

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE D'INTER-ETATS
CENTRE D'ABIDJAN

B.P. 151 ABIDJAN (CÔTE D'IVOIRE)

Laboratoire d'Hydrologie

INFILTRATION ET RUISSELLEMENT SUR PARCELLES : SIMULATION DE PLUIE

Quelques résultats obtenus sur les bassins versants représentatifs
de la Mare d'Oursi (Haute-Volta)

Pierre CHEVALLIER

Chargé de Recherches à l'ORSTOM

Intervention à la session de formation sur la conservation
des sols et des eaux au sud du Sahara - Ecole Inter-Etats
d'Ingénieurs de l'Équipement Rural de Ouagadougou (Haute-Volta).

20 mai - 12 juin 1983

Copyright ORSTOM, mai 1983

SOMMAIRE

INTRODUCTION	2
1. LES SIMULATEURS DE PLUIE	4
1.1. Le simulateur de pluie de type SWANSON	4
1.2. Le minisimulateur ou infiltromètre à aspersion	6
2. LES PARAMETRES MESURES	8
2.1. Ruissellement et infiltration sous intensité d'averse constante	8
2.1.1. La phase d'imbibition	8
2.1.2. Le régime transitoire	8
2.1.3. Le régime permanent	10
2.1.4. La phase de vidange	10
2.2. Exemple	10
2.3. La mesure de l'humidité du sol	11
3. QUELQUES RESULTATS CONCERNANT L'INFILTRATION	14
3.1. Effet de l'intensité de pluie et de l'hétérogénéité de surface du sol sur l'infiltration à régime constant	14
3.2. Pluie d'imbibition	15
3.3. Classification des sols suivant leur aptitude au ruissellemebt	17
CONCLUSION	18
BIBLIOGRAPHIE	19

INTRODUCTION

Les pédologues et les hydrologues depuis quelques années ne peuvent plus se contenter des méthodes classiques de mesure de l'infiltration de l'eau dans le sol. Ces méthodes appliquées en général à des surfaces très petites sont presque toujours des techniques de percolation forcée, le sol se trouvant en contact avec une certaine charge d'eau de lame variable ou constante qui ne permet pas ou limite les échanges gazeux. HILLEL (8) et MOREL-SEYTOUX (10) ont insisté ces dernières années sur l'importance de la circulation d'air dans les phénomènes d'infiltration. Il faut ajouter que dans les conditions de précipitation naturelle l'impact des gouttes d'eau sur le sol peut modifier l'arrangement des constituants et influencer de façon importante le comportement hydrodynamique. L'érosion apparaît alors comme un phénomène très étroitement lié avec l'infiltration et le ruissellement.

C'est la raison pour laquelle pédologues et hydrologues de l'ORSTOM se sont tournés depuis 1975 vers l'utilisation de simulateurs de pluie qui permettent en contrôlant les divers paramètres de la pluie et du sol de tester le comportement de parcelles caractéristiques.

Des mesures comparatives ont été réalisées par COLLINET et LAFFORGUE (3) avec le simulateur de pluie de type SWANSON et l'infiltromètre de MÜNTZ modifié par COLOMBANI, LAMAGAT et THIEBAUX (7). Ils observent :

1. Les valeurs de perméabilité sous charge constante (MÜNTZ) sont plus fortes en moyenne que celles observées sous pluie simulées.

2. Les valeurs MÜNTZ sont extrêmement dispersées, alors qu'elles sont très comparables d'une parcelle de simulateur à l'autre.

3. Les valeurs obtenues au MÜNTZ ne peuvent pas servir à une classification des sols selon leur perméabilité réelle sous averse.

Ces techniques de simulation de pluie paraissent donc beaucoup plus satisfaisantes pour observer le comportement des constituants à l'interface eau-sol-atmosphère.

