

UN TERME DE L'ÉQUATION DU BILAN HYDRIQUE DANS LE SYSTÈME «SOL-VÉGÉTATION» : LE RUISSELLEMENT.

J. Collinet
Responsable du Laboratoire
de Pédologie Expérimentale,
ORSTOM ABIDJAN

INTRODUCTION.

Les études du ruissellement en Côte d'Ivoire et dans certains pays limitrophes sont des préoccupations de longue date d'une équipe de chercheurs travaillant en Côte d'Ivoire.

La façon de traiter le problème a évolué dans le temps du fait de l'accumulation de connaissances sur ce sujet et aussi grâce à la mise au point de nouvelles méthodologies.

Les expérimentations menées sur des parcelles recevant des pluies naturelles ont permis de dégager, au niveau du bilan, les influences des facteurs sol, végétation, topographie sur des ruissellements et des érosions excessifs et des traitements visant à les limiter ont pu être préconisés. Cependant, la multiplicité des paramètres intervenant lors des précipitations naturelles rend difficile toute analyse fine de ces phénomènes; c'est la raison pour laquelle ont été abordées depuis peu de temps des expérimentations sous pluies simulées permettant de dégager plus sûrement les liaisons entre les caractéristiques du ruissellement et les paramètres conditionnels du milieu physique (intensité et durée de la pluie, temps de ressuyage, couvert végétal, traitements culturaux etc...).

MÉTHODES EXPÉRIMENTALES ET RÉSULTATS

En préliminaire de cet exposé, il est nécessaire de situer plus précisément le domaine d'étude qui va être présenté, ceci par deux remarques :

— dans l'équation générale du bilan hydrique du système «sol-végétation» $P = R + DV + DO + ETR + \Delta S$

avec : R = ruissellement
 DV et DO = drainages verticaux et obliques
 ETR = évapotranspiration réelle
 S = variation algébrique du stock d'eau du sol.

... il ne sera question que de données concernant le ruissellement;
— la deuxième remarque a trait à l'échelle à laquelle les modalités du ruissellement seront présentées: les observations porteront surtout sur des études menées à partir de parcelles expérimentales de quelques centaines de mètres carrés, dimension bien en deçà de celle des bassins versants des hydrologues; ce qui ne veut pas dire qu'hydrologues et pédologues ne se rejoignent pas lorsqu'il s'agit d'aborder une analyse détaillée de ce processus de ruissellement.

Les études du ruissellement en Côte d'Ivoire et dans quelques pays limitrophes sont les préoccupations de longue date d'un certain nombre de chercheurs de l'ORSTOM d'Adiopodoumé, la façon de traiter le problème a évolué dans le temps déjà du fait de l'accumulation de nos connaissances sur ce sujet et également grâce à la mise au point de nouvelles méthodologies. Le plan de cet exposé suivra précisément l'ordre chronologique de ces démarches.

Un premier type d'expérimentation a été mené par E. ROOSE sur toute une série de parcelles de ruissellement et d'érosion recevant des pluies naturelles, échelonnées en latitude depuis la Basse Côte d'Ivoire jusqu'en Haute-Volta, c'est-à-dire depuis des climats très humides jusqu'à des climats plus secs et plus contrastés.

Ce genre de parcelle expérimentale est généralement constitué par une surface de cent à quelques centaines de mètres carrés, rectangulaire, allongée dans le sens de la pente, limitée par une bordure isolant du ruissellement extérieur et comportant à sa partie aval un système de réception où sont mesurées et récoltées les eaux de ruissellement.

La comparaison de l'analyse des données collectées à partir de ce dispositif sur ces domaines climatiques différents va faire l'objet d'une synthèse globale, mais on peut dès à présent dégager les faits d'observation les plus saillants.

Sous végétation naturelle (forêt, savane arbustive) ou sous cultures arbustives avec plantes de couverture pérenne, le coefficient de ruissellement global ($K_r = 100 L_r$) reste faible : 0,5 à 5% et ce, même

$\frac{P}{P}$
pour des pentes excédant 20%. Lors des séquences pluvieuses exceptionnelles (fortes intensités et longues durées) ce ruissellement peut osciller entre 10 et 25% (pm. érosion: 0,01 à 1,5 T/ha/an).

