'amont, conduisait à des valeurs trop faibles du coefficient a de la fonction de calage (4), (assez proche du Kcal adopté). Inversement, pour des terrains peu perméables, la valeur effective de l'indice d'humidité est supérieure à ce que donne le calcul du coefficient IK qui ne prend en compte que les précipitations directes sur les parcelles aval (à l'exclusion de tout apport amont). Sur de petits bassins versants, on peut donc trouver des valeurs de Kcal, supérieures à 1, qui ont beaucoup surpris a priori (il peut y avoir d'autres raisons, évoquées en 4.1).

2.4.3.2. Phénomènes affectant l'écoulement dans le chevelu hydrographique

Ces phénomènes échappent bien sûr totalement à l'analyse du ruissellement effectuée par le simulateur, qui ne permet malheureusement pas l'analyse du ruissellement sur des versants entiers, mais seulement sur des parcelles de un mètre carré. S'il y a dégradation hydrographique par exemple, Kcal peut devenir très faible.

2.4.3.3. Influence de la superficie du bassin

Cette influence, déjà signalée par Dubreuil, est dans une certaine mesure liée à ce qui précède. En première approximation, l'équation qui donne Lrc ne tient pas compte de la superficie du bassin, mais seulement des proportions respectives des différents types d'états de surface recensés. Or, le coefficient de ruissellement du bassin Kr = Lro/PmA diminue très nettement en zone sahélienne lorsque la superficie S croît. Bien sûr, cette diminution doit se faire par "seuils" successifs et les bassins versants n'étant pas homogènes, la répartition entre types d'états de surface évolue, voire il apparaît de nouveaux états de surface, inédits plus à l'amont. Cette action vient s'ajouter à l'influence du coefficient d'abattement k = PmA/PpA. Donc, Kcal décroît, en général, lorsque S croît (mais cela n'est peut être pas si généralisable à l'échelle de l'averse, dans la gamme la plus "courante" des petits bassins étudiés).

Ces considérations justifient le souci de vouloir comparer Lro et Lrc pour des superficies fictives bien déterminées, même si on peut avoir des doutes sur la reconstitution de ces Lro et Lrc pour ces mêmes surfaces normalisées.

2.4.3.4. Influences diverses

La plus importante a pour origine le fait que la réalisation des opérations de simulation de pluie se situe en saison sèche, avec une végétation sèche, qui n'a certainement pas la même action que la végétation vivante de saison des pluies.

En fait, c'est moins l'état de la végétation, que l'activité faunique qui lui est liée, qui est importante quant aux effets sur les états de surface et l'humidité superficielle du sol. Plus au Sud, Thébé (1987) a étudié cette influence, qui n'est pas négligeable, mais, au Sahel, elle est moins importante et il n'en sera pas tenu compte.

3. BASES DE LA COMPARAISON DES LAMES RUISSELLEES POUR DIFFERENTS INDICES DE PERMEABILITE PI DE RODIER-AUVRAY, MODE OPERATOIRE.

Une première difficulté apparaît avec le constat que les précipitations caractéristiques utilisées dans les deux approches, qu'il s'agit de comparer, ne sont pas les mêmes. L'idéal, en effet, aurait été de procéder à ces comparaisons en se basant sur la hauteur de pluie PuS = 50 mm choisie par Casenave et Valentin dans leur répertoire des états de surface. Cette dernière ne correspond pas à celle retenue pour les diagrammes de base de Kr (Kr = Lro/PmA), donnés par Rodier (1986, 1988) qui concernent des pluies journalières ponctuelles PpA de 70 mm et 100 mm où figurent les variations de ce coefficient de ruissellement Kr en fonction de la surface du bassin S, de l'indice de pente lg et de la classe de perméabilité Pi.

Dans le premier cas, PuS = 50 mm doit être considéré comme une pluie moyenne qui reste la même, quelle que soit la surface du bassin.

Dans le second, PpA permet de calculer des valeurs moyennes PmA et PuS, qui décroîssent évidemment quand la superficie croît par suite de la décroissance du coefficient d'abattement k.

On a donc procédé aux comparaisons entre les lames ruisselées, en retenant les deux cas PuS = 50 mm et PpA = 70 mm, pour nous rapprocher au maximum des conditions du répertoire de Casenave et Valentin. Cette comparaison a été effectuée pour les trois surfaces standard de 1 km², 5 km² et 20 km² et bien entendu pour la surface propre de chaque bassin représentatif. Encore faut-il pouvoir comparer PuS et PpA.

- Dans les conditions climatologiques de la Mare d'Oursi par exemple, et pour le bassin versant type Jalafanka, imperméable, on a vu que l'on pouvait prendre un rapport PpS/PpA = 1,4. La valeur moyenne de IK est égale à 5 mm et les coefficients d'abattement pour les trois surfaces sont respectivement égaux à 1; 0,90; 0,82.
- Pour ce qui est du rapport PuS/PmS, la comparaison est beaucoup plus délicate. Pour une pluie journalière moyenne Pm de 70 mm, si on élimine sur le diagramme d'intensité Pj = 70 mm, fourni par Rodier et Ribstein (1988)) tout ce qui correspond à des intensités inférieures à 40 mm/h, il reste 52,3 mm pour Pu. Dans ce cas, on aurait donc PuA/PmA = 0,75. Mais en fait, sur les bassins imperméables, même la traîne à faible intensité donne lieu à du ruissellement superficiel et on sera donc conduit à adopter un coefficient PuA/PmA (# de PuS/PmS) égal à 0,90 au lieu de 0,75.
- Dans ce cas, les calculs conduits à partir de PpA = 70 mm conduisent aux résultats suivants :

- Pour des bassins plus perméables, il faudrait prendre un rapport PuA/PmA plus proche de 0,75, de sorte que les valeurs de PuS seront plus faibles.

Ce qui précède a donc montré que même pour une superficie de 20 km² et une pluie ponctuelle PpA de 70 mm, le PuS obtenu s'écarte sensiblement de la valeur standard 50 mm du répertoire déjà cité. Cela justifierait a posteriori, le choix d'une seconde valeur de précipitation, sans que l'écart soit tel que les conclusions de Casenave et Valentin (1988) ne deviennent pour autant inapplicables.

Pour ce qui est maintenant de la détermination des valeurs de Lrc, Lro et Kcal, nous nous sommes appuyés au maximum sur les travaux de Chevallier (1982), de Thébé (1987) et surtout d'Albergel (1987), qui sont les seuls qui aient étudié systématiquement au simulateur de pluie les bassins par ailleurs suivis classiquement. Mais, on tiendra compte aussi d'autres travaux, qui donnent des valeurs du ruissellement Lro: le recueil de Dubreuil et al. (1972), le rapport Chevallier et al. (1985) et différents rapports individuels de bassins versants, qui, étant très nombreux, ne sont pas tous cités ici; leurs références figurent entre autres dans le recueil Dubreuil et al. (1972).

Des équations (1), déterminant Lrc, figurent dans les trois ouvrages cités de Chevallier, Thébé et Albergel. Si elles ne sont pas toutes explicites, on peut les reconstituer facilement en étudiant les régressions de Lrc en fonction de PuS, puisque l'influence de IK, dont on a tenu compte, reste faible.

Pour les valeurs de Lro, nous avons dû assez souvent revoir, surtout dans leurs parties hautes, les courbes donnant Lro en fonction de PmA, soit pour remédier aux inconvénients de l'ajustement à une fonction puissance qui surestime Lro pour les fortes valeurs de PmA, soit pour tenir compte de la séparation de la lame ruisselée Lr par rapport à la lame écoulée Le, lorsque cela n'avait pas été fait (bassin de la Mare d'Oursi). Dans certains cas, Lr était si voisin de Le, qu'il a été possible de les confondre.

Pour pouvoir transférer les données de ruissellement Lro aux diverses catégories de surface, on a dû d'abord déterminer les valeurs ponctuelles PpA, si elles n'étaient pas disponibles (cas PuS = 50 mm du recueil Casenave-Valentin) par les opérations inverses de celles faites plus haut. On a alors déterminé pour le bassin étudié le coefficient de ruissellement Kr = Lro/PmA et on a utilisé pour la transposition aux différentes surfaces, des variations de Kr analogues à celles indiquées sur le diagramme du Kr fourni par Rodier-Ribstein (1988) pour un PpA = 70 mm. On peut alors définir PuS en tenant compte du coefficient d'abattement, tout en conservant lK inchangé.

Pour pratiquer enfin ce qui est appelé la "reconstitution Sahel", c'est-à-dire la transposition aux conditions de la Mare d'Oursi, il a été considéré un rapport PpS/PpA égal à 1,40 pour le calcul de la Lrc et adopté une valeur de IK égale à 5 mm, le coefficient de végétation Cv étant égal à 5 % seulement. Pour déterminer Lro, on part du diagramme original du bassin, révisé ou non, correspondant à une valeur "x" du rapport PpS/PpA. Pour trouver la nouvelle valeur de Lro correspondant à la nouvelle valeur de PmA, il suffit de considérer un PmA égal au nouveau PmA multiplié par 1,4/x. Ensuite, pour passer aux surfaces standard de 1 km², 5 km² et 20 km², il faut procéder aux opérations décrites plus haut.

Bien sûr, les résultats obtenus et affectés de l'indication "reconstitué Sahel", sont moins sûrs que ceux qui correspondent à des données non transposées mais ils sont plus cohérents avec les conditions de la Mare d'Oursi, surtout si l'on est parti, par exemple, des données de Mouda (Nord Cameroun), nettement au Sud de la limite méridionale du Sahel, avec une valeur PpS/PpA de 1,04 seulement, fort éloignée des 1,40 de la Mare d'Oursi, en plein centre du Sahel.

En bref, on a donc envisagé de déterminer pour chaque surface standard, les valeurs de Lrc, Lro et Kcal, les plus vraisemblables, compte tenu aussi d'un certain nombre de facteurs qui n'avaient pas toujours été pris en compte dans les calculs.

4. BASSINS IMPERMEABLES (Imp. ou P2)

4.1. Caractéristiques générales des bassins étudiés

Nous traiterons après ces bassins Imp. une nouvelle catégorie "Particulièrement imperméable" P1-P2, nettement moins perméable que la catégorie théorique P1. L'examen du cas P2 facilitant beaucoup celui de ces bassins particulièrement imperméables, nous avons préféré l'étudier d'abord.

Les caractéristiques des bassins représentatifs dont on peut utiliser les données pour la catégorie "Imperméable" sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 1

Bassins	Pays	Superficie S Km²	P annuelle Assoc. mm.	Pente lg. m/km-1	Références
Jalafanka Mouda I Mouda II Cagara Ouest 1985	Burkina Faso Cameroun Cameroun Burkina Faso	18 0,003	(400) 1 000 1 000 460	7 5,3 15 3,5	Chevallier Thébé Thébé Albergel

Les conditions d'étude ne sont pas si faciles qu'il semblerait à première vue. Avec sa faible pente et son homogénéité le bassin de Jalafanka serait parfait.

Malheureusement, c'est le premier étudié, le protocole d'emploi du simulateur n'était pas au point, les formules (3) donnant Lri paraissent bien généreuses, enfin, contrairement à Mouda II, les limites du bassin n'étant pas matérialisées sur le terrain, le ruissellement en nappe a divagué quelque peu, la croûte superficielle a été souvent détruite par le bétail trop nombreux en cette période de sécheresse de sorte qu'en définitive Lrc est à peu près sûrement surestimé et Lro sous estimé.

Mouda I, très bien observé, est un peu trop au Sud avec un régime déjà tropical sec; malheureusement il n'a pas pu bénéficier d'une carte établie par télédétection de sorte que la superficie des sols "hardé", les plus imperméables est sousestimée, ces sols étant souvent représentés par des taches minuscules. Les sols "hardé" de Mouda II ne sont même pas représentés sur la carte des états de surface de Mouda I qui l'englobe. En outre, dans l'équation (4) donnant Lrc, ces sols ont été englobés avec d'autres plus perméables et on leur a affecté une relation (3) donnant des valeurs trop faibles de Lr, d'où une certaine sousestimation de Lrc.

Mouda II a contre lui son extrême petitesse et sa très forte imperméabilité qui en font un bassin P1 P2 et non P2.

Cagara Ouest est aussi un peu trop imperméable tout au moins dans la situation de 1985.

4.2. Relations utilisées et choix de certains paramètres

4.2.1. Bassin de Jalafanka (Burkina-Faso)

Pour Jalafanka : Lrc = 0.967 Pu + 0.129 IK - 9.96

IK = 5 (Séguis) PpS/PpA = 1,4

Lro est pris sur la courbe : Lro = f(PmA) (Chevallier et al., 1985)

Cette courbe avait été contrôlée en 1986 (voir Rodier, 1986) et nous avions conservé le tracé original valable même après élimination de la partie de l'écoulement ne correspondant pas à du ruissellement superficiel. Nous avons procédé à nouveau à une étude systématique de tous les facteurs possibles de l'écoulement y compris la valeur du rapport PpS/PpA dont le rôle n'est pas négligeable, pour tous les points représentatifs des fortes averses et nous n'avons trouvé aucune raison sérieuse de modifier cette courbe avec Lro = 27,5 mm pour PmA = 50 mm.

C'est cette courbe qui servira à déterminer Lro dans tous les cas où S = 0,81 km² et pratiquement pour S = 1.

On trouvera les valeurs de Lrc et Lro pour $S = 0.81 \text{ km}^2$, pour PuS = 50 mm et PpA = 70 mm dans le tableau 2.

<u>Dans l'hypothèse PuS = 50 mm</u>: Lrc reste constant quelle que soit S, formule plus haut Pus = 50 mm

$$\frac{PuA}{PmA} = 0.90$$
 (voir chapitre 3)

Pour 1 km²:

$$PmA = PpA = \frac{PuS}{(1.4 \times 0.90)} \# 40 mm, d'où Lro$$

Pour passer à $S = 5 \text{ km}^2$ dans la même hypothèse PuS = 50 mm, on note :

k (abattement) = 0,90

$$PmA = 0,90 \ PpA \ d'où \ PpA = \frac{40}{0,9} = 44,5 \ mm.$$

Sur le diagramme des valeurs de Kr 70 (fig. 2) donné par Rodier et Ribstein (1988), on devra, pour trouver Kr (Kr = Lro/PmA), suivre une courbe correspondant à PpA = 44,5 mm et non plus PpA = 70 mm; les deux courbes sont analogues mais au Sahel la courbe 44,5 mm doit plonger un peu plus. Son point de départ est S = 0,81 ou S = 1 km². Si nous partons de S = 1 km², pour cette surface, PmA = PpA = 44,5 mm. Lro sur la courbe de Chevallier et al. (1985) est égal à 22,8 mm d'où Kr = 22,8/44,5 = 51,2%.

Sur la courbe PpA = 70 mm pour lg 7 lmp. entre 1 et 5 km², Kr passe de 61 à 52,5 %. Pour la courbe PpA = 44,5 mm, on admet une variation analogue, dans ces conditions, Kr pour la courbe PpA = 44,5 mm, devrait être multiplié par 52,5/61. On admettra 52/61 pour passer de 1 à 5 km².

Dans ces conditions, pour $S = 5 \text{ km}^2 \text{ sur la courbe}$, PpA = 44,5 mm.

$$Kr = 51.2 \times 52/61 = 43.7 \%$$
 $Lro (5 km2) = 40 \times 0.437 = 17.5 mm$.

Pour passer à $S = 20 \text{ km}^2$:

k = 0.818, on procède exactement de la même façon en suivant la courbe PpA = 49 mm (49 = 40/0.818).

Dans l'hypothèse PpA = 70 mm :

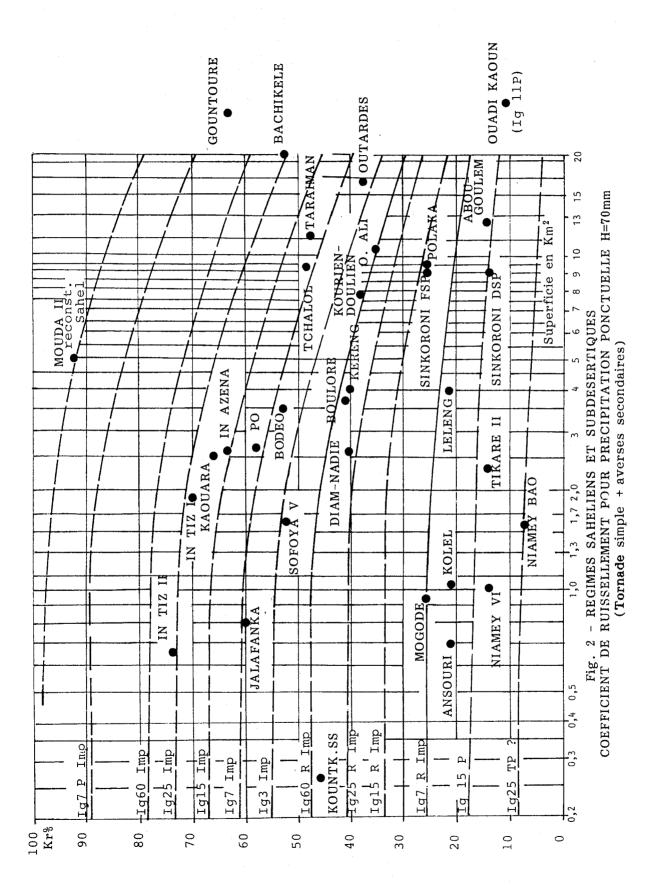
PuS = $70 \times 1.4 \times 0.9 = 88 \text{ mm pour S} = 1 \text{ km}^2$ d'où Lrc d'après la relation donnée plus haut.

Pour 5 km²:

PmA = $70 \times 0.9 = 63 \text{ mm}$ PuS = $63 \times 1.4 \times 0.9 = 79 \text{ mm}$ d'où Lrc d'après la relation donnée plus haut.

En suivant la courbe de Jalafanka sur la figure 2, très proche de la courbe lg 7 lmp., on trouve pour 5 km^2 Kr = 51,25 % d'où Lro = $63 \times 0,5125 = 32,3 \text{ mm}$.

Pour 20 km², on procède exactement de la même façon avec le coefficient d'abattement 0,818 au lieu de 0,90.



4.2.2. Bassin de Mouda I (Cameroun) (Superficie: 18 km²)

PpS/PpA passe de 1,4 à 1,1 si on prend les conditions limites Sud du Sahel ; ce rapport est plus proche de 1 pour le bassin dans ses conditions naturelles ; IK sera égal à 7 mm comme on le verra plus loin.

Lrc est la somme des ruissellements Lr1, Lr2, Lr3, Lr4, Lr5, Lr6 et Lr7. Lr7 = 0 (terrains très perméables). Lr2 représente aussi Lr1, très imperméable, peut-être parce que la surface correspondant à Lr1 seul est trop difficile à bien déterminer mais on sous-estime ainsi Lrc très sensiblement.

La forme générale de Lri est Lri = APu + BIK - CCv - D (C et D positifs). Cv est le coefficient de couverture végétale.

On a admis pour Cv et IK des valeurs ne correspondant pas exactement aux valeurs les plus fréquentes du site de Mouda, mais à celles de la limite Sud du Sahel IK = 7 mm Cv = 10 % (plus faibles que celles de Thébé).

Pour déterminer Lro, nous avons adopté la courbe Lr = f(Pm) de Thébé après une révision qui a conduit à une certaine réduction de Lro pour les valeurs les plus élevées d'où une valeur de Lro = 38,1 mm pour PmA = 80 mm au lieu de Lro = 49,1 mm. Cette courbe servira à déterminer Lro pour tous les cas où $S = 18 \text{ km}^2$.