Diverses campagnes ont été effectuées depuis 1975 avec deux appareils différents, le simulateur de pluie de type SWANSON et un infiltromètre à aspersion ou minisimulateur mis au point par l'ORSTOM. Une très grande variété de sols cultivés ou non ont été testés depuis la Basse Côte d'Ivoire ou la forêt du Sud Cameroun jusqu'à la région présaharienne de la Cuvette d'Agadez (Niger). Nous présenterons ici quelques résultats obtenus à l'aide des deux appareils sur les bassins versants de la Mare d'Oursi dans la zone sahélienne du Nord de la Haute-Volta.

1. LES SIMULATEURS DE PLUIE

Il existe plusieurs types de simulateurs de dimensions et de performances variées. En règle générale ces appareils reproduisent une pluie par aspersion de gouttes d'eau depuis une certaine hauteur au dessus du sol sur une parcelle préalablement délimitée. Le simulateur est alimenté par pompage à partir d'une réserve d'eau. L'eau est dispersée par l'intermédiaire de buses ou de gicleurs (sprincklers) fixes ou mobiles.

Tous les simulateurs de pluie produisent des séquences d'averses d'intensité constante et prédéterminée, alors que l'intensité des pluies naturelles est hétérogène dans l'espace et dans le temps. Les averses simulées reproduisent par contre avec la meilleure fidélité possible la dimension des gouttes de pluie et leur énergie cinétique lors de l'impact avec le sol.

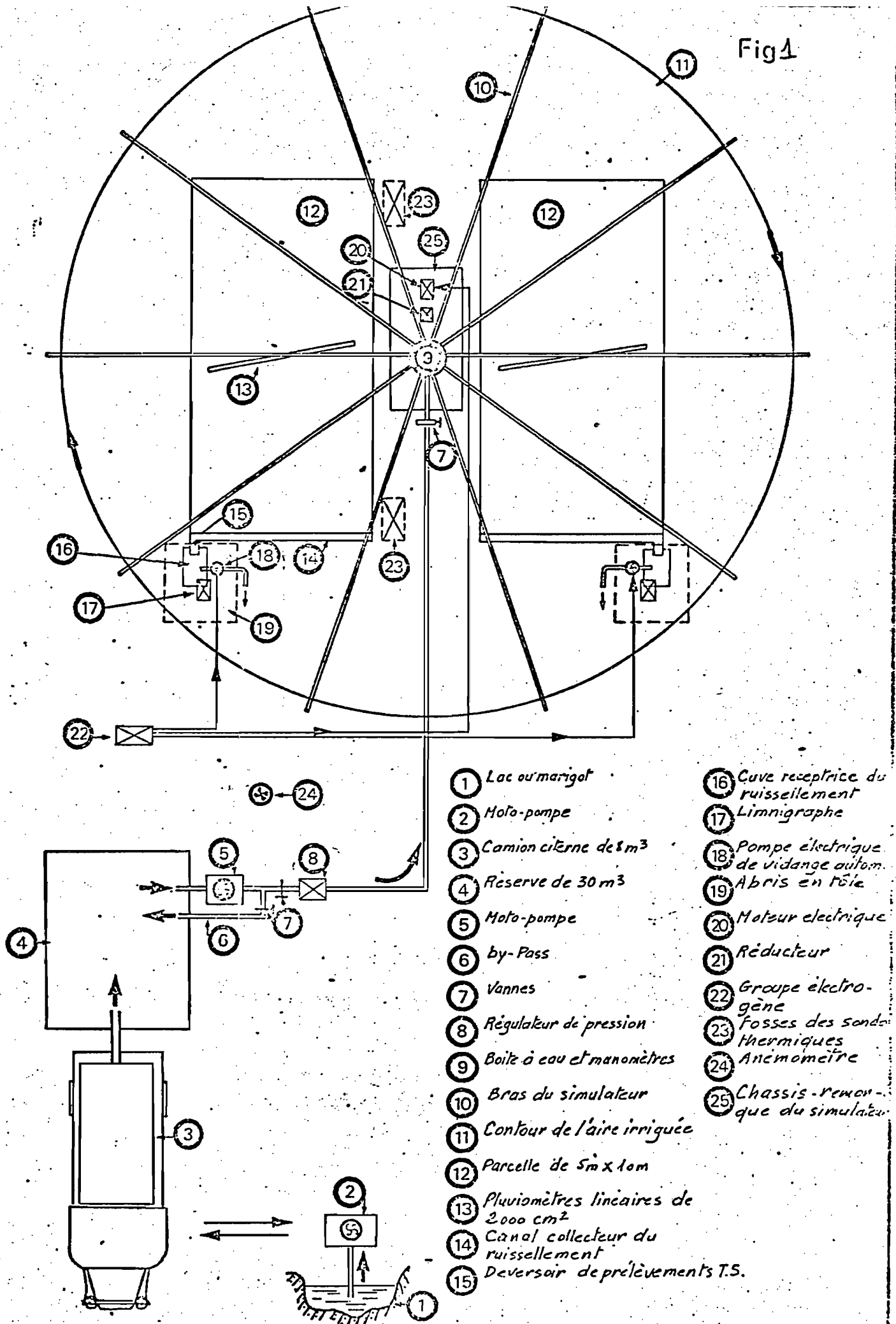
L'ORSTOM utilise actuellement deux appareils assez différents : le simulateur SWANSON et le minisimulateur.