Ce ruissellement augmente considérablement lorsque, du fait de la mise en culture, le couvert végétal s'amenuise et le travail a consisté à :

- définir les causes de ces variations,
- proposer des traitements visant à limiter ces ruissellements excessifs.

Le but à atteindre est donc double : favoriser au maximum l'infiltration des eaux pluviales pour recharger les réserves hydriques du sol, limiter au maximum les effets des écoulements des eaux superficielles qui, d'une part se chargent en terres érodées et d'autre part possèdent, surtout à partir de certaines pentes une force érosive (en nappe ou par cisaillement).

Certains paramètres du ruissellement interviennent de façon inéluctable, il s'agit des caractéristiques pluviométriques et topographiques :

Considérons d'abord les caractéristiques pluviométriques, c'est-à-dire les intensités, les durées des averses et les laps de temps séparant deux averses consécutives et leurs conséquences sur le ruissellement :

— une première règle consiste à considérer le système sol comme un réservoir se remplissant par l'intermédiaire d'un conduit d'un diamètre et d'une longueur donnée. Si l'intensité de la pluie, à quoi dans le schéma proposé, on va donner la dimension d'un débit (mm/h \rightarrow l/h) reste inférieure ou égale à la conduction hydraulique que permet ce conduit, l'eau va s'infiltrer selon une intensité égale à l'intensité de la pluie. Sinon (conduit trop petit ou réservoir déjà plein) l'intensité de la pluie est supérieure à l'intensité d'infiltration et le ruissellement apparaît.

— Cette première règle est malheureusement trop simpliste; en effet interviennent les caractéristiques du réservoir sol d'où l'air s'échappe difficilement en début de saison des pluies et, surtout, les modifications dans le temps des caractéristiques du «conduit». Expliquons nous: lors d'une averse, en plus des quantités d'eau par unité de temps, ce que nous venons de voir, ce qui compte également c'est l'énergie des myriades de gouttes de pluies d'une

certainne masse arrivant au sol avec une grande vitesse d'impact. L'énergie cinétique des gouttes d'eau se dissipe au niveau du sol en désagrégeant les mottes de terre, les éléments minéraux et organiques constituant ces mottes sont entraînés pour que se produise un ruissellement et, au bilan, la charge solide de la lame d'eau ruisselante permet de calculer l'érosion que nous n'évoquerons pas ici.

Une autre conséquence, et j'en reviens aux modifications subies par le « conduit » est que la structure de la surface du sol change au cours de la pluie, ceci se traduit surtout par une diminution de perméabilité. En effet, une partie des éléments provenant de la désagrégation des mottes colmate les porosités des premiers centimètres du sol; en plus, la pression et les vibrations résultant de l'averse désorganisent la structure de ces premiers centimètres. Le résultat est que l'on assiste, pendant une pluie de forte intensité, à la formation d'une pellicule nettement moins perméable que les horizons sous-jacents. Dans ces conditions, rien ne sert de caractériser une capacité de rétention d'eau de 300 ou 400 mm sur tel ou tel type de sol si l'on ignore quelle peut être la réaction de ces premiers centimètres.

Différents indices permettent de caractériser cette « agressivité des pluies ». La plupart du temps ils tiennent compte du produit de l'énergie cinétique des pluies unitaires par leur intensité maximale pendant 30 mn (facteur R de WISCHMEIER).

En Côte d'Ivoire cet indice d'agressivité climatique croît selon une diagonale Nord-Est (région de Bouna = 500) Sud-Ouest (région de Tabou = 1400). A titre indicatif, il atteint 550 vers Bouaké. On peut donc s'attendre à ce que, tout autre facteur étant constant, ruissellement et érosion augmentent selon cette même direction.