Pour $S = 18 \text{ km}^2$, climat limite Sud du Sahel, on trouvera Lrc et Lro dans le tableau 2. On notera que pour 1 km^2 :

$$PuS = 50 \text{ mm} \text{ et } PmA = 50/1,10 \times 0,90 = 50,5$$

Si PpA = 70 mm PuS = 70 x 1,10 x 0,90 = 69,2 mm.

Pour les transpositions a de bassins de 1, 5 et 20 km², les coefficients d'abattement sont respectivement 1, 0,92, 0,845.

On procède comme pour le bassin précédent mais en partant d'un bassin de 18 km² avec PmA/PpA = 0,86 au lieu de 1 km² comme précédemment.

Dans l'hypothèse PuS = 50 mm, on suit successivement les courbes PpA = 50,5 mm (S = 1 km²), PpA = 55 mm (S = 5 km²), PpA = 59,8 mm (S = 20 km²) (59,8 = 50,5/0,845) sur le diagramme figure 2 avec successivement comme points de départ pour 18 km² (Kr = 0,86)

- Dans l'hypothèse 70 mm c'est plus simple, on suit sur la figure 2 une courbe P 70 Mouda l à 5 % au-dessus de la courbe lg 7 lmp.. Tous les résultats concernant Lro et Lrc sont portés sur le tableau 2.

Notons que si on suppose 10 % de sols d'érosions (hardé), Lr1, avec la relation établie par Thébé : Lr1 = 0,91 Pu - 4,21 (au lieu de 10 % de sols Lr2) avec la formule :

$$Lr2 = 0.758 Pu + 0.146 IK - 0.207 Cv - 4.57$$

on trouve pour $S = 1 \text{ km}^2$ et pour une averse PpA = 70 mm, Lrc = 32,16 au lieu de 30,96 d'où Kcal = 1,39 au lieu de 1,411.

La situation est un peu améliorée. Il est possible que le véritable Lrc soit un peu supérieur à 32,16 mm (33 ou 34 mm). A la limite, cela ne changera pas radica-lement la situation mais il est certain que Lrc est sous-estimé pour Mouda!.

La reconstitution pour les conditions du <u>Centre</u> du Sahel est un peu hasardeuse pour Mouda I, mais à notre avis, elle donne une idée de ce que seraient ses performances sous ces conditions climatiques et cela facilitera certainement les comparaisons. La différence essentielle est que PpS/PpA passe à 1,4 au lieu de 1,04. Par ailleurs IK = 5 mm et Cv = 5 %, les coefficients d'abattement sont égaux respectivement à 1, 0,90, 0,825, 0,818 pour S = 1, 5, 18 et 20 km².

Pour le bassin de Mouda I avec S = 18 km², on utilise exactement, pour déterminer Lrc, la même équation que précédemment avec de nouvelles valeurs de Pu, IK, Cv et k. Pour déterminer Lro, on reprend le même graphique établi par Thébé révisé par Rodier, mais ce graphique a été établi pour PpS/PpA = 1,04. Ce qui compte pour le ruissellement, c'est la pluie qui tombe au sol, il faudra donc, pour trouver Lro correspondant à une valeur donnée de PmA sous le nouveau climat, multiplier cette valeur de PmA par 1,4/1,04 pour la reporter en abscisse du graphique ; mais toutes les valeurs de Kr utilisées par la suite devront partir de PmA sans cette correction.

Ces principes étant posés, on calculera Lro et Lrc dans les deux hypothèses

PuS = 50 mm et PpA = 70 mm en suivant le même processus que pour Mouda I

avec S = 1, 5 et 20 km² comme nous l'avons fait plus haut pour la limite Sud du Sahel.

Nous donnons un exemple dans l'hypothèse PuS = 50 mm, pour $S = 5 \text{ km}^2$.

IK = 5 mm Cv = 5 % <u>Lrc</u> (relation Mouda I plus haut) = 20,24 mm.

Pour passer à Lro :
$$PmA = \frac{50}{1,40 \times 0.9} = 39,7 \, mm$$
 ou $PpA = \frac{PmA}{0,90} = 44,2 \, mm$

On suivra la courbe PpA = 44.2 mm sur la figure 2.

Déterminons le point de départ : pour $S = 18 \text{ km}^2$, $PmA = 44,2 \times 0,825 = 36,5 \text{ mm}$. Sur la courbe Thébé modifiée donnant Lro, on doit prendre pour Pm une valeur donnant la même hauteur de précipitation <u>au sol</u> que dans le cas pour lequel cette courbe a été établie, c'est-à-dire qu'il faut multiplier PmA par 1,40/1,04 soit 49,1 mm la nouvelle valeur de Pm, qui correspond alors à Pm Lro Pm Pm (Pm Pm).

Par rapport à 36,5 mm, Kr = 19,2/36,5 = 52,6 % (S = 18 km²). Tel est le point de départ.

Sur la courbe PpA 70 mm, Kr passe de 64 à 75 % lorsque S passe de 18 à 5 km² soit une majoration de 1,17.

Pour la courbe PpA 44,2 mm, on doit admettre au moins la même majoration. Pour cette courbe pour 5 km^2 , $Kr = 52,6 \times 1,17 = 61,6 \%$.

$$Lro = 39,7 \times 0,616 = 24,5 \text{ mm}$$

Les valeurs trouvées pour Mouda I Centre du Sahel ou Mouda I Sahel ont été reportées sur le tableau 2.

4.2.3. Bassin de Mouda II (Cameroun) (Superficie: 0,003 km²)

PpS/PpA est le même que pour Mouda I. On reprendra 1,10 pour la limite Sud du Sahel :

$$Lrc = 0.815 \text{ Pu} + 0.082 \text{ IK} - 0.119 \text{ CV} - 4.58 \text{ IK} = 7 \text{ mm} \text{ CV} = 10 \%$$

Lro est pris directement sur le graphique établi par Thébé (1987) qui ne pose pas de problèmes, en abscisse c'est en réalité PmA et non PuS, mais il se trouve que pour S < 1 km² et pour PpS/PpA = 1,1 ils sont très voisins, la différence est de l'ordre de 1 % et pour l'utilisation de ce graphique, nous négligerons le fait qu'il est valable pour PpS/PpA = 1,04 en moyenne et non pour 1,1 tout au moins pour le cas Mouda II limite Sud du Sahel.

On procède ensuite exactement comme pour Mouda I y compris la transposition au Centre du Sahel avec Pps = 1, 4 IK = 5 mm et CV = 5%. Cependant, le bassin étant minuscule, on n'extrapole pas jusqu'à 20 km². C'est déjà beaucoup de le faire pour 5 km^2 .

On trouvera les résultats au tableau 2.

4.2.4. Bassin de Cagara Ouest (Burkina-Faso) (Superficie: 24,3 km²)

$$\frac{PpS}{PpA} = 1,37$$

Il était classé en P2 en 1965 ; il est certainement plus imperméable maintenant. Dans ce qui suit, on considèrera le bassin tel qu'il était lors de la dernière campagne de mesure (1985).

Lrc est calculé pour IK égal à 5 mm (Lrc = 0,710 PuS - 5,5).

Pour déterminer Lro, on prend la relation mise au point par Albergel :

$$Lro = 0.60 PmA + 0.02 PmA IK - 44$$

Les coefficients d'abattement pour $S = 1 \text{ km}^2$, 5, 20 et 24,3 sont égaux à 1, 0,91, 0,835, 0,82.

Les transpositions pour 1, 5 et 20 km² dans les hypothèses PuS = 50 mm et PpA = 70 mm, s'effectuent exactement comme dans les cas précédents, les points de départ pour les courbes PpA 70 mm et celles correspondant à PuS = 50 mm dans les différents cas de surface, sont les points correspondant à la surface du bassin S = 24,3 km². Les résultats sont donnés dans le tableau 2.

Il n'y a pas de transposition au Centre du Sahel, Cagara y est déjà.

Tableau 2 - Lames ruisselées simulées Lrc et lames ruisselées observées Lro pour des bassins "Imperméables" ou P2

Surface du bassin 1 km²

Hypothèse PuS = 50 mm					Hy	ypothès	e PpA	= 70 m	m	
Bassin	PmA mm	Lrc mm	Lro mm	Kcal	Bassin	PmA mm	PuS mm	Lrc mm	Lro mm	Kcal
Jalafanka 1 0,8 km²	40	39,4	19,2	0,49	1	70	88	75,7	43	0,57
Jalafanka 2 1 km²	40	39,4	19,2	0,49	2	70	88	75,7	43	0,57
Mouda I 3 1 km²	50,5	19,9	26,2	1,32	3	70	69,2	31,0	43,7	1,41
Mouda I 4 1 km² Recons. Sahel	39,7	20,24	25,9	1,28	4	70	88	41,9	57,3	1,37
Mouda II 5 1 km²	50,5	35,6	36	1,01	5	70	69,2	51,2	51	0,99
Mouda II 6 1 km² Recons. Sahel	39,7	36	38	1,06	6	70	88	68	69,5	1,02
Cagara O. 7 1 km²	40,6	30,0	30,9	1,03	7	70	86,3	55,8	58,4	1,05
Valeurs adoptées		24-26	26-28					39-44	44-50	

Tableau 2 (suite) - Lames ruisselées simulées Lrc et lames ruisselées observées Lro pour des bassins "Imperméables" ou P2

Surface du bassin 5 km²

Нуро	Hypothèse PuS = 50 mm					Hypothèse PpA = 70 mm					
Bassin	PmA mm	Lrc mm	Lro mm	Kcal	Bassin	PmA mm	PuS mm	Lrc mm	Lro mm	Kcal	
Jalafanka 1 5 km²	40	39,4	17,5	0,445	1	63	79	67,9	32,3	0,48	
Mouda I 2 naturel 5 km²	50,5	19,9	25,4	1,28	2	64,4	63,7	27,8	35,2	1,27	
Mouda I 3 Sahel 5 km²	39,7	20,24	24,7	1,22	3	63	79,4	36,5	47,2	1,29	
Mouda II 4 naturel 5 km²	50,5	35,6	31,6	0,89	4	64,4	63,7	46,7	41,8	0,90	
Mouda II 5 Sahel 5 km²	39,7	36	35,8	0,99	5	63	79,4	59,9	58	0,97	
Cagara O. 6 5 km²	40,6	30,0	29,1	0,97	6	63,6	78,4	50,18	49	0,98	
Valeurs adoptées		24-26	24-26					33-39	35-41		

Surface du bassin 20 km²

Нуро	Hypothèse PuS = 50 mm					ypothè	se PpA	= 70 m	m	*
Bassin	PmA mm	Lrc mm	Lro mm	Kcal	Bassin	PmA mm	Pu\$ mm	Lrc mm	Lro mm	Kcal
Jalafanka 1 20 km²	40	39,4	13,3	0,35	1	57,3	72	60,19	22,35	0,37
Mouda I 2 naturel 18 km²	50,5	19,9	20,3	1,03	2	60,2	59,7	25,6	25,8	1,01
Mouda I 3 naturel 20 km²	50,5	19,9	19,5	0,98	3	59,2	58,5	24,85	24,85	1,00
Mouda I 4 Sahel 20 km²	39,7	20,2	22,2	1,09	4	57,3	72	33,9	(35,6)	1,05
Cagara 6 24,3 km²	40,6	30,0	24	0,80	5	57,4	70,8	44,7	35,8	0,80
Cagara 6 20 km²	40,6	30,0	24,4	0,81	6	58,4	72,0	45,6	37,2	0,82
Valeurs adoptées		24-26	20-23					29-35	25-31	

4.3. Résultats

A première vue, l'examen des résultats du tableau 2 n'est pas extrêmement réconfortant. La dispersion est forte, surtout pour Lrc, un peu moins pour Lro, elle est très forte pour Kcal, ce qui est inquiétant. Pour Kcal, on connaît trois influences sûres, déjà présentées, Kcal décroît quand S croît, décroît quand la perméabilité croît, et décroît quand le réseau hydrographique présente de sérieuses pertes ; il n'empêche qu'on est un peu désarmé lorsqu'il s'agit de prévoir Kcal a priori. Un élément positif cependant : malgré toutes nos manipulations et bien que nous n'ayons jamais utilisé directement les fonctions de calage données par Albergel, Chevallier et Thébé, nous retrouvons sous une forme simplifiée des résultats très voisins. Mais une grande partie de la dispersion résulte des données de Jalafanka ; Lrc est certainement surestimé : le sol le plus imperméable de Jalafanka est représenté par l'équation : Lr1 = 1,083 Pu + 0,133 IK - 11,02, le plus imperméable de Mouda II par l'équation Lr = 0,910 Pu - 4,21, il s'agit dans ce dernier cas de sols d'érosions pour lesquels Casenave et Valentin (1989) ont trouvé :

```
Lrc = 0.95 Pu + 0.09 IK + 0.001 PuIK - 9.
```

Pour la pluie PpA de 70 mm PuS = 88 mm (IK = 5), on trouve respectivement pour Lrc pour Jalafanka 86,15 mm, pour Mouda II 75,8 mm. Casenave donne 75,4 mm. Dans le répertoire de Casenave et Valentin (1989), seul le reg (surface de type grossier G) ruisselle plus.

Peut-être par suite d'un protocole pas encore au point, les équations concernant Lr1 de Jalafanka donnent des valeurs trop élevées. En outre, comme cela a été indiqué plus haut, les valeurs de Lro pour Jalafanka sont trop faibles par suite d'une aire contributrice plus faible que la surface théorique S: (divagation du ruissellement en nappe qui n'existe pas à Mouda II avec sa bordure artificielle). La valeur Kcal pour Jalafanka est donc aberrante, nettement trop faible.

Pour Mouda I au contraire, Lrc est sous-estimé, mais cela ne joue pas énormément comme nous l'avons montré plus haut pour Mouda I : 1 km². Ceci est encore aggravé par un coefficient PpS/PpA faible comme dans les zones limites du Sahel 1,10 au lieu de 1,40, d'où des valeurs plus normales pour Mouda reconstitué Sahel.

Notons que les réseaux hydrographiques des quatre bassins sont normaux, pas de dégradation hydrographique, ce qui évite des valeurs de Kcal anormalement faibles de ce fait. On doit noter aussi que les transpositions à des bassins de surfaces différentes lorsque ces différences sont vraiment fortes donnent des indications, sans plus (fortes valeurs de Kcal pour Mouda I S = 5 km² et surtout S = 1 km²). Les transpositions à d'autres climats sont au moins aussi hasardeuses.

Enfin, comme on le verra plus loin, Mouda II comme Cagara-ouest, maintenant, sont plus imperméables que les bassins P2; ils doivent donner des lames ruisselées supérieures aux lames ruisselées caractéristiques des bassins "imperméables" P2.

Toutes ces considérations étant prises en compte, on trouve que : <u>pour 1 km²</u> les bassins réputés "imperméables" (P2) sont caractérisés par des lames d'eau calculées au simulateur. Lrc et les lames ruisselées suivantes sur le bassin, Lro :

```
Lrc = 24 \text{ à } 26 \text{ mm} pour PuS = 50 \text{ mm} Lro = 26 \text{ à } 28 \text{ mm} Lrc = 39 \text{ à } 44 \text{ mm} pour PpA = 70 \text{ mm} Lro = 44 \text{ à } 50 \text{ mm},
```

ce qui conduirait à Kcal voisin de 1,08 dans le premier cas et à Kcal voisin de 1,13 dans le second.

On retrouve pour PpA = 70 mm et pour la limite inférieure un coefficient de ruissellement Lro/PmA = 64,5 % proche de celui de la courbe Ribstein-Rodier (1988) Imp. Ig = 7 m/Km (Fig. 2).

Pour 5 km²

Lrc = 24 à 26 mm pour PuS = 50 mm Lro = 24 à 26 mm Lro = 33 à 39 mm pour PpA = 70 mm Lro = 35 à 41 mm Kcal voisin de 1 dans le premier cas, de 1,05 dans le second.

Pour 20 km²

Lrc = 24 à 26 mm pour PuS = 50 mm Lro = 20 à 23 mmLrc = 29 à 35 mm pour PpA = 70 mm Lro = 25 à 31 mmKcal voisin de 0.85 à 0.90 dans le premier cas, de 0.85 dans le second.

Constatons que la limite inférieure de la bande définissant Lro pour PpA = 70 mm est légèrement au-dessus de la courbe Imp "Ig7" dans le diagramme de référence. La valeur sous-estimée de Jalafanka a conduit à placer cette courbe un peu trop bas en 1988, alors qu'on ne soupçonnait pas que Lro pour Jalafanka était sous-estimée; on en est sûr maintenant.

5. BASSINS PARTICULIEREMENT IMPERMEABLES (P. Imp. ou P1 P2)

Depuis plusieurs années, la nécessité de créer une nouvelle catégorie de perméabilité correspondant aux moins perméables des bassins représentatifs s'est imposée, et ceci d'autant plus que la dégradation des sols tend à multiplier le nombre de bassins très imperméables.

Nous avons été ainsi conduits à revoir le ruissellement de tous les bassins représentatifs les plus imperméables à l'exclusion des bassins subdésertiques pour lesquels le rapport PpA/PpS élevé mais mal connu ne permettrait pas une comparaison sérieuse entre Lrc et Lro.

Trois bassins représentatifs étudiés au simulateur sont proches de cette catégorie : Cagara-Ouest et Est, et Mouda II. Cagara-Est a été éliminé, les caractéristiques de l'écoulement sur ce bassin sont trop complexes pour une étude de ce genre, les données concernant les deux autres ont été présentées au paragraphe 4.

Mouda II est très petit et il est assez peu probable de retrouver sur 1 km² exactement le même ensemble de sols imperméables que sur 0,003 km², donc une valeur de Lrc aussi forte, de même il est fort probable que de 0,003 à 1 km² la diminution de Kr soit plus forte qu'indiqué par la figure 2 ne serait-ce que par l'incidence de l'action du début de chevelu hydrographique ; enfin, la transposition du régime tropical sec au Centre du Sahel peut introduire une surestimation ; on admettra donc que Lrc et surtout Lro pour Mouda II transporté au Sahel sont surestimés.

Pour tous les autres bassins, on ne connaît que Lro, mais d'après le répertoire Casenave et Valentin (1988), on peut déterminer Lri pour certains états de surface représentés sur ces bassins ; on trouve trois catégories de bassins : une première comprend une association de sols comportant des effleurements de rochers assez sains, simples bombements, et des sols peu profonds assez sableux à croûte superficielle imperméable, d'ailleurs vite saturés après les premières pluies. L'exemple type est le bassin de Gountouré (mare d'Oursi - Burkina-Faso), mais on avait trouvé auparavant la même association sur le bassin de Barlo (Tchad). La seconde catégorie correspond à des regs argileux avec de faibles superficies de quartzites perméables. Ce sont des bassins sous-tributaires de l'oued Ghorfa (Mauritanie),

avec Pô, Kadiel et Djajibine. La troisième comporte des colluvions imperméables au pied de plateaux de grès complètement disloqués très perméables; si ces plateaux ne couvrent que de faibles superficies, les bassins ruissellent beaucoup. Ils sont situés au Niger dans l'Ader Doutchi. Nous avons considéré les bassins de Kaouara et de Galmi I et II. Nous en avons éliminé d'autres pour lesquels les grès couvrent une trop forte superficie. Tous ces bassins reçoivent de 400 à 500 mm par an.

Nous avons, comme précédemment, ramené les superficies à 1 km², 5 km² et 20 km².

Tableau 3
Plus fortes lames ruisselées observées (Lro) pour PpA = 70 mm

Surface 1	km²	Surface 5	km²	Surface 20) km²
Bassins	Lro (mm)	Bassins	Lro (mm)	Bassins	Lro (mm)
Mouda II rec. Sahel	68,0	Mouda II rec. Sahel	60	Mouda II rec. Sahel	46 ?
Cagara 0	58,4	Cagara 0	49	Cagara 24,3 km²	36
Gountouré	60	Gountouré	49	Cagara 20 km²	37
Pô	43	Pô 2,71 km²	35	Gountouré 24,6 km²	35
Kadiel	42	Pô 5 km²	34	Gountouré 20 km²	37,7
Kaouara	49	Kadiel	33	Kadiel 39,5 km²	17,2
Galmi	60 ?	Kaouara réduit	43	Kadiel 20 km²	23
		(2,5 km²) Kaouara réduit	39	Djajibine 20 km²	31
		(5 km²) Galmi	50 ?	Galmi II 20 km²	35 ?