1.1. Le simulateur de pluie de type SWANSON

La figure n°1 présente son schéma général de fonctionnement.

Il s'agit d'un appareil dérivé du "rotating boom simulator" de SWANSON (1965). Il est muni de 10 bras horizontaux sur lesquels sont fixés les gicleurs et tourne autour de son axe à une vitesse constante. Le réglage de la pression de l'eau à chacun des gicleurs et leur orientation permettent de réaliser 4 intensités d'arrosage constantes de 30, 60, 90 et 120 mm/h.

Le simulateur arrose une surface circulaire de 200 m² à l'intérieure de laquelle on délimite deux parcelles de 50 m² (5 X 10 m).



SCHEMA DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

La hauteur des averses et leur intensité sont contrôlées par un pluviographe. Le ruissellement est enregistré en continu par des limnigraphes placés dans des cuves qui recueillent à l'aval des parcelles les volumes écoulés.

1.2. Le minisimulateur ou infiltromètre à aspersion

Le schéma général de fonctionnement de cet appareil inventé par des pédologues et des hydrologues de l'ORSTOM est exposé en figure n° 2.

L'originalité de l'infiltromètre à aspersion réside dans la possibilité de régler les intensités de pluie de façon continue entre 30 et 150 mm/h sans qu'il soit nécessaire d'interrompre l'averse.

Un bâti de forme troncpyramidale supporte à une hauteur de 4 m le système d'aspersion. Le gicleur est un sprincler qui arrose suivant un plan parallèle à la ligne de plus grande pente. Il est monté sur un bras oscillant et le faisceau de pluie balaye une surface sur laquelle est implantée la parcelle de 1 m². Le réglage de l'intensité de pluie se fait par modification de l'angle d'oscillation du bras de gicleur, ce qui fait varier à débit constant la surface arrosée et le volume reçu par la parcelle de 1 m².

Les eaux de ruissellement sont recueillies de la même façon qu'avec le "grand" simulateur dans une cuve où est placé un limnigraphe qui enregistre en continu les intensités de ruissellement.