En ce qui concerne les caractéristiques topographiques, plus précisément l'inclinaison de la pente et sa longueur; il apparaît quelques divergences; qui la plupart du temps sont dues au fait qu'il est difficile d'isoler ce seul facteur. Si l'on passe aux bassins versants de moins de 200 km² les hydrologues constatent une augmentation du coefficient de ruissellement en fonction des classes de pentes mais il faut bien avouer que cette observation n'a pu être faite qu'en considérant un grand nombre de cas provenant de zones écologiques différentes tant du point de vue couvert végétal que sol et caractéristiques des précipitations.

Le facteur pente a pu être mieux isolé sur des essais menés à Adiopodoumé, sur sol nu et pour des pentes passant de 4,4 à 7% puis 23%, on s'est aperçu que le ruissellement diminuait au fur et à mesure que la pente topographique augmentait (35% 33% 24%). Ce résultat, pour le moins surprenant, est interprété de la façon suivante: sur pente faible, les porosités ouvertes permettant l'infiltration se colmatent rapidement car l'exportation des éléments détachés n'est que partielle; sur pente forte, cette exportation est complète; d'autre part, à l'érosion en nappe s'ajoute une autre forme d'érosion due à la vitesse acquise par la lame ruisselante: il s'agit d'une érosion par cisaillement qui, découpant le sol, augmente la superficie de la parcelle tandis que se maintient sur les flancs des ravines des porosités ouvertes permettant une reprise de l'infiltration.

Pour ce qui est de la longueur des versants, les parcelles fixes recevant des pluies naturelles se prêtent mal à ce genre d'analyse. En anticipant sur ce qui va être développé ultérieurement, on espère pouvoir mieux isoler ce facteur à l'occasion d'expérimentations réalisées sur des parcelles de longueurs croissantes et arrosées par des pluies simulées.

Si l'on ne peut agir sur les caractéristiques climatiques et difficilement sur la topographie, il est par contre possible de modifier le couvert végétal ou de travailler le sol.

Voyons tout d'abord l'influence du couvert végétal sur le ruissellement en considérant la fourchette de valeurs suivantes:

— sous forêt, par exemple, le ruissellement moyen oscille entre 0,5 et 5%,

— sur sol nu le ruissellement moyen va de 25 à 40% avec des maxima pouvant atteindre 85% pour des séquences pluvieuses exceptionnelles.

Il est difficile de replacer à l'intérieur de cette fourchette toute une gamme de ruissellement qui soit spécifique de tel ou tel couvert végétal. Retenons qu'il est possible de ramener ce ruissellement à des valeurs proches de celle d'un couvert naturel en respectant quelques règles qui visent toutes à:

- protéger le sol contre l'impact direct des gouttes d'eau,
- éviter une hiérarchisation du ruissellement.

Il faut surveiller le calendrier des semis et préférer les plantes de couverture à développement rapide. Par exemple, à Adiopodoumé, sur des pentes de 7% on a constaté une diminution du ruissellement (5 fois) en passant de plantations tardives à faible densité de recouvrement à des plantations hâtives à fort développement (K passant de 20 à 4%). On peut multiplier les exemples prouvant l'effet bénéfique de la densité du recouvrement: dans les cultures industrielles de caféier, palmier à huile, cacaoyer, la présence d'une strate de plantes de couverture diminue de 15 fois le ruissellement (K de 30 à 2%).

De cette notion de recouvrement se dégage la notion de structure du couvert végétal: certaines plantes, même au maximum de leur développement, protègent mal le sol et s'opposent peu au ruissellement en nappe, c'est le cas du coton, du maïs, de l'ananas et également des touffes de Panicum qui interceptent les pluies mais concentrent son écoulement en rigole. A l'opposé, Stylosanthes et Cynodon couvrent remarquablement le sol et évitent toute hiérarchisation du ruissellement.