Sur ce tableau, ont été présentées pour Ppa = 70 mm les lames ruisselées des bassins avec leurs véritables superficie reportées dans les colonnes qui leur correspondent à peu près. Kaouara réduit est un bassin dont on a éliminé la partie gréseuse perméable.

Pour Galmi, nous ne disposions pas de tous les éléments pour calculer Lro, nous avons comparé les écoulements annuels de Galmi II (S = 46,5 km²) avec ceux de Kaouara réduit Ke = 23,8 %; pour 46,5 km² le coefficient d'écoulement de Galmi, Ke est de 29 %; pour 2,5 km², il serait un peu plus élevé : 34 %. Il est vraisemblable que les lames ruisselées sont dans le même rapport, ce qui conduirait à une valeur de Lro voisine de 43 x 34/23,8 soit 61 mm, ce qui tend à prouver que sur les bassins types de Galmi II on peut trouver pour 1 km² des valeurs de Lro voisines des plus fortes. Les bassins de l'oued Ghorfa ruissellent nettement moins.

Pour 1 km², on trouve pour Lrc à Mouda II 68 mm et 58 pour Cagara-Ouest. On pourrait admettre comme valeur-type une valeur légèrement supérieure à 50 mm, 52 par exemple. D'après le tableau précédent, on peut admettre les chiffres suivants, Lro de Mouda II étant considéré comme nettement trop fort :

<u>Pour 1 km²</u>: Bassins réputés particulièrement imperméables P1 P2.

Pour
$$20 \text{ km}^2$$
 Lrc = 42 mm Lro = 37 mm (Kr = 64 %) Kcal serait voisin de 0.90.

6. BASSINS RELATIVEMENT IMPERMEABLES (R. Imp. ou P3)

Dans ce cas également, il n'y a pas lieu d'être tout à fait satisfait de ce dont nous disposons pour déteminer les valeurs de Lrc et de Lro correspondant exactement à R. Imp.

Deux bassins représentatifs devraient permettre de le faire : ceux de Polaka, mare d'Oursi (Burkina-Faso) et de Koghnéré, Boulsa (Burkina-Faso). Pour le premier comme dans le cas de Jalafanka, les valeurs de Lrc sont assez fortement surestimées, pour le second, avec une hauteur de précipitation annuelle moyenne 700 mm environ, il est à la limite Sud du Sahel et il pouvait être classé en P3 un peu fort en 1960-1962 ; les sols ont maintenant trop évolué pour pouvoir le classer dans cette catégorie, il faudra donc une double transposition, ramener le résultats au Centre du Sahel et ramener les données de 1984 à celles de 1960. On doit ajouter en plus que le chevelu hydrographique était déjà assez dégradé dès 1960. Enfin, un certain nombre de bassins ont été classés autrefois en P3, mais peu remplissent les conditions voulues pour que les valeurs de Lro obtenues puissent être données en exemple : états de surface très spéciaux ou caractéristiques très particulières pour le chevelu hydrographique, nous en avons retenu quatre pour avoir une meilleure idée de Lro : Mogodé, Leleng, Sinkoroni et Barlo (voir 6.3.).

6.1. Bassin de Polaka (Burkina-Faso) ($S = 9,1 \text{ km}^2$, $Ig \text{ cor} = 15 \text{ m km}^{-1}$)

Cette pente est un peu forte. PpS/PpA = 1,37, P annuelle = (400 mm). Chevallier (1982) donne pour Lrc l'équation suivante : Lrc = 0,369 LrA + 0,183 LrB + 0,448 Lrc le bassin ayant été décomposé en trois parties A B C, mais les surfaces couvertes de granit en boules et de cuirasses ferrugineuses ont été incorporées à A en admettant des potentialités de ruissellement élevées alors que nous l'avons montré (Rodier, 1990), on peut considérer Lro comme négligeable dans ces zones. (celà n'est pas vrai pour toutes les zones couvertes de blocs). En éliminant ces zones particulières, il reste Lrc = 0,297 LrA + 0,183 LrB + 0,448 Lrc. En remplaçant LrA LrB LrC par l'ensemble de équations Lri donnant le ruissellement, on obtient :

$$Lrc = 0,667 Pu + 0,09 IK - 7,12$$

Mais, comme pour Jalafanka, il s'agit d'un premier essai de ce genre au Sahel, le protocole de mesure n'étant pas encore au point, chaque équation individuelle donne des valeurs surestimées comme on l'a vu plus haut et tous les états de surface, en particulier les plus perméables (blocs et cuirasses mis à part) n'ont pas fait l'objet de mesures.

Il est remarquable que l'équation Lri pour l'état de surface le plus perméable Lr = 0,510 Pu - 0,144 IK - 9,72 avec ce coefficient 0,510 correspond à un sol pas trop perméable. Mais il est certain que les commentaires de Chevallier sur les causes de la faible valeur de Kcal restent justifiées bien que Kcal devrait être nettement plus élevé : il s'agit de l'absorption d'une partie du ruissellement en nappes par des touffes de graminées sur microbuttes sableuses.

Pour déterminer Lro, nous sommes partis de la courbe Lro = f(Pm) de Chevallier et al. (1985), mais après une correction que nous avons faite en 1986 tenant compte notamment de l'élimination des autres formes de l'écoulement que le ruissellement. Pour cette courbe révisée : pour PmA = 60 mm Lro = 15 mm IK = 5 mm. La station n'est pas très stable mais celà joue surtout pour la détermination de chaque crue prise individuellement sans affecter la courbe Lro = f(PmA). Les terrains étant nettement plus perméables, les faibles intensités, les traînes en particulier, ruissellent beaucoup moins. On doit prendre PuS/PmS = 0,82 au lieu de 0,90 (ce serait 0,75 si elles ne ruisselaient pas du tout).

On donne les valeurs ainsi obtenues pour Lrc et Lro pour PuS = 50 mm et PpA = 70 mm dans le tableau 4.

Les transpositions pour passer à des surfaces de 1, 5 et 20 km² se font comme indiqué au sous-paragraphe 4.2.1.. Pour les surfaces 9,1, 1, 5 et 20 km², les coefficients d'abattement k sont respectivement égaux à 0,86, 1, 0,90, 0,818.

Pour ces transpositions, on part du point S = 9,1 km² avec Kr = 25 % sur le diagramme des valeurs de Kr en fonction de S donné par Rodier et Ribstein (1988) dans l'hypothèse PpA = 70 mm, et des trois points S = 9,1 km² avec des valeurs de Kr égales à 21,3 %, 22 % et 22,9 %, dans l'hypothèse PuS = 50 mm. Les résultats concernant Lrc, Lro et Kcal figurent dans le tableau 4.

6.2. Bassin de Koghnéré (Burkina-Faso) ($S = 19.8 \text{ km}^2$, $Ig = 4.3 \text{ m km}^{-1}$)

PpS/PpA estimée à 1,15 Pan = 690 mm.

Ce bassin est situé vers la limite méridionale du Sahel. Le coefficient d'abattement est égal à 0,827. La relation déterminant Lrc pour 1984 et pour IK voisin de 10 mm (Albergel, 1987) est la suivante : Lrc = 0,484 PuS - 4,2.

On prend pour IK la valeur 10 mm un peu supérieure à la valeur la plus fréquente (IK = 7 mm) pour la raison suivante : le débit dans le chevelu hydrographique est très sensible à l'indice d'humidité. Quel indice d'humidité ? Cela pose des problèmes depuis longtemps. Séguis, en 1986, avait même été obligé, pour ce bassin, de considérer deux indices IK à la fois, encore que la forme de l'indice de Kohler n'est peut-être pas ici la meilleure. C'est dans ce cas que l'estimation de la crue décennale est la plus délicate. On arriverait peut-être à une assez bonne estimation en combinant une valeur de IK un peu supérieure à la valeur la plus fréquente avec une valeur de Pm légèrement inférieure à celle de fréquence décennale. Dans le cas présent, prendre une valeur de IK égale à 7 mm conduirait à des valeurs de Lrc et Lro par trop sous-estimées, surtout que la dégradation hydrographique de Koghnéré tend à conduire déjà à une valeur de Lr trop faible. D'où cette valeur de 10 choisie pour IK.

Pour Lro, Albergel donne avec quelques réserves la relation

Lro = 0.18 Pm + 0.01 Pm IK - 4.8 (Lro n'est pas séparé des autres formes découlement).

Vérifications faites, cette relation nous a paru tout à fait acceptable. Avec cet ensemble de données, nous avons déterminé, comme pour les autres bassins, Lrc, Lro et Kcal dans les deux hypothèses PuS = 50 mm et PpA = 70 mm; les résultats figurent au tableau 4 pour S = 19,8 km². La transposition pour passer à S = 1 km², 5 km² et 20 km² sous le climat de Koghnéré et dans l'état des sols en 1984 se fait comme au sous-paragraphe 4.2.1., avec des coefficients d'abattement égaux respectivement à 1, 0,90, 0,825. Pour ces transpositions, on part du point S = 19,8 km² Kr = 19,7 % sur le diagramme de la figure 2, dans l'hypothèse PpA = 70 mm et des points caractérisés par S = 19,8 km² et Kr = 16 % pour PuS = 50 mm et PpA = 48,3 mm. Pour 20 km², on a admis que les lames ruisselées étaient les mêmes que pour 19,8 km² (voir calculs en annexe).

Les valeurs de Lrc, Lro et Kcal figurent dans le tableau 4.

Pour transposer au Centre du Sahel, on admet PpS/PpA = 1,4, ce qui nous conduira pour estimer Lro à majorer Pm dans le rapport 1,4/1,15 = 1,217. Les coefficients d'abattement pour 19,8, 1, 5 et 20 km^2 deviendront k = 0,82, 1, 0,89, 0,818, IK devient égal à 5 mm et PuS/PmS = 0,90. Dans ces conditions, la relation pour déterminer LrcS devient : LrcS = 0,470 PuS - 6,90.

On trouve dans le tableau 4 les valeurs de Lro et LrcS pour S = 19.8 km².

Pour la transposition S = 1, 5 et 20 km^2 , on part sur la figure 2 du point $S = 19,8 \text{ km}^2$ Kr = 19,65 % (Kr = Lro/PmA) dans l'hypothèse PpA = 70 mm et des points $S = 19,8 \text{ km}^2$ Kr = 13,25 %, Kr = 14,88 % et Kr = 15,94 % dans l'hypothèse PuS = 50 mm pour 1, 5 et 20 km^2 . Les valeurs de Lro, Lrc et Kcal sont données dans le tableau 4.

Pour passer des données de 1984 à 1960, nous chercherons un rapport approximatif entre les lames ruisselées de 1984 et de 1960. Ce rapport doit être le même pour Lro que pour Lrc car les modifications concernent la répartition des états de surface et peu le chevelu hydrographique. En première approximation, on admettra que ce coefficient de réduction est le même quelles que soient les surfaces et la gamme de valeur de PuS étudiées.

On a cherché à préciser les lames écoulées en 1960 par l'étude des données du rapport de Sircoulon et Klein (1964) sur les campagnes 1962 et antérieures. Dans notre cas, il faut éviter toute influence de la crue très exceptionnelle du 18 août 1962 qui a complètement faussé toutes les valeurs ultérieures de IK. Pour une étude approfondie de Koghnéré, il ne faudrait pas passer ces dernières données sous silence et en 1964, on cherchait à estimer une crue décennale en toute sécurité, on a donc utilisé sans réserve les données ultérieures à cette crue ; mais ici, nous recherchons quelque chose de plus rigoureux donc nous les éliminerons.

Si à partir des données originales on essaye de tracer une esquisse de la courbe Le = f(PmA) (Le : lame écoulée ; c'est Lr dans le cas du rapport d'Albergel) avec trois points :

- la crue du 18.08.1962 Pm = 140 mm Le = 36 mm Ke = 25,7 % IK est un peu fort mais PuS/Pm est relativement faible
- la crue du 01.08.1960 Pm = 47,8 mm Le = 7,2 mm Ke = 15 % et le point Le = 0 correspondant à peu près à Pm = 21 mm.

Sur cette esquisse, on trouve que pour Pp = 70 mm, PmA = 57,8 mm. Le est voisin de 10 mm (limite supérieure). L'examen des hydrogrammes montre que Lr/Le est de l'ordre de 0,8, ceci permet d'estimer une véritable valeur de Lr qui sera absolument comparable à celles de Polaka (nous n'avons pas cherché à séparer les

formes d'écoulement hydrogramme par hydrogramme, ce qui est à peu près impossible à Koghnéré).

On trouve donc pour 1960, Lr = 8 mm pour PpA = 70 mm au lieu de 11,4 mm en 1984, soit un coefficient de majoration de 1,43 qui comprend aussi le passage de Le à Lr. On arrondira à 1,40, valeur par laquelle il faut diviser les données de 1984 pour arriver à celles de 1960 sans oublier quelques corrections secondaires.

On repasse alors aux conditions du Centre du Sahel sans oublier qu'en 1960 PuS/PmS doit être pris égal à 0,82 et non plus à 0,90. A noter qu'à notre avis les lames d'eau ainsi trouvées doivent être assez proches du minimum pour R lmp..

Elles figurent dans le tableau 4, mais ce sont plutôt des ordres de grandeur.

6.3. Résultats

Pour faciliter l'examen de ce tableau, on peut le compléter par quelques valeurs de Lro pour PpA = 70 mm sur des bassins n'ayant pas fait l'objet d'études systématiques au simulateur.

Si on considère les quatre bassins classés en P3 : de Mogodé (Cameroun), Leleng (Cameroun), Sinkoroni (Mali), Barlo (Tchad), les valeurs de Lro s'échelonnent entre 13,9 et 20 mm pour le dernier qui couvre 17,8 km² mais avec une pente de 35 m km-1. Pour les trois autres, les surfaces varient de 1 à 8,9 km², les indices de pente étant toujours supérieurs à 18 m km-1.

Pour Lro, Polaka, avec son indice de pente de 15, devrait donner des valeurs un peu fortes, celles de Lrc sont nettement surestimées. Koghnéré Sahel 1960, par sa proportion de sols peu perméables, devrait donner une valeur un peu forte pour Lro, mais ceci est compensé par la nature du chevelu hydrographique et la faible pente, de sorte que Koghnéré Sahel 1960 pourrait donner pour Lro une valeur voisine de la limite inférieure. Compte tenu de ce qui précède, on peut admettre les chiffres suivants :

<u>Pour S = 1 km^2 </u>, bassins relativement imperméables "R Imp." ou P3 :

Lrc = 12 à					Lro	=	6,5	à	11 mm
Lrc = 25 à	33 mm	PpA =	=	70 mm	Lro	=	15	à	21 mm
Kcal serait voi	isin de 0,60 d	ans les d	de	eux cas.					

Pour $S = 5 \text{ km}^2$

$$\frac{\text{Lrc} = 12 \text{ à } 18 \text{ mm}}{\text{Lrc} = 21 \text{ à } 29 \text{ mm}} \qquad \text{PuS} = 50 \text{ mm} \qquad \frac{\text{Lro} = 6,5 \text{ à } 10,0 \text{ mm}}{\text{Lro} = 12 \text{ à } 17 \text{ mm}}$$

$$\frac{\text{Lro} = 12 \text{ à } 10,0 \text{ mm}}{\text{Lro} = 12 \text{ à } 17 \text{ mm}}$$

$$\frac{\text{Lro} = 6,5 \text{ à } 10,0 \text{ mm}}{\text{Lro} = 12 \text{ à } 17 \text{ mm}}$$

Pour $S = 20 \text{ km}^2$

$$\frac{\text{Lrc} = 12 \text{ à } 18 \text{ mm}}{\text{Lrc} = 19 \text{ à } 26 \text{ mm}} \qquad \text{PuS} = 50 \text{ mm} \qquad \frac{\text{Lro} = 5,5 \text{ à } 8 \text{ mm}}{\text{Lro} = 8,5 \text{ à } 11,5 \text{ mm}}$$

$$\frac{\text{Lro} = 5,5 \text{ à } 8 \text{ mm}}{\text{Lro} = 8,5 \text{ à } 11,5 \text{ mm}}$$

$$\frac{\text{Lro} = 8,5 \text{ à } 11,5 \text{ mm}}{\text{Lro} = 8,5 \text{ a } 11,5 \text{ mm}}$$

Notons que les valeurs de Kcal sont nettement inférieures à celles des bassins imperméables, elles sont supérieures à celles de Koghnéré 60 nettement affectées par la dégradation hydrographique. Pour PpA = 70 mm, les valeurs trouvées sont compatibles avec la courbe R Imp. Ig = 7 du diagramme de Kr 70 (Fig. 2).

Aucun des bassins étudiés n'est homogène.

Tableau 4 - Lames ruisselées calculées Lrc et lames ruisselées observées Lro pour des bassins " Relativement Imperméables" (R.Imp. ou P3)

Surface du bassin 1 km²

	uriace du bassir i kiri-									
Hypothèse PuS = 50 mm					Hypothèse PpA = 70 mm					
Bassin	PmA mm	Lrc mm	Lro mm	Kcal	Bassin	PmA mm	PuS mm	Lrc mm	Lro mm	Kcal
Polaka 1 1 km²	44,6	26,8	12,1	0,452	1	70	78,5	45,7	22,3	0,488
Koghnéré 2 84 1 km²	48,3	20	11,9	0,595	2	70	72,5	30,9	21	0,680
Koghnéré 3 84 Recons. Sahel 1 km²	39,7	16,6	8,1	0,488	3	70	88,2	34,6	21,1	0,612
Koghnéré 4 60 Recons. Sahel 1 km²	43,6	11,9	6,4	0,538	4	70	80,4	24,7	15,1	0,611
Valeurs adoptées		12-18	6,5-11					25-33	15-21	

Surface du bassin 5 km²

Polaka 1 9,14 km ²	44,6	26,8	10	0,374	1	60	67,7	38,5	15	0,388
Polaka 2 5 km²	44,6	26,8	11,1	0,416	2	63	70,8	40,7	17,9	0,439
Koghnéré 3 84 5 km²	48,3	20	11,2	0,558	3	63	65,2	27,4	17	0,620
Koghnéré 4 84 Recons. Sahel 5 km²	39,7	16,6	8,0	0,480	4	62,3	78,5	30	16,5	0,549
Koghnéré 5 60 Recons. Sahel 5 km²	43,6	11,9	6,3	0,529	5	62,3	71,5	21,4	11,8	0,551
Valeurs adoptées		12-18	6,5-10			·		21-29	12-17	

Tableau 4 (suite) - Lames ruisselées calculées Lrc et lames ruisselées observées Lro pour des bassins "Relativement Imperméables" (R.Imp. ou P3)

Surface du bassin 20 km²

Нуро	thèse P	uS = 50) mm		Hypothèse PpA = 70 mm					
Bassin	PmA mm	Lrc mm	Lro mm	Kcal	Bassin	PmA mm	PuS mm	Lrc mm	Lro mm	Kcal
Polaka 1 20 km²	44,6	26,8	8,6	0,321	1	57,3	64,5	36,5	12	0,330
Koghnéré 2 84 19,8 km²	48,3	20	8,7	0,435	2	57,9	59,8	24,7	11,4	0,461
Koghnéré 3 84 Recons. Sahel 20 km²	48,3	20	8,7	0,435	3	57,8	59,8	24,7	11,4	0,461
Koghnéré 4 84 Recons. Sahel 19,8 km²	39,7	16,6	6,22	0,375	4	57,4	72,3	27,1	11,3	0,416
Koghnéré 5 84 Recons. Sahel 20 km²	39,7	16,6	6,22	0,375	5	57,3	72,2	27,0	11,1	0,410
Koghnéré 6 60 Recons. Sahel 19,8km²	43,6	11,9	5,28	0,444	6	57,4	65,9	19,4	(8,1)	0,418
Koghnéré 7 60 Recons. Sahel 20 km²	43,6	11,9	5,19	0,436	7	57,3	65,7	19,3	(7,9)	0,409
Valeurs adoptées		12-18	5,5-8					19-26	8,5-11,5	

7. BASSINS PERMEABLES (P ou P4)

Aucun bassin représentatif n'a fait l'objet d'étude systématique au simulateur. Cependant, pour le bassin de Niamey VI (Niger) constitué de sables avec végétation, très perméables et grès assez peu perméables, les sables ne produisent aucun ruissellement au simulateur. Tous les bassins perméables sahéliens ont été l'objet d'une révision par Rodier (1989), ce qui permet d'obtenir des données pour Lro dans le cas de PpA = 70 mm.