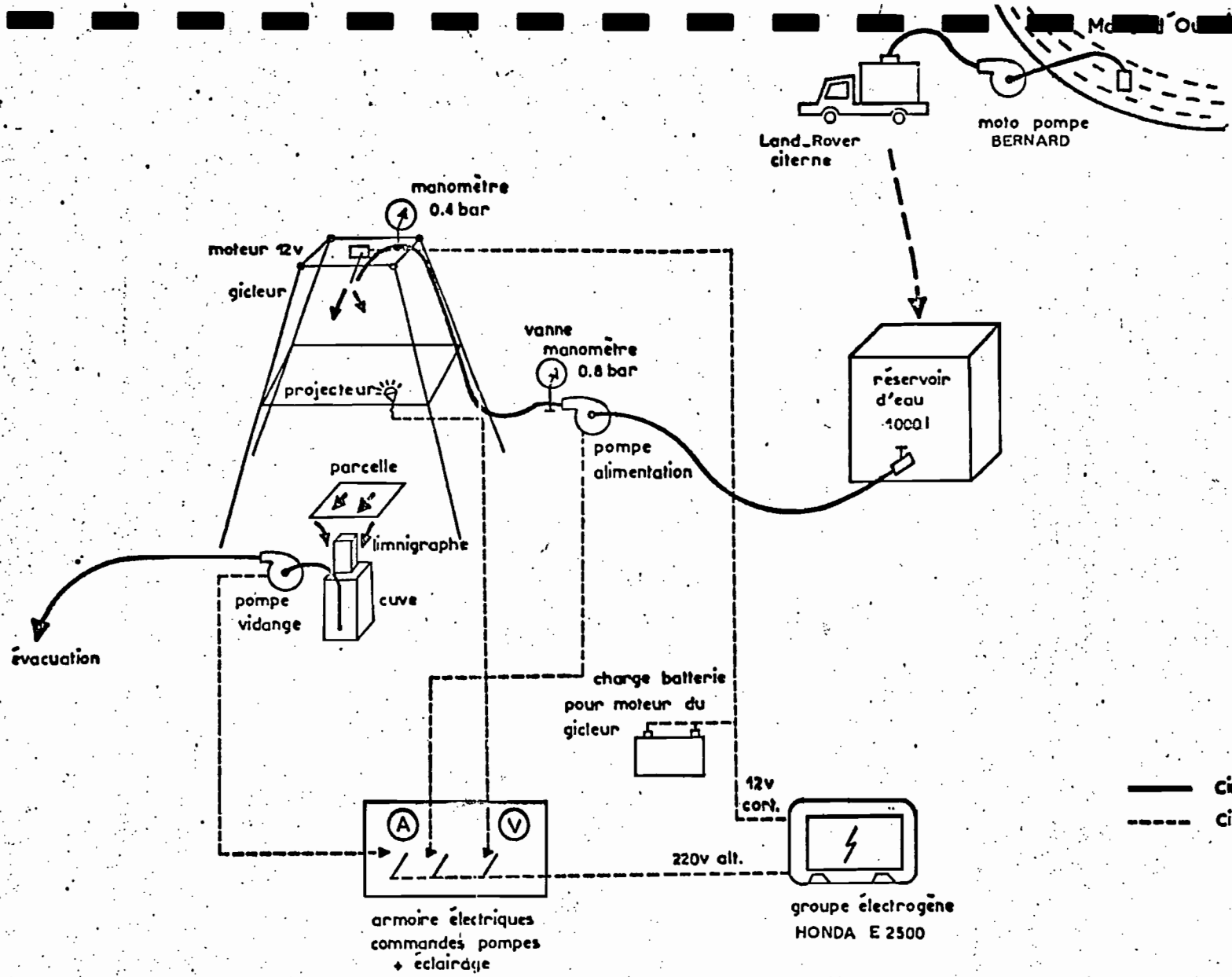


Fig. 2. - SCHEMA DE FONCTIONNEMENT DE L'INFILTROMETRE A ASPERSION
(VERSION OUAGADOUGOU_1980)

2. LES PARAMETRES MESURES

2.1. Ruissellement et infiltration sous intensité d'averse constante

Les simulateurs de pluie produisent des averses ou des successions de séquences d'averse à intensité constante.