En ce qui concerne le travail du sol, on peut reprendre, en partie les indications qui ont été évoquées concernant les caractéristiques pluviométriques et plus précisément la formation de la pellicule peu perméable à la surface du sol. En effet dans le cas d'un labour on observe généralement une annulation ou, au moins, une forte réduction du ruissellement grâce à l'ouverture de macroporosités débouchant en surface, et à la rugosité du sol. Cet effet bénéfique est malheureusement de courte durée, 1 mois semble être un ordre de grandeur au delà duquel ruissellement et érosion peuvent rejoindre et même dépasser ceux d'une parcelle témoin voisine non travaillée. Là encore, les variations du ruissellement dépendent d'autres facteurs dont l'influence peut être d'ailleurs dérivée du labour si ce labour permet une installation rapide d'une plante de couverture à enracinement dense, l'action sera bénéfique et, dans le bilan, au bout de 2 à 3 ans, il semble que ce soit le cas. Cette action est également positive lorsqu'un labour suffisamment profond enrichit raisonnablement le profil cultural en éléments grossiers (10 à 15% de nodules ferrugineux sans labour passant à 20, 30% après labour), ceci a été observé dans la région de Bouaké où l'on a constaté des augmentations nettes de l'infiltration.

On se rend compte que toutes les études précédentes sont tributaires des pluies naturelles et de dispositifs expérimentaux fixes. Ceci explique la nécessité de multiplier les années d'observation, et malgré cela, le nombre de situations testées reste peu élevé et il est pratiquement impossible de pouvoir se livrer à une analyse détaillée des processus d'érosion et de ruissellement en collectant les données de pluies unitaires car leurs intensités varient.

C'est pour pouvoir maîtriser un plus grand nombre de paramètres qu'ont été construits à l'ORSTOM deux modèles de « simulateur de pluies ». Ces deux appareils peuvent se déplacer sur différentes catégories de sols, possédant des couverts végétaux ou des passés culturaux variés. Ils rendent possible le choix des intensités des averses, de leur durée, des intervalles de temps séparant deux averses consécutives et par conséquent les états d'humectation du sol.

Un grand simulateur permet d'effectuer des mesures de ruissellement et d'érosion sur deux parcelles de 50 m².

Un petit simulateur de pluies qu'il est plus juste de dénommer « Infiltromètre à aspersion » permet de traiter 1 m² de sol et fournit des données permettant d'analyser le ruissellement et par conséquent les intensités d'infiltration dans différents types de sols.

Cet infiltromètre à aspersion comporte un gicleur unique situé à 3,5 m du sol, animé d'un mouvement de balancier entretenu mécaniquement; l'angle des oscillations peut être augmenté ou diminué à loisir ce qui permet ainsi de faire varier la superficie arrosée sans modification du débit du gicleur: il en résulte sur le mètre carré traité toute une gamme de pluies simulées de 15 à 140 mm/h. Cet appareil consomme 400 l d'eau/h pour une pression au niveau du gicleur de 300 à 350 g/cm².

Par rapport aux infiltromètres classiques (Muntz par exemple), pour lesquels les intensités d'infiltration sont mesurées sous une lame d'eau de hauteur constante, on peut dire que l'infiltromètre à aspersion respecte beaucoup mieux les conditions naturelles, en effet:

— lors d'un apport brutal d'une lame d'eau les dégazages ou emprisonnements d'air sont totalement différents de ce qui se produit sous une averse,

— le choc des gouttes modifie l'état structural du sol, ce que nous avons évoqué précédemment, et amène la formation d'une pellicule de battance de faible perméabilité; ceci ne peut pas se produire sous un apport brutal d'une charge d'eau à hauteur constante,

— enfin, la surface testée est 100 fois plus importante ce qui permet de tenir compte d'un plus grand nombre d'hétérogénéités structurales du sol (fissures, passage de racines etc...).

A titre d'information nous présentons dans ce tableau une comparaison des intensités d'infiltration Fn (mm/h) pour deux tests d'infiltration sur le même type de sol et pour deux traitements:

	Végétation naturelle	Labour
Fn au Muntz :	200	450
Fn au Simulateur :	90	20

Qu'il s'agisse du grand simulateur de pluies ou de l'infiltromètre à aspersion, on commence à disposer de suffisamment de données pour aborder l'analyse détaillée des phénomènes de ruissellement (et d'érosion).

En se limitant aux phénomènes observables concernant le ruissellement, le dépouillement des enregistrements limnigraphiques permet de dresser des hydrogrammes qui sont les enregistrements des intensités de ruissellement et d'infiltration en fonction du temps et dans lesquels, si l'averse a été suffisamment longue, il est possible de distinguer 4 portions de courbe correspondant à des phases bien individualisées du processus.