Pour cinq bassins représentatifs: Niamey VI (Niger) 1 km² sables et grès, Dounfing (Mali) 17,5 km² cuirasse latéritique en mauvais état, Ouadi Kaoun (Tchad) 28 km² amas de blocs + sables grossiers perméables + diverses formations imperméables, Ouadi Abou Goulem (Tchad) 50 km² à peu près les mêmes formations Ouadi Abou Goulem (Tchad) 12,3 km² à peu près les mêmes formations, on peut présenter le tableau suivant où figurent les lames ruisselées pour PpA = 70 mm.

Tableau 5

Bassins	1 km ²	5 km²	12 km²	20 km²	50 km²
Niamey VI Dounfing Kaoun 28 km ² Abou Goulem 50 km ² Abou Goulem 12,3 km ²	9,8 mm		< 8,5 mm	4,8 mm 5	mm 4,2 mm

On peut en déduire pour Lro les ordres de grandeur suivants :

$S = 1 \text{ km}^2$	Lro = 7 à 11 mm	Kr = Lro/PmA = 10,	0 à 16 %
$S = 5 \text{ km}^2$	Lro = 6à 8 mm	Kr = 9,5 à 12,7 %	
$S = 20 \text{ km}^2$	Lro = 4à 6 mm	Kr = 6,5 à 10,5 %	pour lg = 7 m km ⁻¹

On peut avoir une idée de Lrc pour un bassin tel que celui de Niamey VI en considérant un bassin fictif avec 30 % de sols gréseux et 70 % de sols sableux très perméables pour lesquels Lrc = 0. Pour les sols gréseux, nous prenons l'équation suivante donnée par Casenave après examen des grès de Niamey : Lrc = 0,5 Pu.

Au Centre du Sahel Ps/PmA = 1,4 et sur les grès PuS/PmS = 0,90 IK = 5 mm.

Pour
$$S = 1 \text{ km}^2$$
 PuS = $70 \times 0.90 \times 1.4 = 88.2 \text{ mm}$.

0,30 du bassin correspondant à la relation plus haut : Lrc = 0.5 PuS 0,70 à une relation Lrc = 0 d'où la relation globale Lrc = 0.15 PuS PuS = 88,2 d'où Lrc = 13,23 mm.

Pour Lro, on passe au Centre du Sahel de 9,8 à 10,2 mm. On a admis que la moitié du gain correspondant à 1,40/1,28 est absorbé par les sables à l'aval des grès. Kcal élevé (0,77) tient aux dispositions particulières de Niamey VI.

Pour $S = 5 \text{ km}^2 \text{ et } 20 \text{ km}^2$, on trouverait Lrc = 11,91 et Lrc = 10,85 mm.

Pour les valeurs correspondantes de Lro (7,2 mm et 5,17 mm), on a admis que les régions sableuses à l'aval absorbaient la totalité du supplément dû au passage de 1,28 à 1,4 pour Ps/Pps.

On pourrait avancer les ordres de grandeur suivants pour le centre du Sahel.

Pour PpA = 70 mm

Pour 1 km ²	Lrc = 11 à 16 mm	Lro = 7 à 11 mm	Kcal = 0,60 à 0,70
Pour 5 km ²	Lrc = 10 à 14 mm	Lro = 6 a 8 mm	Kcal = 0.50 à 0.60
Pour 20 km ²	Lrc = 9 à 11 mm	Lro = 4a 6mm	Kcal = 0.40 à 0.50

On gardera le bassin fictif de Niamey VI <u>pour les calculs concernant PuS = 50 mm</u> avec la même relation donnant Lrc.

Pour $S = 1 \text{ km}^2$, on trouve Lrc = 7,5 mm. Sur l'esquisse de courbe Lr = f(Pm) de Niamey VI passant par PmA = 70 mm Lro = 9,8 mm, on trouve Lro = 4,7 mm pour PmA = 39,7 correspondant à PuS = 50 mm. On peut en déduire de la même façon que plus haut les données correspondant à S = 5 et 20 km² soit Lro = 4 et 3 mm. En définitive :

Pour PuS = 50 mm

Pour	1 km²	Lrc = 6 à 9 mm	Lro = 4.0 å 5 mm	Kcal = 0.55 à 0.65
	5 km ²	Lrc = 6 à 9 mm	Lro = 3,0 à 4 mm	Kcal = 0.45 à 0.50
	20 km²	Lrc = 6 à 9 mm	Lro = 2.5 à 3.5	Kcal = 0.35 à 0.45

8. BASSINS TRES PERMEABLES

Ici, la documentation disponible est plus intéressante. Le bassin de Mouda III (Cameroun) sur regosols et lithosols sur roches vertes, S = 0,058 km², a été suivi régulièrement et a fait l'objet d'une étude au simulateur par Thébé (1987) avec P annuelle = 1 000 mm, il est un peu au Sud des limites du Sahel.

Le bassin de Badé II au Tchad sur les sables de Kélo, S = 21,9 km² n'a été l'objet d'aucune mesure au simulateur, P annuelle = 1 215 mm.

Le bassin de Niamey BAO-Trésor 1,54 km² a été observé sur les sables de Niamey avec une faible partie de sa superficie occupée par des surfaces imperméables artificielles. Il peut faire l'objet d'une reconstitution comme celle qui vient d'être faite pour Niamey VI.

Enfin, on peut tirer un bon nombre d'enseignements de l'étude de Chevallier (1988) sur le bassin très perméable de Booro Borotou (Côte d'Ivoire) pour une pluie annuelle de 1 400 mm.

8.1. Bassin de Mouda III (Cameroun)

Pour l'état de surface étudié sur trois parcelles, Thébé (1987) n'a pas établi de relation Lri en fonction de Pu pour une raison bien simple, c'est que Pu n'est pas, de loin, le facteur principal du ruissellement. Ce n'est pas très grave pour notre étude puisqu'on ne cherche pas, dans le cas de ces bassins très perméables, à déterminer des chiffres précis de Lrc mais à se faire une idée de son ordre de grandeur, de toute façon il est très faible. Mais la parcelle 19 la plus représentative des trois parcelles de Mouda III donne des valeurs de Kru (Kru = Lrc/PuS) pour diverses valeurs de IK.

Comme nous l'avons fait pour Boulsa, nous prendrons des valeurs de IK supérieures à la plus fréquente : IK = 17 mm. Sur la parcelle 19 (Thébé, 1987), on a trouvé : pour PuS = 40 mm et IK = 17 mm, Kru = 0,08 ; pour IK = 15 mm et pour PuS = 32 mm, Kru = 0,04. On peut déduire des valeurs de Lrc de ces deux éléments.

Pour Lro, on considère les rares averses ayant ruisselé et nous en avons déduit que pour PmA voisin de 60 à 70 mm, IK = 17 mm. Kr = Lro/PmA est voisin de 1,5 %. On en déduit avec un peu d'imagination ce qui suit :

Pour PuS = 50 mm: IK = 17 mm Lrc = $50 \times 0.08 = 4 \text{ mm}$

On admet que PuS/PmS = 0,75 (seules les fortes intensités ruissellent).

$$\frac{PmS}{PmA} = 1,10$$
 d'où $PmA = \frac{50}{0,75 \times 1,10} = 59,6 mm$

$$Kr = 1.5\%$$
 d'où $Lro = 59.6 \times 0.015 = 0.9 \, mm \, Kcal = \frac{0.9}{4} = 0.225$

La valeur de Kcal est voisine de celle trouvée par Chevallier pour Booro-Borotou.

Pour PpA = 70 mm

PuS = $70 \times 1.1 \times 0.75 = 57.7$ mm, on peut garder Kru = 0.08 d'où Lrc = $57.7 \times 0.08 = 4.6$ mm.

PmA = 70 mm, on admet Kr = 1,7 % voisin de 2, retenu par Rodier (1989) $Lro = 70 \times 0,017 = 1,2 \text{ mm}.$

Ces chiffres sont valables pour $S = 1 \text{ km}^2$.

Si nous transposons au Centre du Sahel comme ceci a été fait pour Mouda I et Mouda II :

Pour $S = 1 \text{ km}^2$, on admet IK = 15 mm Kru = 0.04 pour Pu pas trop éloigné de 50 mm, PmS/PmA = 1.4 au lieu de 1.1 , PuS/PmS = 0.75.

Pour PuS = 50 mm PmA = 47.6 mm, on doit prendre en compte pour estimer Kr une valeur de PmA égale à $50 \times 1,10/0,75 \times 1,4 = 52,4 \text{ mm}$ correspondant à Kr = 0,013.

Pour PpA = 70 mm PuS = $70 \times 0.75 \times 1.4 = 73.5 \text{ mm}$.

Pour déterminer Kr à partir des données directes du bassin sous le climat Nord Cameroun, on doit considérer une valeur de PmA égale à $70 \times 1,4/1,1$ soit 89 mm qui correspond à Kr = 0,019. On admet Kru = 0,06 au lieu de 0,04, 89 étant nettement supérieur à 50 mm. On en déduit les valeurs de Lrc, Lro, reportées sur le tableau 5.

Pour $S = 5 \text{ km}^2$, le coefficient d'abattement est égal à 0,9. Les résultats figurent dans le tableau 4.

Pour $S = 20 \text{ km}^2$, on ne peut pas extrapôler les valeurs de Lro à partir des données d'un bassin de 0,058 km², mais il est fort vraisemblable que Lro = 0 dans tous les cas.

De façon générale, les chiffres sont plus faibles au Sahel car on doit prendre en considération une valeur plus faible de IK.

8.2. Bassin de Niamey BAO-Trésor (Niger) $S = 1,54 \text{ km}^2$

En procédant comme pour le bassin de Niamey VI, on peut considérer que 88 % de la surface ne produit pas de ruissellement et 12 % en produit avec la relation :

$$Lrc = 0.85 PuS + 0.10 IK - 8.64$$
 (Albergel, 1987)

pour sols moins perméables que les grès de Niamey (toitures, goudrons, etc.).

La relation pour le bassin devient :

$$Lrc = 0.102 PuS + 0.012 IK - 1.04 IK = 7mm.$$

La valeur de Lro pour Pp70 est donnée par Rodier (1990) Kr = 7 %. PmA pour 1,54 km² est égal à 70 x 0,975 = 68,6 Lro = 5,01 mm.

On a établi une esquisse de la courbe de variation de Kr en fonction de Pm qui permet de déterminer Lro dans les divers cas.

Avec des coefficients d'abattement égaux à 1, 0,90 et 0,82 pour respectivement S = 1, 5 et 20 km², on trouve les valeurs de Lro et Lrc qui sont données dans le tableau 6 dans les deux hypothèses : PuS = 50 mm PpA = 70 mm (voir calculs en annexe).

Nous n'avons pas jugé utile de pratiquer la transposition au centre du Sahel.

8.3. <u>Bassin de Badé II</u> (Tchad) S = 22 km² Pannuelle : 1,215 mm

Pour ce bassin sableux homogène, on peut trouver des valeurs de Lro, qui ne sont données par Rodier (1989) que pour PpA = 100 mm : Kr = 0,45 %. Le coefficient Kr (non publié) pour PpA = 70 mm avait été estimé à 0,40 %. Si on transpose au Sahel, la pluie au sol sera majorée de 40 %, mais la valeur à prendre pour IK sera plus faible que sous le climat de Badé IK = 7 au lieu de IK = 15 et encore, on prend IK = 7 au lieu de 5 pour la même raison qu'à Koghnéré ; Lr est nettement sensible à IK. Enfin les pertes dans le réseau hydrographique sont plus élevées. Pour ces raisons, la valeur de Kr 70 pour le bassin transposé au Sahel sera prise égale à 0,3 %.

On pourrait craindre d'ailleurs que le ruissellement soit nul mais l'exemple du grand bassin amont de Niamey S = 20 km² qui, non observé régulièrement, a présenté un écoulement même pour des averses non exceptionnelles, montre que pour ces bassins très perméables, à peu près homogènes (les zones gréseuses pour ce bassin de 20 km² n'occupent qu'une très faible partie de la surface), Kr n'est pas nécessairement nul. Avec Kr = 0,3 %, on trouve pour le Sahel avec S = 22 km² PmA = 57 mm : Lro = 0,17 mm. Nous avons essayé d'estimer Lro pour S = 5 km² et dans l'hypothèse PuS = 50 mm, on trouve Lro = 0,15 et Lro = 0,51; le premier pour les conditions du Sahel et le second dans les conditions naturelles (IK plus élevé).

Il est très probable que la forme du ruissellement est la même que celle observée par Chevallier à Booro-Borotou (1988), c'est-à-dire du ruissellement superficiel sur sol saturé à peu près uniquement dans le chevelu hydrographique et à ses abords immédiats. Les chiffres donnés pour ce bassin, surtout pour le Sahel, ne sont que des ordres de grandeurs (voir tableau 6).

8.4. Bassin de Booro-Borotou (Côte-d'Ivoire) (S = 1,36 km²)

Bassin sur gneiss altérés, ensemble des états de surface complexes mais très perméables, Ig = 22,2 m Km⁻¹, étudié par Chevallier (1988). Bien que le modèle simulateur s'applique très mal, il est intéressant de présenter ici la fonction de production : Lrc = 0,12 PuS + 0,03 IK + 0,042 IK x PuS - 2,1.

Ici, PuS = PuA.

Notons la très faible valeur du coefficient de PuS. Ce coefficient est en général d'autant plus élevé que la perméabilité est plus faible. Pour PpA = 70 mm, à la limite Sud du Sahel avec PuS/PpA = 1,1 et IK = 10 mm, on trouverait une valeur de Lrc égale à 7,54 mm, du même ordre de grandeur que ce qui a été trouvé sur d'autres bassins.

8.5. Résultats

Du tableau 6, on peut déduire ce qui suit :

Pour 1 km² Bassins réputés très perméables (T.P. ou P5)

Lrc = 5 à 1 mm	PuS = 50 mm	Lro = 2,5 à 0 mm	Kcal = 0,50 à 0
Lrc = 8 à 2 mm	PpA = 70 mm	Lro = 6 à 0 mm	Kcal = 0,75 à 0
Pour 5 km ²			
Lrc = 5 à 1 mm	PuS = 50 mm	Lro = 2 à 0 mm	Kcal = 0,4 à 0
Lrc = 7 à 1 mm	PpA = 70 mm	Lro = 4 à 0 mm	Kcal = 0,55 à 0
Pour 20 km ²			
Lrc = 5 à 1 mm	PuS = 50 mm	Lro = 1,2 à 0 mm	Kcal = 0,24 à 0
Lrc = 6,5 à 1 mm	PpA = 70 mm	Lro = 2 à 0 mm	Kcal = 0,30 à 0

Les valeurs de 0,70 pour Niamey tiennent probablement au draînage artificiel très bon par définition.

Tableau 6 - Lames ruisselées simulées Lrc et lames ruisselées observées Lro pour des bassins "Très Perméables" ou P5

Surface du bassin 1 km²

MITACE OF DESSITE FRIT										
Hypothèse PuS = 50 mm				Hypothèse PpA = 70 mm						
Bassin	PmA mm	Lrc mm	Lro mm	Kcal	Bassin	PmA mm	PuS mm	Lrc mm	Lro mm	Kcal
Mouda III 1 1 km²	59,6	4	0,9	0,225	1	70	57,7	4,6	1,2	0,26
Mouda III 2 1 km² SAHEL	47,6	2	0,71	0,355	2	70	73,5	4,4	1,3	0,30
Niamey Bao 3 1,54 km² SAHEL	39,7	4,12	1,83	0,44	3	68,6	86,44	7,84	5,01	0,64
Niamey Bao 4 1 km² SAHEL	39,7	4,12	2	0,48	4	70	88,2	8,02	5,56	0,69
Valeurs adoptées		5-1	2,5-0					8-2	6-0	

Surface du bassin 5 km²

Mouda III 1 5 km² SAHEL	47,6	2	0,5	0,250	1	63	66,2	3,3	0,76	0,23
Niamey Bao 5 km²	39,7	4,12	1,63	0,40	2	63	79,4	7,12	3,80	0,53
Badé II 5 km²	66,7		0,53		3					
Badé II 5 km² SAHEL	47,62		0,15		4	63			0,36	
Valeurs adoptées		5-1	2-0					7-1	4-0	

Surface du bassin 20 km²

Niamey Bao 20 km²		4,12	1,03	0,25	1	57,4	72,32	6,40	2	0,31
Badé 20 km² SAHEL	47,62		0,11		2	57,4			0,19	
Valeurs adoptées		5-1	1,2-0					6,5-1	2-0	

Tableau 7 - Comparaison des lames ruisselées simulées Lrc et des lames ruisselées observées Lro pour diverses perméabilités

Perméabilité	Surface du bassin		pluie utile sol 50 mm	Hypothèse Associatio	Coefficient de calage moyen	
	Km ²	Lrc	Lro	Lrc	Lro	Kcal
Particulière- ment imper- méables P1 P2	1 5 20	(1)	(1)	52 mm 47 mm 42 mm	60 mm 49 mm 37 mm	1,15 1,05 0,90
Imper- méables P2	1 5 20	24-26 24-26 24-26	26-28 24-26 20-23	39-44 33-39 29-35	44-50 35-41 25-31	1,10 1,02 0,85
Relative- ment imper- méables P3	1 5 20	12-18 12-18 12-18	6,5-11 6,5-10 5,5-8	25-33 21-29 19-26	15-21 12-17 8,5-11,5	0,60 0,55 0,45
Perméables P4	1 5 20	6-9 6-9 6-9	4-5 3-4 2,5-3,5	11-16 10-14 9-11	7-11 6-8 4-6	0,60 0,50 0,40
Très perméables P5	1 5 20	5-1 5-1 5-1	2,5-0 2-0 1,2-0	8-2 7-1 6,5-1	6-0 4-0 2-0	0,60-0 0,45-0 0,30-0

⁽¹⁾ Contrairement au cas de PpA = 70 mm, les nombreuses données de base nécessaires pour calculer Lro dans l'hypothèse PuS = 50 mm n'étaient pas rapidement disponibles.

9. CONCLUSION

Cette comparaison s'est avérée plus laborieuse que nous ne l'avions pensé et les chiffres ne paraîssent pas d'une évidence absolue pour chaque catégorie. Cependant, l'ensemble est cohérent et tout à fait compatible avec les autres analyses du "coefficient de ruissellement". Il est très clair que l'on sort enfin du domaine subjectif en ce qui concerne l'appréciation globale de la perméabilité et que l'on peut "raccorder" les résultats des simulateurs à l'ensemble de ce qui a été fait au Sahel sur les coefficients de ruissellement. Ce qui a été exposé ici est utilisable pour les diverses méthodologies utilisées pour estimer la crue décennale (on peut employer sans crainte ce mot pour la plupart des bassins du Sahel où la hauteur de précipitation est le facteur principal), qu'il s'agisse de celles partant de la pluie décennale PpA et utilisant l'hydrogramme unitaire, comme de celles employant des régressions multiples à partir des débits de crues décennales observées.