Lors d'une averse à intensité constante pendant un temps t_u , le volume d'eau précipité peut :

1. ruisseler,
2. s'infiltrer,
3. se stocker en surface.

La figure 3 présente l'hydrogramme de ruissellement type que l'on observe ; par différence on en déduit l'hydrogramme d'infiltration, les stockages étant pris en compte et représentés en grisé. On distingue quatre phases bien individualisées : une phase d'imbibition, un régime transitoire, un régime permanent et une phase de vidange.

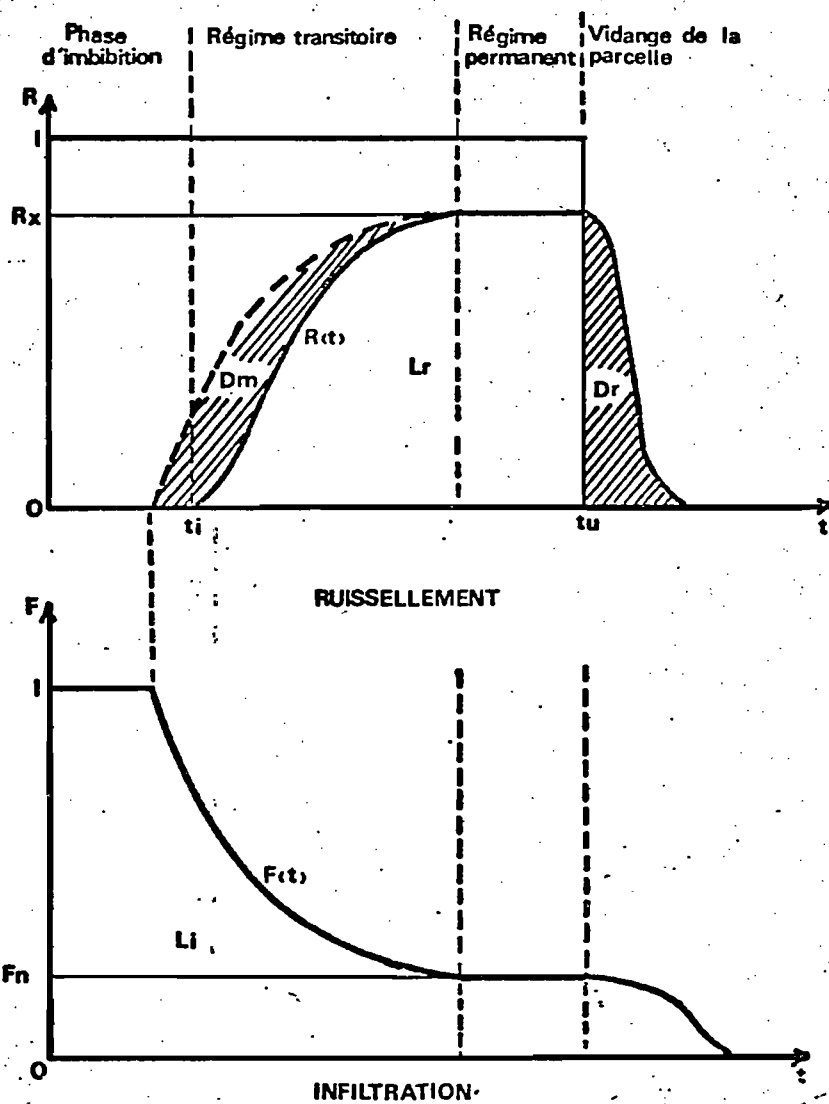
2.1.1. La phase d'imbibition

Du début de l'averse à un temps t_i , on n'observe aucun ruissellement sur la parcelle. L'intensité d'infiltration est supérieure à l'intensité de la pluie et la totalité de l'averse est absorbée (si l'on néglige l'interception de l'eau par la végétation). Au bout d'un certain temps de petites flaques se forment dans les microdépressions et un petit stockage de surface se constitue. L'intensité d'infiltration commence à être inférieure à l'intensité de pluie.