(cf. représentation graphique de la figure 1)

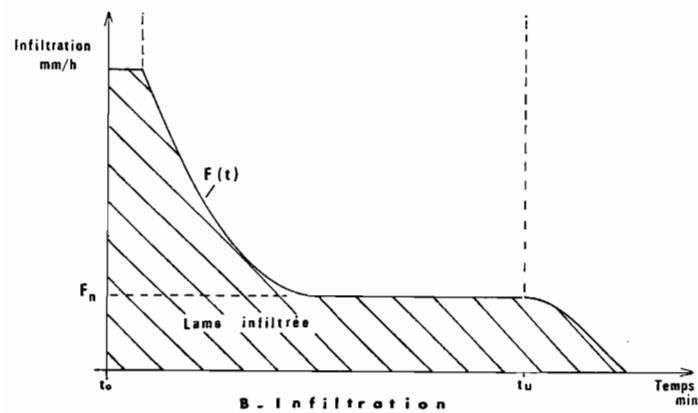
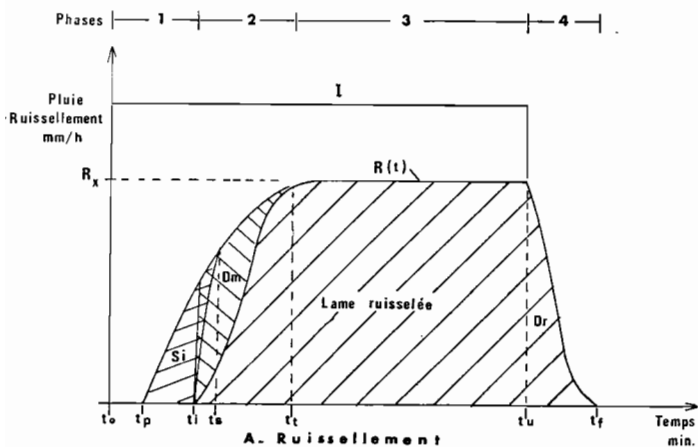


fig : 1

RUISSALLEMENT ET INFILTRATION SOUS INTENSITE D'AVERSER CONSTATE

— de t_0 à t_i : il s'agit de la phase d'imbibition pendant laquelle on n'observe aucun ruissellement, l'infiltration est totale de t_0 à t_p puis à partir de cet instant localement l'intensité d'infiltration devient inférieure à l'intensité de la pluie et des flaques d'eau apparaissent : il s'agit de la hauteur S_i en mm qui est stockée avant l'apparition du ruissellement.

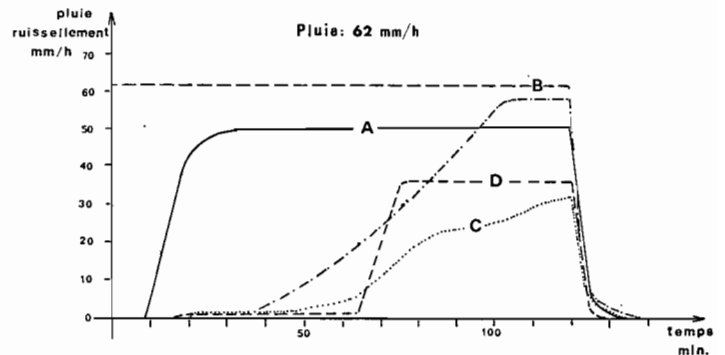
— entre t_i et t_t , le ruissellement se déclenche et son intensité augmente progressivement, c'est la phase transitoire, qui correspond à cette portion de courbe en « S », pendant ce laps de temps :

- l'intensité d'infiltration diminue,
- la détention superficielle mobilisable par le ruissellement augmente (D_m),
- les flaques d'eau incomplètement remplies au début des ruissellements locaux se remplissent complètement jusqu'au temps T_s .

— à partir de t_t s'établit un régime permanent du ruissellement dont l'intensité atteint un palier R_x , ce qui correspond à une intensité minimum de l'infiltration F_n ; pendant cette phase la totalité de la parcelle participe au ruissellement.