Pour ces régressions, au Sahel, la variate Kr est loin d'être inutile.

Ce résultat a été obtenu par l'action intelligente et opiniâtre de Casenave et Valentin grâce aussi aux premiers essais (et aussi aux derniers) de Chevallier et surtout aux travaux systématiques d'Albergel pour passer du simulateur au bassin, dans le Sahel. Ces derniers travaux ont été complétés par ceux de Thébé. La présente étude n'est qu'une remise en ordre avec quelques compléments et une présentation qui se rapproche davantage de ce qui est utilisé dans des méthodologies plus anciennes ; il était assez commode qu'elle soit faite par un ancien pour éviter tout malentendu, mais ceci n'était valable que sous réserve d'un contrôle par les principaux acteurs de ces recherches, ce qui a été fait, et nous remercions vivement J. Albergel, A. Casenave, B. Pouyaud et P. Ribstein pour leur collaboration éclairée.

Mais nonobstant ces résultats réconfortants, les choses ne sont pas si simples. Notre comparaison n'est valable que pour de faibles pentes, un chevelu hydrographique sans histoire au centre du Sahel et un bassin pas trop abrité du vent pour retrouver les mêmes rapports PpS/PpA.

Pour des hauteurs de précipitations PpA supérieures à 70 mm, on peut comparer les deux réseaux de courbes de Kr présentés par Rodier et Ribstein (1988). Pour des indices globaux de pentes plus élevées, on peut employer les mêmes graphiques. Si le chevelu hydrographique présente certaines particularités, on se réfèrera au questionnaire présenté par Rodier et Ribstein (1988).

Si on s'éloigne du centre du Sahel : vers le Sud, la relation donnée par Chevallier et Lapetite (1986) est valable ; vers le Nord jusqu'à PpS/PpA = 1,5 ; au-delà, à notre avis, c'est un peu l'aventure.

Il y a deux difficultés essentielles pour cette comparaison :

D'abord les variabilités d'un bassin à un autre de la fonction de calage entre l'équation de production du modèle simulateur et les lames ruisselées du bassin. Cette fonction de production a été très grossièrement schématisée par Kcal et nous ne pensons pas que l'on soit actuellement en mesure de déceler à l'avance toutes ses variations (sauf celles avec la superficie du bassin et sa perméabilité globale). Les processus dans le réseau hydrographique et à ses abords jouent aussi un rôle capital.

Ensuite, il y a la variabilité du rapport PpS/PpA surtout en fonction de l'exposition du bassin (voir à ce sujet : Pluies et Crues au Sahel (1985)). Sa valeur est en outre mal connue dans les zones subdésertiques.

Tout ceci nous conduit à recommander plus que jamais : d'abord une visite préalable du bassin dans laquelle on n'oubliera pas le chevelu hydrographique et tout ce qui sur les versants peut donner un indice sur les processus du ruissellement. Ensuite, une excellente cartographie des états de surface qui ne peut guère résulter que de l'emploi de la télédétection.



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALBERGEL J. (1987). Genèse et prédétermination des crues au Burkina-Faso. Du m² au km², étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse de doctorat, Université Paris VI, 341 p.

AUVRAY C. (1962). Estimation des débits de crue en régimes tropicaux. CIEH, présenté à la conférence de Monrovia, multigraph. 50 p.

BOUVIER C. (1985). Etude du ruissellement urbain à Niamey. Rapport Général, tome 3, interprétation des données. ORSTOM-CIEH, Niamey, 102 p.

CASENAVE A. (1982). Le minisimulateur de pluie. Conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIX, n° 4, pp. 207-227.

CASENAVE A. et GUIGUEN N. (1978). Etudes des crues décennales des petits bassins forestiers en Afrique Tropicale. Détermination des caractéristiques hydrodynamiques des sols forestiers. Campagne 1977. ORSTOM, CIEH, Abidjan, 62 p.

CASENAVE A. et VALENTIN C. (1989). Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. ORSTOM - Collection didactique, 229 p.

CHEVALLIER P. (1982). Simulation de pluie sur deux bassins versants sahéliens (Mare d'Oursi, Haute-Volta). Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIX, n° 4, pp. 253-297.

CHEVALLIER P. (1988). Complexité hydrologique du petit bassin versant. Exemple en savane humide, Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat, Univ. Sc. et Tech. du Languedoc, Montpellier, 336 p.

CHEVALLIER P. et LAPETITE J.P. (1986). Note sur les écarts de mesure observés entre les pluviomètres standards et les pluviomètres au sol en Afrique de l'Ouest. Journées Hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. Coll. ORSTOM, Colloques et Séminaires, pp. 53-64.

CHEVALLIER P., CLAUDE J., POUYAUD B. et BERNARD A. (1985). Pluies et crues au Sahel. Hydrologie de la Mare d'Oursi (Burkina-Faso). Travaux et documents de l'ORSTOM, n° 190, Paris, 251 p.

CLAUDE J., BERNARD A. et SAADOUN N. (1978). Etude hydrologique de sept bassins versants alimentant la Mare d'Oursi. Rapport de campagne 1978. ORSTOM, Ouagadougou, multigraph. 67 p.

DUBREUIL P., CHAPERON P., GUISCAFRE J. et HERBAUD J. (1972). Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux. Années 1951-1969. ORSTOM, Paris, 916 p.

LE BARBE L. (1982). Etude du ruissellement urbain à Ouagadougou. Essai d'interprétation théorique. Recherche d'une méthode d'évaluation de la distribution des débits de pointes de crues à l'exutoire des bassins urbains. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIX, n° 3, pp. 135-204.

RODIER J.A. (1986). Caractéristiques des crues des petits bassins versants représentatifs au Sahel. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XXI, n° 2, pp. 3-26 + annexes.

RODIER J.A. (1989). Ecoulement de surface dans les bassins perméables du Sahel - Comparaison avec d'autres bassins perméables. Hydrol. Continent., 4,2, pp. 123-138.

RODIER J.A. et AUVRAY C. (1965). Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique Occidentale. ORSTOM-CIEH, Paris, 46 p.

RODIER J.A. et RIBSTEIN P. (1988). Estimation des caractéristiques de la crue décennale pour les petits bassins versants couvrant de 1 à 10 km². ORSTOM, Montpellier, 133 p.

SEGUIS L. (1986). Recherche pour le Sahel, d'une fonction de production journalière (lame précipitée-lame écoulée). Thèse de doctorat, Univ. Sc. et Tech. du Languedoc, Montpellier, 326 p.

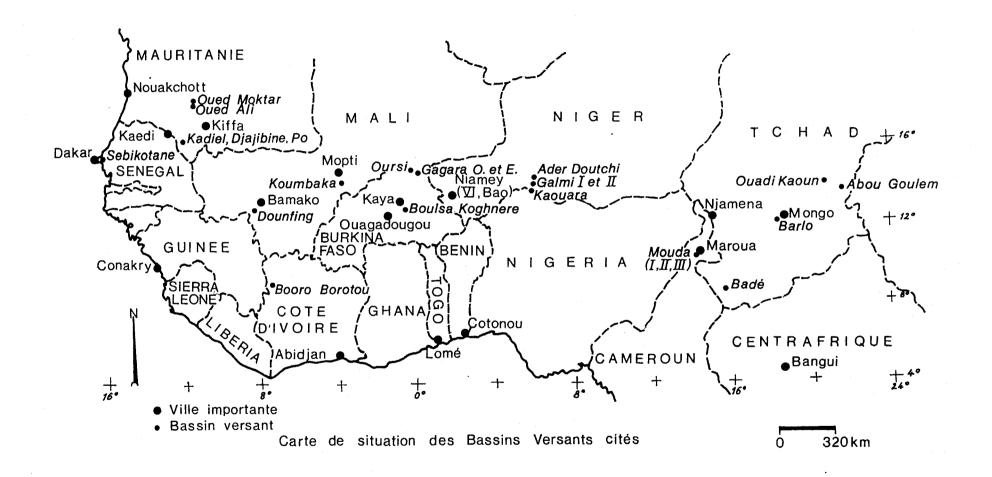
SIRCOULON J. et KLEIN J.C. (1964). Etude hydrologique de bassins versants expérimentaux dans l'Est Volta. Bassin de Boulsa. Campagne 1962. ORSTOM, serv. Hydrol., Paris, 77 p.

THEBE B. (1987). Hydrodynamique de quelques sols du Nord Cameroun. Bassins versants de Mouda. Contribution à l'étude du transfert d'échelles. Thèse Docteur Univ. Sc. et Tech. du Languedoc., Montpellier, 306 p.

VALENTIN C. (1981). Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de régions subdésertiques. Dynamique de formation et conséquences sur l'économie de l'eau. Thèse 3è cycle, Univ. Paris VII, 259 p.

VUILLAUME G. (1974). L'abattement des précipitations journalières en Afrique intertropicale. Variabilité et précision des calculs. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XI, n° 3, pp. 205-240.

ANNEXE



Calcul des lames de ruissellements Lrc déterminées par simulateur et des lames ruisselées correspondant aux observations directes de débit Lro, sur divers bassins représentatifs.

1. Jalafanka (Burkina-Faso) S = 0,81 km² P annuelle = 400 mm

$$\frac{P_{Sol}}{P_{Assoc}} = 1.4 \text{ choix de IK} = 5 \text{ mm (IK} = (IKn-1 + Pun-1)e^{-\alpha t}, \alpha = 0.5)$$

a) PuS =
$$50 \text{ mm}$$
 Lrc = $0.967 \text{ PuS} + 0.129 \text{ IK} - 9.96$
Lrc = 39.35 mm

Sur le bassin $Pm_{Assoc} = Pp_{Assoc} = 50/1,4 \times 0,90 = 39,68$ arrondi à 40 mm, Lro pris sur la courbe Lro = f(Pm) corrigée du rapport mare d'Oursi par Rodier (1986) est égal à 19,2 mm.

b) PpA = 70 mm PmA = 70 mm PuS =
$$70 \times 1.4 \times 0.9$$
 = 88 mm
Lrc (formule précédente) = 75.7 mm
Lro (même courbe que pour a) = 43 mm

c) Transposition à $S = 1 \text{ km}^2$, 5 km^2 , 20 km^2 pour PuS = 50 mm

$$\frac{S = 1 \text{ km}^2}{Lrc = 39,4 \text{ mm}} = \frac{PpA : on admet Kr pour 1 km}{Lro = 19,2 \text{ mm}} = \frac{S = 1 \text{ km}^2}{Lrc} = \frac{18 \text{ km}^2}{18 \text{ km}^2} = \frac{18 \text{$$

$$\frac{S = 5 \text{ km}^2}{Lrc = 39,4 \text{ mm}}$$
 PmA = 40 mm PmA/PpA = 0,9

Pour
$$5 \text{ km}^2$$
 PpA = $40/0.9 = 44.5 \text{ mm}$

Pour S = 1 km², on admet que Kr est le même que pour 0,81 km²

Pour
$$S = 1 \text{ km}^2$$
 PpA = 44,5 mm sur la courbe Lro = f(Pm) Lro = 22,8 mm

$$Kr = \frac{22.8}{44.5} = 51.25 \%$$

Sur la courbe Pp = 70 mm, Jalafanka fig. 2 (Rodier et Ribstein, 1988) de 1 km 2 à 5 km 2 , Kr passe de 61 à 52,5 %; pour la courbe Pp = 44,5 mm, on admet que Kr passe de 61 à 52 %.

Pour 5 km²

$$Kr = \frac{51,25 \times 52}{61} = 43,7 \%$$

$$Lro = 40 \times 0,437 = 17,5 \text{ mm}$$
 $Lro = 17,5 \text{ mm}$

$$\frac{S = 20 \text{ km}^2}{Lrc = 39,4 \text{ mm}}$$
 PmA = 40 mm PmA = 0,818 PpA

Pour 20 km² PpA =
$$40/0.818 = 49 \text{ mm}$$

Pour 1 km² PpA = 49 mm sur la courbe Lro = f(Pm) Lro = 25,6 mm
$$Kr = \frac{25,6}{49} = 52,3 \%$$

Sur la courbe PpA = 70 mm de Jalafanka fig. 2 (Rodier et Ribstein, 1988) de 1 km² à 20 km², Kr passe de 61 % à 39,5 %, on admettra le même rapport pour la courbe PpA = 49 mm.

Pour 20 km²
$$Kr = \frac{52,3 \times 39,5}{61} = 33,2 \%$$

Lro = 40 x 0,332 = 13,3 Lro = 13,3 mm

d) Transposition à S = 1 km², 5 km², 20 km², pour Pp_{Assoc} = 70 mm

2. $\underline{\text{Mouda I}}$ (Cameroun) $S = 18 \text{ km}^2$

On a transposé légèrement les données de Mouda à celles de la limite Sud du Sahel caractérisées par IK = 7 mm Cv = 10 % PpS/PpA = 1,1 valeurs légèrement diffé-rentes de celles adoptées par Thébé dans des conditions naturelles plus méridio-nales PmA/PpA = 0,86.

a) PuS = 50 mm

```
Lr1 confondu avec Lr2 (pas très heureux)

Lr2 = 0,758 Pu + 0,146 IK - 0,207 Cv - 4,57

Lr3 = 0,575 Pu + 0,264 IK - 17

Lr4 = 0,403 Pu + 0,139 IK - 0,230 Cv - 6,13

Lr5 = 0,583 Pu + 0,205 IK - 0,135 Cv - 8,17

Lr6 = 0,661 Pu + 0,197 IK - 0,292 Cv - 5,47

Lr7 = 0
```

Lrc = 0.30 Lr2 + 0.31 Lr3 + 0.11 Lr4 + 0.16 Lr5 + 0.05 Lr6

Pour PuS = 50 mm Lrc = 19,9 mm

$$PmA = \frac{50}{1,1 \times 0.9} = 50,4 \, mm$$
 $PpA = \frac{50,4}{0,86} = 59,3 \, mm$

Sur la courbe Lr = f(Pm) de Thébé corrigée Rodier, on trouve pour PmA = 50,4 mm

Lro = 20,3 mm

b) PpA = 70 mm PmA =
$$70 \times 0.86 = 60.2 \text{ mm}$$
 PuS = $60.2 \times 1.1 \times 0.9 = 59.7$ IK = 7 mm Cv = 10%

En utilisant l'ensemble de la formule donnée en 2 a), on trouve pour PuS = 59.7 mm $\underline{\text{Lrc}} = 25.59 \text{ mm}$

Sur le diagramme Thébé corrigé Rodier pour PmA = 60,2 mm Lro = 25,8 mm

c) Transposition à $S = 1 \text{ km}^2$, 5 km^2 , 20 km^2 , pour PuS = 50 mm

$$S = 1 \text{ km}^2$$
 PuS = 50 mm PmA = PpA = 50/1,10 x 0,9 = 50,5

Lrc est indépendant de S. Il ne dépend que de PuS constant Lrc = 19,9 mm.

Pour le calcul de Lro, il faut suivre Kr sur une courbe de Kr = f(S) pour PpA = 50,5 mm (voir fig. 2 extraite de Rodier et Ribstein, 1988) en partant de $S = 18 \text{ km}^2$.

Pour $18 \text{ km}^2 = \text{PmA} = \text{PpA} \times 0.86 = 50.5 \times 0.86 = 43.4 \text{ mm}$

Sur la courbe Lro = f(Pm) de Thébé modifiée Rodier, on trouve Lro = 15,5 mm. Kr = 15,5/43,4 = 35,8 % valable pour S = 18 km².

Si c'était la courbe PpA = 70 mm, de $S = 18,1 \text{ km}^2$ à $S = 1 \text{ km}^2$ (fig. 2), Kr passerait de 42,9 à 62,5 %.

En admettant pour la courbe PpA = 50.5 une forme analogue, Kr passe de 35.8 % à 35.8 x 62.5/42.9 lorsque S passe de 18 km² à 1 km² Kr = 52.3 %

$$Lro = 0.523 \times 50.5 = 26.2 \text{ mm}$$

 $Lro = 26.2 \text{ mm}$

$$\frac{S = 5 \text{ km}^2}{PpA}$$
 PuS = 50 mm PmA = 50,5 mm PmA/PpA = 0,92 PpA = 50,5/0,92 = 55 mm Lrc = 19,9 invariable

Pour Lro, on doit suivre une courbe de Kr pour PpA = 55 mm en partant de S = 18 km² comme plus haut.

Pour 18 km^2 PmA = $55 \times 0.86 = 47.4 \text{ mm}$.

Sur la courbe Lro = f(Pm), Lro = 18,3 mm Kr = 18,3/47,4 = 38,7 %.

Sur la courbe Pp = 70 mm pour S de 18 à 5 km², Kr passe de 42,5 à 54,7. Kr pour 5 km² = 38,7 x 54,7/42,5 = 50 % Lro = $50,5 \times 0,5 = 25,4 \text{ mm}$.

 $\frac{S = 20 \text{ km}^2}{PpA}$ PuS = 50 mm PmA = 50,5 mm PmA/PpA = 0,845 PpA = 50,5/0,845 = 59,8 mm.

On suit la courbe PpA = 59.8 mm en partant de S = 18 km^2 .

Pour 18 km^2 PmA = $59.8 \times 0.86 = 51.3 \text{ mm}$.

Sur la courbe Lro = f(Pm) Lro = 20,6 mm Kr = 40,1 %

Sur la courbe PpA 70 mm de 18 à 20 km², Kr passe de 42,5 à 41,9 %

$$Kr = \frac{40,1 \times 41,9}{42,5} = 38,7 \%$$

 $Lro = 50,5 \times 0,387 = 19,5 \text{ mm}$
 $Lrc = 19,9 \text{ mm} \text{ (invariable)}$

d) Transpositions à $S = 1 \text{ km}^2$, 5 km^2 , 20 km^2 , pour PpA = 70 mm

 $S = 1 \text{ km}^2$ PpA = 70 mm PmA = 70 mm PuS = $70 \times 0.9 \times 1.1 = 69.2 \text{ mm}$

L'application des formules Lr1à Lr6 conduit à : Lrc = 30,99 mm.

Pour PpA = 70 mm, les courbes de la fig. 2 (Rodier et Ribstein, 1988) donnent Kr = 62,5 % (42,9 pour 18 km²) pour S = 1 km² Lro = 70 x 0,625 = 43,7 mm

 $\frac{S = 5 \text{ km}^2}{PpA}$ PpA = 70 mm PmA = 70 x 0,92 = 64,4 mm PuS = 64,4 x 0,9 x 1,1 = 63,7 mm.

On en déduit comme plus haut Lrc = 27,82 mm.

Pour PpA = 70 mm, les courbes de la fig. 2 donnent Kr = 54.7 % pour S = 5 km^2 Lro = $64.4 \times 0.547 = 35.2 \text{ mm}$.

 $\frac{S = 20 \text{ km}^2}{\text{PpA}}$ PpA = 70 mm PmA = 70 x 0,845 = 59,2 PuS = 59,2 x 0,9 x 1,1 = 58,5 mm.

On en déduit comme plus haut <u>Lrc = 24,85 mm</u>.

Pour PpA = 70 mm, les courbes de la fig. 2 donnent Kr = 42 %<u>Lro = $59.2 \times 0.42 = 24.85 \text{ mm}$ </u>.

e) Transposition au centre du Sahel (conditions de Jalafanka)

PuS = 50 mm PpS/PpA = 1,4 au lieu de 1,1 IK = 5 mm Cv = 5 %

 $\frac{S = 18 \text{ km}^2}{PpA} = 0.825$ $PmA = \frac{50}{1.4 \times 0.9} = 39.7 mm$

$$PpA = \frac{39,7}{0.825} = 48,12 mm$$

Lrc est obtenu par les formules Lr2 à Lr6 avec 1K = 5 mm Cv = 5 %.