2.1.2. Le régime transitoire

A l'instant t_i , les flaques débordent et la parcelle commence à ruisseler. L'intensité du ruissellement croît régulièrement et la courbe de l'hydrogramme prend une forme en S.

Fig. n° 3



(d'après A. LAFFORGUE)

RUISSELLEMENT ET INFILTRATION
SOUS INTENSITE D' AVERSE CONSTANTE

La hauteur moyenne de la lame d'eau en mouvement à la surface de la parcelle croît également : c'est la détention superficielle mobilisable D_m . En contre-partie l'infiltration diminue de façon continue.

2.1.3. Le régime permanent

A partir d'un temps t_m , un régime permanent s'établit et l'infiltration atteint un minimum F_n . Un palier de ruissellement s'établit à la valeur maximale R_x . Ce régime permanent se poursuit jusqu'à l'arrêt de l'averse. On a bien évidemment :

$$R_x = I - F_n$$

2.1.4. La phase de vidange

Après l'arrêt de l'averse à l'instant t_u , le ruissellement se poursuit en décroissant progressivement et s'annule au temps t_f . Ce sont les réserves mobilisable D_m qui se vidangent. Elles se partagent à chaque instant entre le ruissellement et l'infiltration. La partie ruisselée D_r est la détention superficielle récupérable.

2.2. Exemple

La figure 4 présente les hydrogrammes de la sixième averse réalisée sur le couple de parcelles S du site A d'Oursi avec le simulateur SWANSON. Le sol est celui d'un piémont sableux formé à partir de dépôts éoliens anciens.

La parcelle 1 est dans son état naturel et la parcelle 2 a subi avant la première averse un labour sur 8 à 10 cm et un planage au rateau (préparation standard selon les normes de WISCHMEIER) qui ont pour effet de favoriser l'érosion et la formation de pellicules de battance.

L'averse a duré 30 minutes avec une intensité de 62,2 mm/h, soit une hauteur totale de 31,1 mm. Les principaux paramètres prennent les valeurs suivantes :

	Pi mm	Rx mm/h	F _n mm/h	Dr mm	Lr mm	Li mm
Parcelle 1	5.6	26.5	35.7	1.3	10.2	20.9
Parcelle 2	1.2	48.0	14.2	0.5	21.0	10.1

On remarque que l'infiltration se fait mieux sur la parcelle 1 que sur la parcelle 2. En effet au bout de six averses, le labour de WISCHMEIER s'est effondré et sous l'action des gouttes de pluie une croûte superficielle s'est formée limitant l'infiltration (battance).

La figure montre également en pointillés les turbidigrammes observés par prélèvement d'eau et décantation. La charge solide est plus importante sur la parcelle labourée et représente ramenée à une superficie d'un hectare une érosion totale de 2400 kg contre 35 kg pour la parcelle restée à l'état naturel.