— dès la fin de la pluie, au temps t_u , le ruissellement diminue et s'annule au temps t_f , il s'agit de la phase de vidange des réserves superficielles mobilisables par le ruissellement et, bien entendu, comme dans les phases précédentes il y a à chaque instant partage entre ruissellement et infiltration.

L'hydrogramme qui vient de vous être détaillé est un orthotype et, sans pour le moment analyser le processus de ruissellement pour chacune des phases, voyons quelques exemples de variantes d'hydrogramme observées par exemple, en fonction de différents traitements culturaux. Voici 4 hydrogrammes correspondant tous au résultat d'une pluie de 62 mm/h pendant deux heures sur les parcelles suivantes : (cf. figure n° 2)



	Coeff. Ruiss. %	Ruiss. max mm/h	Infiltration mm
A	71	50	36
B	33,5	58	82
C	16	29	104
D	22	36	97

EVOLUTION DU RUISSALLEMENT POUR DIFFERENTS TRAITEMENTS

— A : sol dans son état naturel, non travaillé et presque entièrement dépourvu de couvert végétal au moment de l'essai

— B : sol nu, labouré

— C : sol labouré, paillé

— D : sol nu, billonné, cloisonné

— l'apparition du premier ruissellement est rapide pour A (7 mn) et extrêmement différé pour B et C (35 et 45 mn) ainsi que D (plus de 1 heure); cela tient au temps de remplissage des porosités créées par le labour pour B et C et également au remplissage des cuvettes ménagées entre les buttes pour D,

— l'apparition du régime permanent du ruissellement est rapide pour A, pour laquelle on remarque une phase transitoire courte alors que l'on constate que ce ruissellement généralisé apparaît plus progressivement pour B (ce qui correspond au temps de destruction des mottes de labour) et C (désagrégation encore plus lente des mottes protégées par le mulch); la montée tardive et néanmoins brutale de l'hydrogramme de la parcelle D correspond à une rupture en chaîne des cloisons séparant les buttes et aux débordements des cuvettes (les premiers écoulements de faible intensité entre 15 et 65 mm correspondent au seul ruissellement des secteurs de parcelle situés au voisinage du canal de ruissellement).

— les coefficients de ruissellement globaux sont très élevés pour A (71%), ce qui correspond à une lame infiltrée très faible de 36 mm; dans les trois autres cas, ces lames d'eau infiltrées sont entre 2 et 3 fois plus importantes; enfin, il faut remarquer que lorsque s'instaure le régime permanent des écoulements (palier R_x des différents hydrogrammes), les intensités d'infiltration restent plus importantes dans le cas des parcelles labourées paillées (C) et billonnées cloisonnées (D).

Nous n'avons fait jusqu'à présent que comparer des hydrogrammes de parcelles différemment traitées recevant une pluie d'intensité constante. L'analyse détaillée du ruissellement et de l'infiltration passe par la comparaison de tous les cas rencontrés, notamment en ce qui concerne :

- les intensités et les durées des précipitations,
- les états d'humectation initiaux,
- les pentes,
- les couverts végétaux,
- les traitements du sol...

il n'est pas question ici de passer toutes ces situations en revue, nous ne signalerons que les principales relations qui ont pu être mises en évidence grâce aux essais sous ces pluies simulées (cf. figure 3 et 4).