On trouve

Lrc = 20,24 mm.

Lro doit être pris sur le diagramme Thébé corrigé avec Pm x 1,4/1,04 puisque le sol reçoit 1,4/1,04 fois plus de pluie.

 $\frac{S = 1 \text{ km}^2}{\text{Lrc}}$ PuS = 50 mm PmA = PpA = 39,7 mm Lrc = 20,24 mm

Pour le calcul de Lro, on doit partir de $S = 18 \text{ km}^2 \text{ sur la courbe PpA} = 39,7 \text{ mm}$.

Pour S = 18 km², PmA correspondant à 39,7 mm = 39,7 x 0,825 = 32,75 mm. Mais pour utiliser le diagramme de Thébé corrigé, il faut partir de 32,75 x 1,4/1,04 = 44,08 mm

Lro (diagramme Thébé corrigé) = 16,6 mm

 $Kr = \frac{16.6}{32.75} = 51 \%$

Sur la courbe PpA = 70 mm (fig. 2) de Mouda I pour passer de $S = 18 \text{ km}^2$ à $S = 1 \text{ km}^2$

Kr passe de 64 % à 81,9 %

Pour PpA = 39,7 mm Kr passe de 51 à 51 x 81,9/64 = 65,3 % $Lro = 39,7 \times 0,653 = 25,9 \text{ mm}$

 $\frac{S = 5 \text{ km}^2}{Lrc = 20,24 \text{ mm}}$ PmA = 39,7 mm PmA/PpA = 0,90 PpA = 44,1

Pour $S = 18 \text{ km}^2$ PmA correspondrait à 44,1 x 0,825 = 36,4 mm.

On utilise sur le diagramme Thébé corrigé $36,40/1,04 \times 1,4 = 49 \text{ mm}$ Lro = 19,3 mm Kr = 19,3/36,4 = 53 %

Sur la courbe PpA = 70 mm de Mouda I, si S passe de 18 km² à 5 km² Kr passe de 64 à 75 %

Pour PpA = 43,2 mm Kr passe de 53 à 53 x 75/64 = 62,1<u>Lro = 39,7 x 0,621 = 24,65 mm</u>

 $S = 20 \text{ km}^2$ PuS = 50 mm PmA = 39,7 PmA/PpA = 0,818 PpA = 48,53 mm Lrc = 20,24 mm

Pour $S = 18 \text{ km}^2$ PmA correspondrait à $48,53 \times 0,825 = 40,04 \text{ mm}$.

On part sur le diagramme corrigé Thébé de $40,04 \times 1,4/1,04 = 53,9 \text{ mm}$ Lro = 23.0 mm

 $Kr = \frac{23}{40.04} = 57,44\%$

Sur la courbe PpA 70 mm de Mouda I, si S passe de 18 à 20 km² Kr passe de 64 à 62,2 %. Pour PpA = 48,53 mm Kr passe de 57,44 à 57,44x62,2/64 = 55,82 % Lro = 39,7 x 0,5582 = 22,16 mm.

f) Transposition au centre du Sahel (conditions de Jalafanka) PpA = 70 mm

PpS/PpA = 1,4 au lieu de 1,1 IK = 5 mm Cv = 5 %

<u>S = 18 km²</u> PmA/PpA = 0,825 PmA = 57,75 mm PuS = 57,75 x 1,4 x 0,9 = 72,77 Lrc est calculé par les formules Lr2 à Lr6 Lrc = 32,75 mm

Lro est calculé à partir de 57,75 x 1,4/1,04 = 77,6 mm d'où sur le diagramme Thébé corrigé Lro = 37 mm

 $Kr = \frac{37}{57,75} = 64 \%$

 $S = 1 \text{ km}^2$ PmA = PpA = 70 mm PuS = 70 x 0,9 x 1,4 = 88 mm.

D'après les formules Mouda I pour PuS = 88 mm Lrc = 41,94 mm

Pour PpA = 70 mm S = 18 km² Kr = 64 % Pour 1 km² (fig. 2) Kr passe à 81,9 % Lro = 70 x 0,819 = 57,3 mm

 $\frac{S = 5 \text{ km}^2}{PuS = 63 \text{ x 1,4 x 0,9}}$ PpA = 70 mm PmA = 0,90 PpA PmA = 63 mm PuS = 63 x 1,4 x 0,9 = $\frac{79,4 \text{ mm}}{PuS}$

D'après les formules Mouda I pour PuS = 79,4 mmLrc = 36,50 mm

Pour S = 5 km^2 (fig. 2) Kr passe à 75 % Lro = $63 \times 0.75 = 47.2 \text{ mm}$

 $S = 20 \text{ km}^2$ PpA = 70 mm PmA = 0,818 PpA PmA = 57,26 mm PuS = 57,26 x 1,4 x 0,9 = 72,1 mm

D'après le formules Mouda I pour PuS = 72,1 <u>Lrc = 33,90 mm</u>

Pour S = 20 km² (fig. 2) Kr passe à 62,2 % <u>Lro = 57,26 x 0,622 = 35,6 mm</u>

3. Mouda II (Cameroun) $S = 0,003 \text{ km}^2$

On admet que PmA = PpA pour 1 km² et que Kr pour 1 km² est égal à Kr pour 0,003 km².

a) Transposition à 1 km² et 5 km² pour PuS = 50 mm.

La transposition à 1 km² est déjà un peu risquée, peut-on retrouver sur 1 km² les mêmes proportions de sols 1, 2, 3 qu'à la partie extrême de la tête d'un bassin ? C'est encore plus risqué pour 5 km², mais ceci permet une comparaison entre potentialités de ruissellement de bassins tels que Mouda I et Mouda II.

Pour 0,003 km² et 1 km², on admet que l'abattement est égal à 1 et on néglige la très faible variation de Kr pour ces sols très peu perméables dans l'ensemble.

 $S = 1 \text{ km}^2$ PuS = 50 mm PmA = PpA = 50,5 mm IK = 7 mm Cv = 10 %

PpS/PpA = 1,1 (conditions limites du Sud du Sahel)

Lr1 = 0.910 PuS - 4.21

Lr2 = 0.758 Pu + 0.146 IK - 0.207 Cv - 4.53

Lr6 = 0,661 Pu + 0,197 IK - 0,292 Cv - 5,47

Lrc = 0.51 Lr1 + 0.28 Lr2 + 0.21 Lr6 (Thébé)

PuS = 50 mm, on en déduit

Lrc = 35,58 mm.

Sur le graphique Thébé Lro = f(Pm) pour Mouda II, on trouve pour PmA = 50,5 mm

Lro = 36 mm

 $\frac{S = 5 \text{ km}^2}{\text{Lrc}}$ PuS = 50 mm PmA = 50,5 mm PpA = 50,5/0,92 = 55 mm Lrc = 35,58 mm invariable.

Pour Lro, on suit la courbe PpA = 55 mm.

Pour $0.003 \, \text{km}^2$ PpA = 55 mm.

Lro = 39 mm (diag. Thébé)

 $Kr = \frac{39,0}{55} = 71 \%$

Sur la fig. 2, en reconstituant la courbe Mouda II parallèlement aux courbes PpA = 70 mm Kr passe de 71 à 62,5 lorsque S passe de 0,003 km² à 5 km², $Lro = 50,5 \times 0,625 = 31,56 \text{ mm}$

b) Transposition à 1 km² et 5 km² pour PpA = 70 mm

 $S = 1 \text{ km}^2$ PpA = 70 mm PmA = 70 mm PuS = 69,2 mm

L'application des formules Lr1, Lr2 et Lr6 conduit pour PuS = 69,2 mm àLrc = 51,22

Pour 1 km² Kr est sensiblement le même que pour 0,003 km².

Sur le diagramme Thébé Mouda II pour PmA = 70 mm, on trouve

$$Lro = 51 \text{ mm}$$
 $Kr = \frac{51}{70} = 73 \%$

 $S = 5 \text{ km}^2$ PpA = 70 mm PmA/PpA = 0,92 PmA = 64,4 mm PuS = 63,76

L'application des formules Lr1, Lr2, Lr6 conduit à Lrc = 46,72 mm.

Sur le diagramme fig. 2 Rodier de 0,003 à 5 km^2 Kr passe de 73 % à 65,5 % Lro = $64,4 \times 0,655 = 42,8 \text{ mm}$

c) Transposition au centre du Sahel pour S = 1 km², 5 km² pour PuS = 50 mm

PpS/PpA = 1,4 IK = 5 mm Cv = 5 %

 $S = 1 \text{ km}^2$, même situation que pour $S = 0,003 \text{ km}^2$

PuS = 50 mm PmA = PpA = 39,7 mm.

L'application des formules Lr1, Lr2, Lr6, conduit pour PuS = 50 mm à $\underline{\text{Lrc}} = 36,01 \text{ mm}$.

Sur le graphique Thébé pour Mouda II, il faut prendre en considération ce qui arrive effectivement au sol c'est-à-dire Pm'A = PmA x 1,4/1,04 soit 53,44 mm on trouve Lro = 38 mm

 $S = 5 \text{ km}^2$ PuS = 50 mm PmA = 39,7 mm PmA/PpA = 0,90 PpA = 44,1 mm <u>Lrc invariable = 36,01 mm</u>

Pour Lro, on suit la courbe PpA = 44,1 mm.

Pour S = $0,003 \text{ km}^2$ PpA = PmA = 44,1 mm

$$(Pm'A) = \frac{44,1 \times 1,4}{1,04} = 59,37$$

Sur la courbe Thébé :

$$Lro = 41,7$$

$$Kr = \frac{41,7}{44,1} = 94,6 \%$$

Pour 5 km², en prenant une courbe parallèle à la plus proche de la fig. 2, Kr passe de 94,6 à 87,5 % Lro = $39,7 \times 0,875 = 34,74 \text{ mm}$.

d) Transposition au centre du Sahel pour S = 1 km², 5 km² pour PpA = 70 mm.

 $S = 1 \text{ km}^2$, même situation que pour $S = 0.003 \text{ km}^2$

PmA = PpA = 70 mm PuS = 70 x 1,4 x 0,9 = 88 mm.

L'application des formules Lr1, Lr2 et Lr6, conduit pour PuS = 88 mm à $\frac{\text{Lrc} = 66,87 \text{ mm}}{\text{Lro pour Pm'A}} = \text{PmA x 1,4/1,04} = 94,23 \text{ mm}.$

Sur le diagramme Thébé pour 94,23 mm

$$Lro = 69 mm$$

$$Kr = \frac{69}{70} = 98,6\%$$

 $\frac{S = 5 \text{ km}^2}{PuS}$ PpA = 70 mm PmA = 0,9 PpA = 63 mm PuS = 63 x 1,4 x 0,9 = 79,4 mm.

L'application des formules Lr1, Lr2 et Lr6, conduit pour 79,4 mm à Lrc = 59,93

Pour Lro, on suit la courbe PpA = 70 mm (fig. 2) de $0,003 \text{ km}^2$ à 5 km^2 , on passe de Kr = 98,6 % à Kr = 92 %

$$Lro = 63 \times 0.92 = 58 \text{ mm}$$

4. Gagara Quest (Burkina-Faso) S = 24,3 km² P annuelle = 460 mm

Pps/PpA = 1,37 1K = 5 mm PuS/PmS = 0,90

a) PuS = 50 mm Lrc = 0,710 PuS - 5,5 (Albergel) Lrc = 30 mm

Sur le bassin $PmA = \frac{50}{1,37 \times 0.9} = 40,55 mm$ Lro = 0,6 PmA + 0,02 PmA IK - 4,4 (Albergel) Lro = 24 mm

b) PpA = 70 mm PmA = $70 \times 0.82 = 57.4 (0.82 \text{ pour } 23.4 \text{ km}^2)$ PuS = $57.4 \times 1.37 \times 0.9 = 70.8 \text{ mm}$ Lrc (formule précédente) = 44.72 mmLro (autre formule précédente) = 35.78 mm

c) Transposition à S = 1 km², 5 km² et 20 km² pour PuS = 50 mm

 $S = 1 \text{ km}^2$ PuS = 50 mm PmA = 50/1,37 x 0,9 = 40,55 mm PpA = 40,55 mm Formule précédente Lrc = 30 mm

Pour calculer Lro, il faut suivre la courbe PpA = 40,55 mm en partant de S = 24,3 km².

Pour 24,3 km² PmA = PpA x 0,82 = 33,25 mm Lro (autre formule précédente) = 18,87 mm $Kr = \frac{18,87}{33.25} = 56,8\%$

Sur la courbe PpA = $70 \text{ mm pour S} = 24,3 \text{ km}^2$ Lro = 35,78 Kr = 62,3 % (voir plus haut).

Sur cette courbe de $S = 24.3 \text{ km}^2$ à $S = 1 \text{ km}^2$, Kr passe de 62,3 % à 83,5 %.

Sur la courbe PpA = 40,55, on admet la même majoration relative.

Pour 1 km² $Kr = \frac{56,8 \times 83,5}{62,3} = 76,11 \%$ Lro = 40,55 x 0,7611 = 30,86 mm

 $S = 5 \text{ km}^2$ PuS = 50 mm PmA = 40,55 mm PmA/PpA = 0,91 PpA = 44,56 mm <u>Lrc (invariable) = 30 mm</u>

Pour S = 24,3 km² PmA = PpA x 0,82 = 36,54 mm Lro (autre formule précédente) = 21,18 mm $Kr = \frac{21,18}{36.54} = 58\%$

Sur la courbe PpA = 70 mm, pour passer de 24,3 à 5 km², Kr passe de 62,3 à 77 %.

Sur la courbe PpA = 44,56 mm, même majoration relative.

Pour 5 km²
$$Kr = \frac{58 \times 77}{62,3} = 71,69 \%$$

Lro = 40,55 x 0,7169 = 29,07 mm

 $S = 20 \text{ km}^2 \text{ PuS} = 50 \text{ mm PmA} = 40,55 \text{ mm PmA/ppA} = 0,835 \text{ PpA} = 48,56 \text{ mm}$ $\frac{\text{Lrc (invariable)}}{\text{Lrc (invariable)}} = 30 \text{ mm}$

Pour S = 24,3 km² PmA = PpA x 0,82 = 39,82 mm
Lro (autre formule précédente) = 23,47 mm
$$Kr = \frac{23,47}{39.82} = 58,94 \%$$

Sur la courbe PpA = 70 mm en passant de 24,3 à 20 km², Kr passe de 62,3 à 63,7 %.

Sur la courbe PpA = 48,56 même majoration.

Pour 20 km²
$$Kr = \frac{58,94 \times 63,7}{62,3} = 60,12\%$$

Lro = 40,55 x 0,6012 = 24,38 mm

- d) Transposition à S = 1 km², 5 km², 20 km², pour PpA = 70 mm
- $S = 1 \text{ km}^2$ PpA = 70 mm PmA = 70 mm PuS = 70 x 1,37 x 0,9 = 86,31 mm Lrc (formule en 3a) = 55,77 mm
- Pour PpA = 70 mm, la courbe de la fig. 2 partant de $S = 24,3 \text{ km}^2$ Kr = 62,3 % donne Kr = 83,5 % pour $S = 1 \text{ km}^2$ $Lro = 70 \times 0,835 = 58,4 \text{ mm}$
- $S = 5 \text{ km}^2$ PpA = 70 mm PmA = 70 x 0,91 = 63,6 mm PuS = 63,6 x 1,37 x 0,9 = 78,42 mm Lrc (formule en 3a) = 50,18 mm
- Pour PpA 70 mm, la courbe de la fig. 2 partant de $S = 24,3 \text{ km}^2$ $Kr = 62,3 \% \text{ donne } Kr = 77 \% \text{ pour } S = 5 \text{ km}^2$ $Lro = 63,6 \times 0,77 = 49 \text{ mm}$
- $S = 20 \text{ km}^2$ PpA = 70 mm, PmA = $70 \times 0.835 = 58.4 \text{ mm}$ PuS = $58.4 \times 1.37 \times 0.9 = 72.01 \text{ mm}$ Lrc (formule en 3a) = 45.63 mm
- Pour PpA = 70 mm, la courbe de la fig. 2 partant de $S = 24,3 \text{ km}^2$ $Kr = 62,3 \text{ mm donne } Kr = 63,7 \text{ pour } S = 20 \text{ km}^2$ $Lro = 58,4 \times 0,637 = 37,2 \text{ mm}$

5. Polaka (Burkina-Faso) S = 9,14 km² Pannuelle = 400 mm

$$\frac{PpS}{PpA} = 1,37$$

$$IK = 5 \text{ mm} \quad PmA/PpA = 0,86$$

a) PuS = 50 mm

LrA = 0.601 PuS + 0.079 IK - 6.19 formules Chevallier

LrB = 0.848 PuS + 0.103 IK - 8.64

LrC = 0.744 PuS + 0.106 IK - 8.67

Après correction éliminant les zones couvertes de blocs et de cuirasses ferrugineuses

Sur le bassin PuS/PmS = 0.82 PmA = 50/0.82 x 1.37 = 44.6 mm.

Le graphique Chevallier corrigé Rodier (Lr = 15 mm pour Pm = 60 mm) donne

$$Kr = \frac{10}{44.6} = 22.4 \%$$

b) PpA = 70 mm PmA = 70 x 0,86 = 60 mm PuS = 60 x 1,37 x 0,82 = 67,7 <u>Lrc (formules précédentes) = 38,5 mm</u>

Le graphique Chevallier modifié donne pour PmA = 60 mm

$$\frac{\text{Lro} = 15 \text{ mm}}{Kr = \frac{15}{60} = 25 \%}$$

c) Transposition à $S = 1 \text{ km}^2$, 5 km^2 , 20 km^2 , pour PuS = 50 mm

$$S = 1 \text{ km}^2$$
 PuS = 50 mm PmA = PpA = 50/1,37 x 0,82 = 44,6 mm
 $Lrc = 26,77 \text{ mm (invariable)}$

Il faut suivre pour le calcul de Lro, Kr sur une courbe de Kr = f(S) pour PpA = 44,6 mm (voir fig. 2) en partant de $S = 9,14 \text{ km}^2$.

Pour $9,14 \text{ km}^2$ PmA = PpA x 0,86 = 38,3 mm.

Sur le diagramme Chevallier (corrigé Rodier) à ce PmA correspond

$$Lro = 8,15 \, mm$$

$$Kr = \frac{8,15}{38,3} = 21,3\%$$

Si c'était la courbe PpA = 70 mm de S = 9,14 à S = 1 km^2 , Kr passerait de 25 % à 31,9 %.

En admettant pour PpA = 44,6 mm la même variation relative, de 9,14 à 1 km²

Kr devient

$$\frac{21,3 \times 31,9}{25} = 27,1 \%$$
Lro = 44.6 x 0.271 = 12.10 mm

 $\frac{S = 5 \text{ km}^2}{\text{Lrc}}$ PuS = 50 mm PmA = 44,6 PpA = 44,6/0,90 = 49,6 mm Lrc = 26.77 mm (invariable)

Pour Lro, on doit suivre la courbe PpA = 49,6 mm en partant de S = 9,14 km²

Pour $9,14 \text{ km}^2$ PmA = PpA x 0,86 = 42,7 mm.

Sur le diagramme Chevallier (corrigé Rodier) à ce PmA correspond

Lro =
$$9.42 \text{ mm}$$

 $Kr = \frac{9.42}{42.7} = 22\%$

Sur la courbe PpA = 70 mm de S = $9,14 \text{ km}^2$ à S = 5 km^2 , Kr passerait de 25 % à 28,4 %.

Sur la courbe PpA = 49,6 mm Kr passe à 22 x 28,4/25 = 25,11 % <u>Lro = 44,6 x 0,251 = 11,15 mm</u>

 $\frac{S = 20 \text{ km}^2}{Lrc}$ PuS = 50 mm PmA = 44,6 PpA = 44,6/0,818 = 54,4 mm $\frac{Lrc}{Lrc}$ = 26,77 mm (invariable)

Pour Lro, on doit suivre la courbe PpA = 54,4 mm en partant de S = 9,14 km²

Pour $9,14 \text{ km}^2$ PmA = PpA x 0,86 = 46,75 mm.

Sur le diagramme Chevallier (corrigé Rodier) à ce PmA correspond

Lro =
$$10.7 \text{ mm}$$

 $Kr = \frac{10.7}{46.75} = 22.9 \%$

Sur la courbe PpA = $70 \text{ mm de S} = 9,14 \text{ km}^2 \text{ à S} = 20 \text{ km}^2$, Kr passerait de 25 % à 21 %.

Sur la courbe PpA = 54,4 mm Kr passe à 22,9 x 21/25 = 19,25 % Lro = 44,6 x 0,1925 = 8,58 mm

d) Transposition à S = 1 km², 5 km², 20 km² pour PpA = 70 mm

 $\frac{S = 1 \text{ km}^2}{PpA}$ $\frac{S = 1 \text{ km}^2}{PpA}$ $\frac{PpA}{PqA} = 70 \text{ mm}$ $\frac{PmA}{PqA} = 70 \text{ mm}$

D'après les formules Chevallier corrigées

$$Lrc = 45,73 \text{ mm}$$

Pour PpA = 70 mm, une courbe analogue à celles de la fig. 2 partant de $S = 9,14 \text{ km}^2$, Kr = 25 % donne pour $S = 1 \text{ km}^2$

$$Kr = 31.9 \%$$

 $Lro = 70 \times 0.219 = 22.3 mm$

 $S = 5 \text{ km}^2$ PpA = 70 mm PmA = $70 \times 0.9 = 63 \text{ mm}$ PuS = $63 \times 1.37 \times 0.82 = 70.8 \text{ mm}$

On en déduit comme plus haut Lrc = 40,73 mm

Pour PpA = 70 mm une courbe analogue à celles de la fig. 2 partant de $S = 9,14 \text{ km}^2$, Kr = 25 % donne pour $S = 5 \text{ km}^2$

$$S = 20 \text{ km}^2$$
 PpA = 70 mm PmA = $70 \times 0.818 = 57.3 \text{ mm}$
PuS = $57.3 \times 1.37 \times 0.82 = 64.5 \text{ mm}$

On en déduit comme plus haut LrcS = 36,49 mm

Pour PpA = 70 mm, une courbe analogue à celles de la fig. 2 partant de $S = 9,14 \text{ km}^2$, Kr = 25 % donne pour $S = 20 \text{ km}^2$

$$Kr = 21 \%$$

 $Lro = 57.3 \times 0.21 = 12.04 mm$

6. Koghnéré (Burkina-Faso) ensemble de Boulsa S = 19,8 km²

On considèrera d'abord la situation en 1984.

a)
$$PuS = 50 \text{ mm}$$
 Lrc = 0,484 PuS - 4,2 (Albergel) Lrc = 20 mm

Sur le bassin
$$PmA = \frac{50}{1,15 \times 0.9} = 48,31 \text{ mm}$$

Lro (formule Albergel) = 0.18 PmA + 0.01 PmA IK - 4.8 Lro = 8.73 mm

b) PpA = 70 mm PmA/PpA = 0,827 PmA = 57,9 mm PuS = 57,9 x 1,15 x 0,9 = 59,82 mm Lrc (formule 6a) =
$$\frac{24,74 \text{ mm}}{11,39 \text{ mm}}$$

c) Transposition à $S = 1 \text{ km}^2$, 5 km^2 , 20 km^2 pour PuS = 50 mm

$$S = 1 \text{ km}^2$$
 PuS = 50 mm

$$PmA = PpA = \frac{50}{1,15 \times 0,9} = 48,31 \, mm$$

Lrc = 20 mm (invariable)

Pour Lro, suivre la courbe PpA = 48,31 en partant de S = 19,8 km² PmA = 48,31 x 0,827 = 39,95 mm

Lro (formule 6a) = 6.39 mm

$$Kr = \frac{6,39}{39.95} = 15,99 \%$$

Sur la courbe PpA = $70 \text{ mm pour S} = 19.8 \text{ km}^2$ Lro = 11.39 mm

$$Kr = \frac{11,39}{57,9} = 19,67 \%$$

Sur cette courbe de $S = 19.8 \text{ à } S = 1 \text{ km}^2$, Kr passe de 19,67 à 30,2 %.

Sur la courbe PpA = 48,31, on admet la même majoration relative.

Pour 1 km²

$$Kr = \frac{15,99 \times 30,2}{19,67} = 24,62 \%$$

Lro = 48,31 x 0,2462 = 11,89 mm

 $S = 5 \text{ km}^2$ PuS = 50 mm PmA = 48,31 mm

$$n - PmA = 48,31 mm$$

$$PpA = \frac{48,31}{0,9} = 53,68 \, mm$$

Lrc = 20 mm (invariable)

Pour Lro, suivre la courbe PpA = 53,68 mm en partant de S = 19,8 km²

Pour $S = 19.8 \text{ km}^2 \text{ PmA} = 53.68 \times 0.827 = 44.39 \text{ mm}$ Lro (formule 6a) = 7.63 mm

$$Kr = \frac{7,63}{44.39} = 17,19\%$$

Sur la courbe PpA = $70 \text{ mm pour S} = 19.8 \text{ km}^2$

 $Lro = 11,39 \, mm$

Kr partirait de 19,67 % pour arriver à 26,43 % pour 5 km².

Sur la courbe PpA = 53,68 mm, on admet la même majoration relative pour

5 km²

$$Kr = \frac{17,19 \times 26,43}{19,67} = 23,10 \%$$

Lro = 48,31 x 0,231 = 11,16 mm

 $S = 20 \text{ km}^2$

$$Lrc = 20 mm$$

On admet la même lame écoulée que pour 19,8 km² $Lro = 8,73 \, mm$

d) Transposition à $S = 1 \text{ km}^2$, 5 km^2 , 20 km^2 pour PpA = 70 mm

 $S = 1 \text{ km}^2$

$$PpA = 70 mm$$

$$PmA = 70 mm$$

$$PuS = 70 \times 1.15 \times 0.90 = 72.45 \text{ mm}$$

Lrc (formule 6a) = 30,87 mm

Pour PpA = 70 mm sur une courbe analogue à celles de la fig. 2 partant de S = $19.8 \, \text{km}^2$, Kr = $19.67 \, \%$

On arrive à

$$Kr = 30,03 \%$$

$$pour S = 1 km^2$$

$$Lro = 70 \times 0,3003 = 21 \text{ mm}$$

 $S = 5 \text{ km}^2$

$$Ppa = 70 \, mm$$

$$PmA = 70 \times 0.9 = 63 mm$$

$$PuS = 63 \times 1,15 \times 0,9 = 65,21 \text{ mm}$$

d'où Lrc (formule 6a) = 27,36 mm

Pour PpA = 70 mm sur la courbe précédente partant de $S = 19.8 \, \text{km}^2$, Kr = 19.67

On arrive à

$$Kr = 26.9 \% \text{ pour } S = 5 \text{ km}^2$$

 $Lro = 63 \times 0.269 = 16.95 \text{ mm}$

$$S = 20 \text{ km}^2$$
 PpA = 70 mm PmA = $70 \times 0.825 = 57.75 \text{ mm}$
PuS = $57.75 \times 1.15 \times 0.90 = 59.77 \text{ mm}$
d'où LrcS (formule 6a) = 24.73 mm

Pour PpA = 70 mm sur la courbe précédente partant de S = 19,8 km², Kr = 19,67 %

On arrive pratiquement à
$$Kr = 19,67 \%$$
 pour $S = 20 \text{ km}^2$
 $Lro = 57,75 \times 0,1967 = 11,38 \text{ mm}$

e) Transposition au centre du Sahel pour S = 1 km², 5 km², 20 km² pour PuS = 50 mm (Situation 1984)

PpS/PpA = 1,4 avec IK = 5 mm au lieu de 10 Lrc = 0,470 PuS - 6,90 PuS reste égal à 0,9 PmA (situation 1984).

$$\frac{S = 19.8 \text{ km}^2}{\frac{PmA}{PpA}} = 0.82, \ PmA = \frac{50}{1.4 \times 0.9} = 39.7 \ mm, \ PpA = \frac{39.7}{0.82} = 48.38 \ mm$$
Lrc (formule précédente) = 16.60 mm (invariable)

Lro est fourni par la relation $0.18 \text{ PmA} + 0.01 \text{ Pm IK} - 4.8 \text{ avec IK} = 5 \text{ mm en prenant Pm'A au lieu de PmA} \quad \text{Pm'A} = 1.4/1.15 \text{ PmA} \text{ (coefficient de majoration entre l'ancienne et la nouvelle pluie au sol)}.$

$$PmA = 39.7 \text{ mm}$$
 $Pm'A = 48.31 \text{ mm}$ $Lro = 6.22 \text{ mm}$

Pour le calcul de Lro, on doit partir de S = 19,8 km² sur la courbe PpA = 39,7 mm.

Pour
$$19.8 \text{ km}^2$$
 PmA = $39.7 \times 0.82 = 32.54 \text{ mm}$.

Pour la relation donnant Lro, on doit considérer

$$P'mA = \frac{32,54 \times 1,4}{1.15}$$

Pm'A = 39,61 mm

On trouve
$$Lro = 4,31 \text{ mm}$$

$$Kr = \frac{4,31}{32,54} = 13,25 \%$$

Sur la courbe PpA = 70 mm (fig. 2) de Koghnéré, pour passer de $S = 19.8 \text{ km}^2$ à $S = 1 \text{ km}^2$, Kr passe de 19.65 % à 30.2 %.

Pour PpA = 39,7 mm, on admet la même variation relative

$$Kr = 13,25 \times \frac{30,2}{19,65} = 20,41 \%$$

Lro = 39,7 x 0,2041 = 8,10 mm

$$S = 5 \text{ km}^2$$
 PuS = 50 mm PmA = 39,7 mm $\frac{PmA}{100} = 0.89$ PmA =

$$\frac{PmA}{PpA} = 0,89 \qquad PpA = 44,58 mm$$

$$\underline{\text{Lrc}} = 16,60 \text{ mm} \text{ (invariable)}.$$

Pour le calcul de Lro, on doit partir de $S = 19.8 \text{ km}^2 \text{ sur la courbe PpA} = 44,58 \text{ mm}$.

Pour 19.8 km^2 PmA = $44.58 \times 0.82 = 36.56 \text{ mm}$.

Pour la relation donnant Lro

$$P'mA = \frac{36,56 \times 1,4}{1,15} = 44,51$$

On trouve

$$Lro = 5.44 \, mm$$

$$Kr = \frac{5,44}{36,56} = 14,88 \%$$

Sur la courbe PpA = 70 mm de Koghnéré, pour passer de S = 19.8 km^2 à 5 km^2 , Kr passe de 19.65 % à 26.43 %.

Pour PpA = 44,58 mm, on admet la même majoration relative

$$Kr = 14,88 \times \frac{26,43}{19,65} = 20,09 \%$$

Lro = 39,7 x 0,2009 = 7,97 mm

 $S = 20 \text{ km}^2$ PuS = 50 mm, PmA = 39,7 mm P'mA/PpA = 0,818, PpA = 48,50 mm Lrc = 16,60 mm (invariable)

Pour 19,8 km²,

$$PmA = 48,50 \times 0,82 = 39,77 mm.$$

Pour la relation donnant Lro

$$P'mA = \frac{39,77 \times 1,4}{1,15} = 48,42 mm$$

On trouve

$$Kr = \frac{6,34}{39,77} = 15,94\%$$

Sur la courbe PpA = 70 mm de Koghnéré, pour passer de S = 19,8 km² à S = 20 km² Kr passe de 19,65 % à 19,32 %.

Pour Ppa = 48,50 mm, on admet la même réduction relative

$$Kr = \frac{15,94 \times 19,32}{19,65} = 15,67$$

Lro = 39,7 x 0,1567 = 6,22 mm

f) Transposition au centre du Sahel pour S = 1 km², 5 km², 20 km² PpS = 70 mm (situation 1984)

PpA = 70 mm PpS/PpA = 1,4 au lieu de 1,15 IK = 5 mm Cv = 5 %

 $S = 19.8 \text{ km}^2$ PmA/PpA = 0.82 (au lieu de 0.827 au Sud du Sahel)

$$PmA = 70 \times 0.82 = 57.4 \text{ mm}$$
 $PuS = 57.4 \times 1.4 \times 0.9 = 72.32 \text{ mm}$ $Lrc = 0.470$ $PuS - 6.90 = 27.09 \text{ mm}$

Lro est calculé à partir de
$$P'mA = \frac{57,4 \times 1,4}{1,15} = 69,9 mm$$

Lro = 0,18 P'mA + 0,01 P'mA IK - 4,8 = 11,28 mm
 $Kr = \frac{11,28}{57.4} = 19,65 \%$

 $\frac{S = 1 \text{ km}^2}{\text{Lrc (formule précédente)}}$ PpA = PmA = 70 mm PuS = 70 x 0,9 x 1,4 = 88,2 mm $\frac{S = 1 \text{ km}^2}{\text{Lrc (formule précédente)}}$ PpA = PmA = 70 mm PuS = 70 x 0,9 x 1,4 = 88,2 mm

Pour PpA = 70 mm S = 19.8 km^2 Kr = 19.65 %

Pour S' = 1 km² Kr passe de 19,65 à 30,2 % $Lro = 70 \times 0,302 = 21,14 \text{ mm}$

 $\frac{S = 5 \text{ km}^2}{\text{PuS}} \quad \begin{array}{l} \text{PpA} = 70 \text{ mm} \quad \text{PmA} = 70 \text{ x } 0.89 = 62.3 \\ \text{PuS} = 62.3 \text{ x } 0.9 \text{ x } 1.4 = 78.5 \text{ mm} \\ \text{Lrc (formule précédente)} = 30 \text{ mm} \end{array}$

Pour PpA = 70 mm, Kr passe de 19,65 à 26,43 % lorsque $S = 5 \text{ km}^2$

Pour S = 5 km^2 Lro = $62.3 \times 0.2643 = 16.47 \text{ mm}$

 $S = 20 \text{ km}^2$ PpA = 70 mm PmA = $70 \times 0.818 = 57.26 \text{ mm}$ PuS = $57.26 \times 0.9 \times 1.4 = 72.15 \text{ mm}$ Lrc (formule précédente) = 27.01 mm

Pour PpA = 70 mm S = 19,8 km² Kr = 19,65 % <u>Lro = 57,26 x 0,1932 = 11,08 mm</u>

g) Conditions de 1960

LrcS est à diviser par 1,40 PuS passe de 0,9 à 0,82 PmS Lro est à diviser par 1,40 par rapport à e) et f)

<u>Transposition au centre du Sahel pour $S = 1 \text{ km}^2$, 5 km^2 , 20 km^2 PuS = 50 mm (situation 1960)</u>

$$\frac{S = 19.8 \text{ km}^2}{PpA} = 0.82 \qquad Lrc = \frac{16.60}{1.40} = 11.86 \text{ mm}$$

$$\frac{Lrc = 11.86 \text{ mm}}{1.4 \times 0.82} = 43.55 \text{ mm} \qquad PpA = \frac{43.55}{0.82} = 53.11 \text{ mm}$$

Pour la relation donnant Lro (1984), (voir plus haut), il faut considérer

$$P'mA = \frac{43,55 \times 1,4}{1,15} = 53 mm$$

On en déduit Lro (1984) = 7,39 mm d'où

$$Lro\,1960 = \frac{7,39}{1,40} = 5,28\,mm$$

 $S = 1 \text{ km}^2$ PuS = 50 mm PmA = PpA = 43,55 mm Lrc = 11,86 (invariable)

Pour le calcul de Lro, on doit partir de $S = 19.8 \text{ km}^2 \text{ sur la courbe PpA} = 43,55 \text{ mm}$.

Pour 19,8 km² PmA = $43,55 \times 0,82 = 35,71$ mm. Pour la relation donnant Lro (1984), il faut considérer

$$\frac{35,71 \times 1,4}{1.15} = 43,46 \ mm$$

On en déduit Lro (1984) = 5,19 mm

$$Lro(1960) = \frac{5,19}{1,40} = 3,71$$

$$Kr = \frac{3,71}{35,71} = 10,38\%$$

Sur la courbe PpA = 70 mm Kr passe de 15 % à 21,2 % quand S passe de 19,8 à 1 km² (voir h) plus loin).

Pour PpA = 43,55 mm, on admet la même variation relative

$$Kr = \frac{10,38 \times 21,2}{15} = 14,67 \%$$

Lro (1960) = 43,55 x 0,1467 = 6,39 mm

 $S = 5 \text{ km}^2 \text{ PuS} = 50 \text{ mm PmA} = 43,55 \text{ mm}$

$$\frac{PmA}{PpA} = 0.89 \qquad PpA = 48.93 mm$$

$$\underline{\text{Lrc}} = 11.86 \text{ mm (invariable)}$$

Pour le calcul de Lro, on doit partir de $S = 19.8 \text{ km}^2 \text{ sur la courbe PpA} = 48.93.$

Pour 19,8 km² PmA = $48,93 \times 0,82 = 40,12$ mm. Pour la relation donnant Lro (1984), il faut considérer

$$Pm'A = \frac{40,12 \times 1,4}{1.15} = 48,82 mm$$

On en déduit Lro (1984) = 6,43 mm

$$Lro(1960) = \frac{6,43}{1,40} = 4,59 \, mm$$

$$Kr = \frac{4,59}{40,12} = 11,44\%$$

Sur la courbe PpA = 70 mm Kr passe de 15 % à 19 % lorsque S passe de 19.8 km^2 à 5 km^2 (voir h) plus loin). Pour PpA = 48.93 mm, on admet la même variation relative

$$Kr = \frac{11,44 \times 19}{15} = 14,49 \%$$

Lro (1960) = 43,55 x 0,1449 = 6,31 mm

 $S = 20 \text{ km}^2$ PuS = 50 mm PmA = 43,55 PmA/PpA = 0,818 PpA = 53,24 mm Lrc = 11,86 (invariable)

Pour le calcul de Lro, on doit partir de $S = 19.8 \text{ km}^2 \text{ sur la courbe PpA} = 53.24 \text{ mm}$.

Pour 19,8 km² PmA = $53,24 \times 0,82 = 43,66$ mm. Pour la relation donnant Lro (1984), il faut considérer

$$Pm'A = \frac{43,66 \times 1,4}{1,15} = 53,13 mm$$

On en déduit Lro (1984) : 7,42

$$Lro(1960) = \frac{7,42}{1,40} = 5,30 \, mm$$

$$Kr = \frac{5,30}{43,66} = 12,14\%$$

Sur la courbe PpA = 70 mm, Kr passe de 15 à 14,72 % lorsque \$ passe de 19,8 km² à 20 km² (voir h) plus loin).