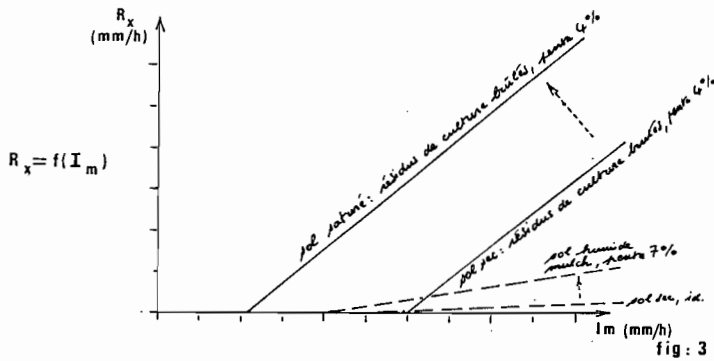


fig : 3

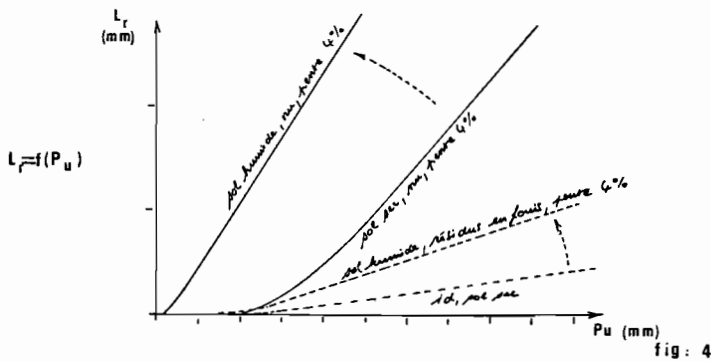


fig : 4

EXEMPLES DE RELATIONS LIANT LE RUISSellement AUX CONDITIONS DU MILIEU

— une première relation est celle qui relie l'intensité maximum du ruissellement (R_x mm/h) et l'intensité moyenne de la pluie (1 mm/h) : l'intensité maximum du ruissellement est une fonction linéaire de l'intensité moyenne de la pluie; pour une situation donnée (un type de sol, une pente, un type de couvert végétal) il est en effet possible de tracer deux droites correspondant l'une au sol initialement sec, l'autre au sol saturé; ces deux droites enveloppent tout un faisceau de droites de pente identique et définies pour des conditions d'humectation intermédiaires du sol; remarquons que les pentes de ces droites varient en fonction de la pente topographique et du type de traitement du sol.

— une deuxième relation importante existe entre la hauteur de la lame d'eau ruissellée (L_r mm) et la hauteur totale de la précipitation utile (P_u mm); cette relation, d'abord curvilinéaire pendant la phase transitoire des écoulements devient plus ou moins rapidement linéaire lorsque s'instaure le régime permanent des écoulements. Là encore, on observe un faisceau de courbes en fonction de l'état d'humectation du sol.

CONCLUSIONS

Nous n'avons vu ici que deux relations concernant une des phases du ruissellement; les autres phases donnent également lieu à ce genre d'analyse, évidemment l'on a intérêt à multiplier les situations pour pouvoir disposer du maximum de renseignements; ce travail est en cours actuellement tant à l'aide du grand simulateur de pluies qu'avec l'infiltromètre à aspersion. Retenons que le facteur le plus susceptible d'influencer le ruissellement est d'abord le couvert végétal, vient ensuite l'intensité de la pluie puis les caractéristiques du sol.

QUESTIONS - RÉPONSES

M. BAUDET

Avez vous la possibilité d'apprécier la quantité d'eau évaporée immédiatement quand une pluie tombe (10 mm/h) à 15 h sur un sol chaud ?

M. COLLINET

Ce sont des phénomènes instantanés et dès lors, avec nos méthodes, difficiles à mettre en évidence.

M. BAH

Je voudrais savoir si la nature du sol intervient dans les conditions de ruissellement ?

M. COLLINET

Oui, mais bien après la végétation existante sur le sol et après l'intensité de la pluie.

RÉPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS, DES TRANSPORTS
DE LA CONSTRUCTION ET DE L'URBANISME

ANNALES DU SERVICE MÉTÉOROLOGIQUE

COMPTE RENDU DES TRAVAUX
DES
SIXIÈMES JOURNÉES NATIONALES
DE CLIMATOLOGIE
BOUAKÉ
(27-28 AVRIL 1978)

ASECNA
SERVICE MÉTÉOROLOGIQUE

ABIDJAN - 1979

**Publications du Service Météorologique
de Côte d'Ivoire**

Dans la série **Monographies**
1 - Le climat de la Côte d'Ivoire,
Abidjan 1979

Edité par le Service Météorologique
ASECNA 01 BP 1365 Abidjan 01
Les articles sont publiés sous la
responsabilité des auteurs