Pour PpA = 53,24 mm, on admet la même variation relative

$$Kr = \frac{12,14 \times 14,72}{15} = 11,91 \%$$

Lro = 43,55 x 0,1191 = 5,19 mm.

h) Conditions de 1960 centre du Sahel, transposition à S = 1 km², 5 km², 20 km² pour PpA = 70 mm

On divise tout par 1,40 par rapport à f)

$$S = 19.8 \text{ km}^2$$
 $Lrc = \frac{27.09}{1.40} = 19.35 \text{ mm}$ $Lro = \frac{11.28}{1.40} = 8.06 \text{ mm}$

$$S = 1 \text{ km}^2$$
 $Lrc = \frac{34,55}{1,40} = 24,68 \text{ mm}$ $Lro = \frac{21,14}{1,40} = 15,10 \text{ mm}$

$$S = 5 \text{ km}^2$$
 $Lrc = \frac{30}{1,40} = 21,43 \text{ mm}$ $Lro = \frac{16,47}{1,40} = 11,76 \text{ mm}$

$$S = 20 \text{ km}^2$$
 $Lrc = \frac{27,01}{1,40} = 19,29 \text{ mm}$ $Lro = \frac{11,08}{1,40} = 7,91 \text{ mm}$

7. Niamey VI (Niger) S = 1 km² Pannuelle 580 mm

$$\frac{PpS}{PpA} = 1,28$$

$$IK = 7 \text{ mm}$$

On transpose au centre du Sahel $\frac{PpS}{PpA} = 1.4$ IK = 5 mm.

Sur les sables Lro = 0. Sur les grès pas très perméables, on conserve PuS/PmS = 0,90 et on admet 30 % de S couvert par les grès. On admet (communication verbale de A. Casenave (1990).

$$Lr1 = 0,50 PuS.$$

a) Transposition (centre du Sahel) pour \$ 1 km², 5 km², 20 km² PpA = 70 mm

$$\frac{5 = 1 \text{ m}^2}{\text{Lr1}} \quad PpA = PmA = 70 \text{ mm} \quad PuS = 70 \times 1,4 \times 0,9 = 88,2 \text{ mm}$$

$$\text{Lr1} = 0,5 \times 88,2 = 44,1 \text{ mm}$$

$$\text{Lr2} = PuS \times 0 = 0$$

$$\text{Lrc} = 0,3 \text{ Lr1} + 0,7 \text{ Lr2} = 0,3 \times 44,1 = 13,23 \text{ mm}$$

Soit Lro1 la valeur de ruissellement donnée par la fig. 2 pour PmA, Lro au centre du Sahel est égal à Lro1 x 1,4/1,28 <u>au maximum</u> (influence de IK et dégradation supplémentaire viennent en déduction) Lro1 = 9,8 mm

$$Lro = \frac{9.8 \times 1.4}{1.28} = 10,73 mm$$

Kr = 14 %

On prendra <u>Lro = 10,2 mm</u> (la moitié du gain dû au centre Sahel absorbé par IK plus faible et par le lit)

$$\frac{S = 5 \text{ km}^2}{\text{PpA}} \quad \text{PpA} = 70 \text{ mm} \quad \text{PmA} = 70 \times 0.9 = 63 \text{ mm} \\ \text{PuS} = 63 \times 1.4 \times 0.9 = 79.38 \text{ mm} \\ \frac{\text{Lrc} = 0.5 \text{ PuS} \times 0.3 = 79.38 \times 0.15 = 11.91 \text{ mm}}{\text{Lro} = 63 \times 11.5 \%} = 7.2 \text{ mm}$$

comme à Niamey (fig. 2) au Sud du Sahel. <u>Tout</u> le supplément entre centre du Sahel et position de Niamey est absorbé par le lit et par IK plus faible.

$$Lro = 7.2 mm$$

$$\frac{S = 20 \text{ km}^2}{PpA}$$
 PpA = 70 mm PmA = 70 x 0,82 = 57,4 mm PuS = 57,4 x 1,4 x 0,9 = 72,32 mm Lrc = 0,5 PuS x 0,3 = 72,32 x 0,15 = 10,85 mm

Pour Lro, on admet comme plus haut que le supplément apporté par 1,4/1,28 est absorbé par le lit à l'aval et IK donc on garde le même Kr qu'à Niamey (fig. 2).

$$Lro = 57.4 \times 0.09 = 5.17 \text{ mm}$$

et encore cela doit être un maximum.

b) Transposition (centre du Sahel) à $S = 1 \text{ km}^2$, 5 km^2 , 20 km^2 pour PuS = 50 mm

S = 1 km² PuS = 50 mm
$$PpA = PmA = \frac{50}{1,4 \times 0.9} = 39,7 mm$$
(PmA = 43,4 mm) Niamey
$$Lrc = 0,5 \times 0,3 \text{ PuS} = 7,5 \text{ mm} \text{ (invariable)}$$

Au centre du Sahel, Lro correspondant à PmA x 1,4/1,28 soit 43,4 mm, serait de 4,9 mm. On admet que la moitié du gain par rapport à 4,5 est absorbé par IK plus faible et par le lit. Lro = 4,7 mm

S = 5 km² PuS = 50 mm LrcS = 7,5 mm (invariable)

$$PpA = \frac{39,7}{0,9} = 44,1$$
 $P'pA = \frac{44,1 \times 1,4}{1,28}$ $PmA = \frac{50}{1,4 \times 0,9} = 39,7 mm$

Mais au centre du Sahel pour 5 km², on admet que le gain apporté par 1,4/1,28 est nul, donc pour Niamey 1 km² Lro correspondant à 44,1 mm = 5,1 mm

$$Kr = \frac{5,1}{44,1} = 11,56 \%$$

$$S = 20 \text{ km}^2 \text{ PuS} = 50 \text{ mm}$$

$$PmA = \frac{50}{1,4 \times 0,9} = 39,7$$
 $\frac{PuS}{PpS} = 0,82 mm$
 $\frac{Lrc = 7,5 \text{ mm}}{0,82}$ (invariable)
 $\frac{39,7}{0,82} = 48,4$ $P'pA = \frac{48,4 \times 1,4}{1,28}$

Mais au centre du Sahel, on admet pour 20 km² que le gain apporté par 1,4/1,28 est nul, donc pour Niamey 1 km² Lro correspondant à 48,4 = 57 mm

$$Kr = \frac{5.7}{48.4} = 11.78\%$$

Pour Niamey 20 km² Kr = 7,7 % (fig. 2)

$$Lro = 39,7 \times 0,077 = 3,06 \text{ mm}$$

8. Mouda III (Cameroun) $S = 0.058 \text{ km}^2$ Pannuelle = 1 000 mm

Très perméable

$$\frac{PuS}{PpS} = 0.75 \qquad PpA = PmA$$

$$\frac{PpS}{PpA} = 1.1$$

Thébé n'a pas établi de relation donnant Lrc. Le facteur principal est IK et non PuS. On considère la parcelle 19 la plus représentative où a été trouvé ce qui suit :

Sur le bassin, l'observation des rares averses ayant ruisselé conduit à

PmA = PpA = 60 - 70 mm
IK = 17 mm

$$Kr = \frac{Lro}{PmA} = 0,015$$

a) Conditions climatiques du bassin

$$S = 0.058 \, \text{km}^2$$

$$\frac{\text{PuS} = 50 \text{ mm}}{\text{Lrc} = 50 \text{ x} 0.08 = 4 \text{ mm}}$$

$$PmA = \frac{50}{0.75 \text{ x} 1.1} = 59.6 \text{ mm}$$

$$Kr = 1.5 \%$$

$$Lro = 59.6 \text{ x} 0.015 = 0.9 \text{ mm}$$

$$S = 0.058 \, \text{km}^2$$

$$\frac{PpA = PmA = 70 \text{ mm}}{11 - 17 \text{ mm}}$$

$$\frac{\text{PpA} = \text{PmA} = 70 \text{ mm}}{\text{IK} = 17 \text{ mm}}$$
 PuS = 70 x 1,1 x 0,75 = 57,7

PuS étant peu différent de la valeur précédente, on garde 0,08 pour Kru $Lrc = 57,7 \times 0,08 = 4,60 \text{ mm par défaut}$

PmA = PpA = 70 mm, on admet pour Kr la valeur 1,7 % voisine de 2 % admise par $Lro = 70 \times 0.017 = 1.2 \text{ mm}$ Rodier (1989)

L'abattement pour S = 0,058 km² est le même que pour 1 km². La valeur de Kr = Lro/PmA est sensiblement la même pour 1 km² que pour 0,058 km², ce qui conduit peut-être à des valeurs surestimées.

b) Transposition au centre du Sahel pour S = 1 km², 5 km², 20 km² pour PuS = 50 mm

IK = 15 mm (pour Pu voisin de 50 mm)

$$\frac{PmS}{PmA} = 1,4$$
 au lieu de 1,1

 $S = 1 \text{ km}^2$ PuS = 50 mm

$$PmA = PpA = \frac{50}{0.75 \times 1.4} = 47.6 mm$$

Pour PuS = 50 mm

$$Kru = 0.04$$

 $Lrc = 50 \times 0.04 = 2 \text{ mm}$

Pour estimer Lro, il faut considérer

$$P'mA = \frac{PmA \times 1,40}{1,10} = 60,6 mm$$

On admet comme en 8a) Kr = 1.5 %

$$Kr = \frac{Lro}{PmA}$$

Lro = 47,6 x 0,015 = 0,71 mm

 $S = 5 \text{ km}^2$ PuS = 50 mm PmA = 47,6 mm

$$PpA = \frac{47.6}{0.9} = 52.89 \, mm$$

Lrc = 2 mm (invariable)

Pour Lro, on suit la courbe PpA = 52,89 mm

Pour 1 km²

$$P'mA = \frac{52,89 \times 1,4}{1,1} = 67,31 \, mm$$
 proche de 70 mm.

en passant de 1 à 5 km², Kr doit passer à 1 % environ.

$$Lro = 47 \times 0.01 = 0.47 \text{ mm}$$

 $S = 20 \text{ km}^2$

$$Lro = 0$$
?

c) Transposition au centre du Sahel pour S = 1 km², 5 km² pour PpA = 70 mm

$$S = 1 \text{ km}^2$$
 PpA = PmA = 70 mm PuS = 70 x 1,4 x 0,75 = 73,5 mm

On admet Lrc/PuS = 0.06

Lrc = 73,5 x 0,06 = 4,41 mm

$$P'mA = P'pA = \frac{70 x 1,4}{1,1} = 89 mm$$
 correspondant à Kr = 1,9 %
Lro = 70 x 0,019 = 1,33 mm

$$\frac{S = 5 \text{ km}^2}{PpA}$$
 PpA = 70 mm PmA = 70 x 0,9 = 63 mm PuS = 63 x 1,4 x 0,75 = 66,15 mm

On admet
$$Kru = 0.05$$

 $Lrc = 66.15 \times 0.05 = 3.31$

De 1 km² à 5 km², Kr passe de 1,9 à 1,2 %

$$Lro = 63 \times 0,012 = 0,76 \text{ mm}$$

Toutes ces valeurs de Kr et de Lro et de Lrc ne sont que des ordres de grandeur.

$$\frac{PpS}{PpA} = 1,28$$

a) PuS = 50 mm transposé au centre du Sahel S = 1,54 km² IK = 5

$$\frac{\text{Lrc} = 0,12 \quad \text{Lr1} + 0,88 \quad \text{Lr2} = 4,12 \text{ mm}}{0.90 \times 1.40}$$

$$PmA \# PpA \frac{50}{0.90 \times 1.40} = 39,7 mm$$

Il faut considérer
$$P'mA = \frac{39,7 \times 1,4}{1,28} = 43,42 \,mm$$
 sur la courbe Kr = f(PmA) pour BAO-Trésor Kr = 4,6 % Lro = 39,7 x 0,046 = 1,83 mm

b) PpA = 70 mm transposé au centre du Sahel
$$S = 1,54 \text{ km}^2$$

$$\frac{PmA}{PpA} = 0.98$$

$$PmA = 70 \times 0.98 = 68.6 \text{ mm}$$

$$PuS = 68.6 \times 0.9 \times 1.4 = 86.44 \text{ mm}$$

$$Lrc = 7.84$$

Il faut considérer
$$PmA = \frac{68,6 \times 1,4}{1,28} = 75,03 \text{ } mm$$
 sur la courbe.
Kr = f(PmA)

On trouve
$$Kr = 7.3 \%$$
 (au lieu de 7 sous le climat de Niamey)
 $Lro = 68.6 \times 0.073 = 5.01 \text{ mm}$

c) Transposition à $S = 1 \text{ km}^2$, 5 km^2 , 20 km^2 au centre du Sahel PuS = 50 mm

 $S = 1 \text{ km}^2$ PuS = 50 mm

> $PmA = PpA = \frac{50}{1.4 \times 0.9} = 39.7 mm$ Lrc (formule précédente) = 4,12 mm

Pour 1,54 km²

Kr = 4.6 %

Pour 1 km² (courbe fig. 2) Kr = 5%

 $Lro = 39.7 \times 0.05 = 1.99 \text{ mm}$

 $S = 5 \text{ km}^2$ PuS = 50 mm PmA = 39,7 mm

 $PpA = \frac{39,7}{0.9} = 44,1 mm$

Lrc (formule précédente) = 4,12 mm

Pour $1,54 \text{ km}^2$ PmA = $44,1 \times 0.98 = 43,22 \text{ mm}$

Il faut considérer

 $P'mA = \frac{43,22 \times 1,4}{1.28} = 47,28 \, mm$ sur la courbe

Kr = f(PmA)

On trouve

Kr = 4.95 %

Pour 1,54 km²

Kr = 4.95%

Pour 5 km² (courbe fig. 2) Kr = 4.1 % $Lro = 39.7 \times 0.041 = 1.63 \text{ mm}$

 $S = 20 \text{ km}^2$

PuS = 50 mm PmA = 39.7 mm

 $PpA = \frac{39.7}{0.82} = 48.41 \, mm$

Lrc (formule précédente) = 4,12 mm

Pour 1,54 km² PmA = $48,41 \times 0.98 = 47,44 \text{ mm}$

Il faut considérer

 $P'mA = \frac{47,44 \times 1,4}{1.28} = 51,88 \ mm$ sur la courbe

Kr = f(PmA)

On trouve

Kr = 5.45 %

Pour 1,54 km²

Kr = 5.45 %

Pour 20 km² (courbe fig. 2) Kr = 2,6 %

 $Lro = 39.7 \times 0.026 = 1.03 \text{ mm}$

d) Transposition à S = 1 km², 5 km², 20 km² au centre du Sahel pour PpA = 70 mm

 $PpA = 70 \, mm$ $S = 1 \text{ km}^2$

PmA = 70 mm

 $PuS = 70 \times 0.9 \times 1.4 = 88.2 \text{ mm}$

IK = 5 mm

Lrc (formule précédente) = 8,02 mm

Pour 1,54 km²

Kr = 7.3 %.

De 1,54 à 1 km²

Kr passe à 7,95 %

 $Lro = 70 \times 0.0795 = 5.56 \text{ mm}$

PpA = 70 mm $S = 5 \text{ km}^2$

 $PmA = 70 \times 0.9 = 63 \text{ mm}$

 $PuS = 63 \times 0.9 \times 1.4 = 79.38 \text{ mm}$

Lrc = (formule précédente) = 7,12 mm

Pour 1,54 km²

Kr = 7.3 %

De 1.54 à 5 km²

Kr passe à 6.03 %

 $Lro = 63 \times 0,0603 = 3,80 \text{ mm}$

 $S = 20 \text{ km}^2$

PpA = 70 mm $PmA = 70 \times 0.82 = 57.4 \text{ mm}$

 $PuS = 57.4 \times 0.9 \times 1.4 = 72.32 \text{ mm}$

Lrc (formule précédente) = 6,40 mm

Pour 1,54 km²

Kr = 7.3 %

De 1,54 à 20 km²

Kr passe de 7,3 à 3,48 %

 $Lro = 57.4 \times 0.0348 = 2 \text{ mm}$

10. Badé II

 $S = 21.9 \text{ km}^2$

Pannuelle = 1215 mm

$$\frac{PpS}{P=A}=1$$

1,9 km² P annuelle
$$\frac{PpS}{PpA} = 1$$
 $\frac{PmA}{PpA} = 0.85$

Pas d'essais au mini-simulateur, on ne peut qu'estimer Lro,

Dans l'étude Rodier (1989) pour

PpA = 100 mm

Kr = 0.45 %

 $PpA = 70 \, mm \, Kr = 0.40 \, \%$

- a) PpA = 70 mm sous le climat de Badé $PmA = 70 \times 0.85 = 59.5 \text{ mm}$ $Lro = 59,5 \times 0,004 = 0,24 \text{ mm}$
- b) PuS = 50 mm

PmS = PmA = 50/0.75 = 66.7 mm.

On peut prendre

Kr = 0.4 comme pour 9a). $Lro = 66.7 \times 0.004 = 0.27 \text{ mm}$

c) Transposition au centre du Sahel pour 5 km² et 20 km²

PpA = 70 mm

$$\frac{PmA}{PpA} = 0.81 \qquad \frac{PpS}{PpA} = 1.4$$

 $S = 21.9 \text{ km}^2 \quad PmA = 56.7 \text{ mm}$

Pour comparer les résultats du bassin, il faut prendre P'mA = 56,7 x 1,4 = 79,4 au lieu de 59,5 mais premièrement la valeur de IK est beaucoup plus faible et en second lieu la dégradation hydrographique plus forte, cependant Kr ne serait pas nul comme le montre l'exemple de Niamey I où il y avait écoulement pour les fortes averses.

On admet

Kr = 0.003

 $Lro = 56.7 \times 0.003 = 0.17 \text{ mm}$

$$S = 5 \,\mathrm{km}^2$$

$$PpA = 70 mm$$

$$PmA = 70 \times 0.82 = 63 \text{ mm}$$

$$Kr = 0.003$$

$$Lro = 63,00 \times 0,0057 = 0,36 \text{ mm}$$

$$S = 20 \text{ km}^2$$

$$PpA = 70 mm$$

$$PmA = 70 \times 0.82 = 57.4 mm$$

$$Kr = 0.003$$

$$Lro = 57,4 \times 0,0033 = 0,19 \text{ mm}$$

d) Transposition au centre du Sahel pour 5 et 20 km²

$$PuS = 50 mm$$

$$S = 21.9 \, \text{km}^2$$

$$PuS = 50 mm$$

$$PmA = \frac{50}{0.75 \times 1.4} = 47.62$$

P'mA = PmA x 1.4 = 66.7 mm

La comparaison avec 9c) montre que Kr doit être nettement inférieur à 0,003. On admettra de façon un peu arbitraire que Kr pour P'mA = 66,7 mm est égal à 0,002 Lro = $47,62 \times 0,002 = 0,1$ mm

$$S = 5 \text{ km}^2$$

$$PuS = 50 mm$$

$$PmA = \frac{50}{0.75 \times 1.4} = 47,62 \, mm \quad PpA = \frac{47,62}{0.90} = 52,91 \, mm$$

$$PmA = 52,91 \times 0,81 = 42,86$$

 $P'mA = 42,86 \times 1,4 = 60$

$$Kr = 0.0017$$

Quand S passe de 21,9 à 5 km² Kr passe à 0,0017 x 1,9 (voir 9c) = 0,00323 $Lro = 47,62 \times 0,00323 = 0,15 \text{ mm}$

$$S = 20 \text{ km}^2 \text{ PuS} = 50 \text{ PmA} = 47,62$$

$$PpA = \frac{47,62}{0.82} = 58,07 \, mm$$

$$PmA = 58,07 \times 0,81 = 47,04 mm$$

$$Kr = 0.002$$

Qaund S passe de 21,9 à 20 km² Kr passe de 0,002 à 0,0022 (voir 9c)).

$$Lro = 47,62 \times 0,0022 = 0,10 \text{ mm}$$

Tous ces chiffres ne doivent être considérés que comme des ordres de grandeur. Il faut très peu de chose pour que sur deux bassins semblables, avec même valeur de S, Kr passe de 0,3 à 0,6 par exemple, soit une variation de 100 %.

ORSTOM Éditeur Dépôt légal : février 1992 Impression ORSTOM BONDY

ISSN: 0767-2888 ISBN: 2-7099-1074-8 Éditions de l'ORSTOM 72, route d'Aulnay 93143 BONDY Cedex

Photo de couverture : Ruissellement en fin de pluie à Oursi (Burkina Faso)

Cliché: Bernard Pouyaud