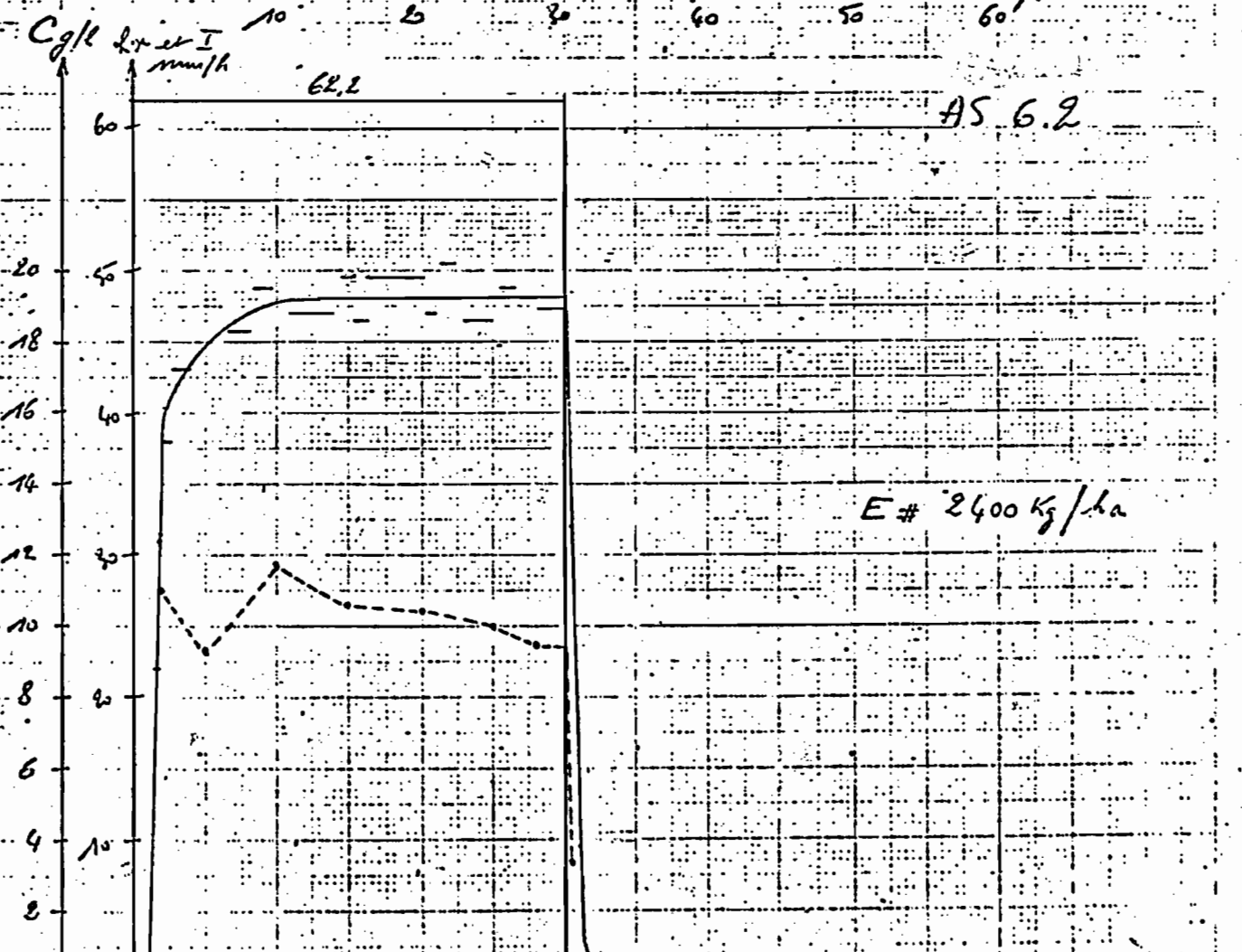
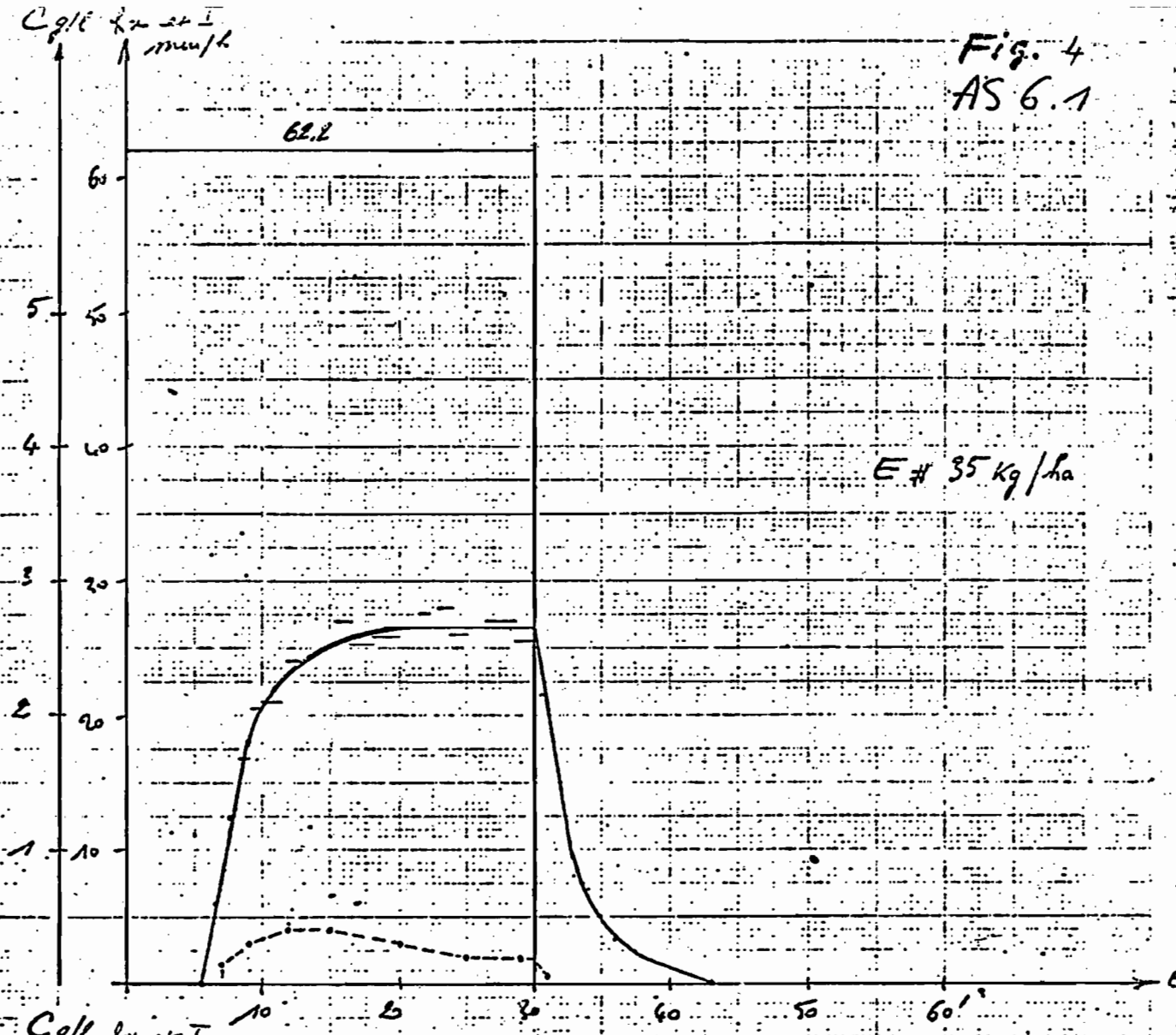
Notre propos n'est pas de parler d'érosion ici, mais sur cet exemple de donner un aperçu des résultats que l'on peut obtenir à partir d'une averse à intensité constante.

2.3. La mesure de l'humidité du sol

Les conditions d'infiltration sont étroitement liées à l'état d'humectation préalable du sol. Il existe plusieurs méthodes pour évaluer cette grandeur, soit par mesure directe, soit par l'intermédiaire d'un autre paramètre :

- Mesure d'humidité par pesée et séchage d'échantillons prélevés de sol ; avantage : méthode assez précise ; inconvénient : destruction du sol et grande quantité de matériaux à manipuler.

Fig. 4
AS 6.1



-Utilisation d'une sonde neutronique (SICOT (A2)); avantage : non destructif, rapide, donne le profil hydrique complet ; inconvénient : la sphère d'influence du point de mesure est grande, pas de mesure possible entre la surface et 15 cm de profondeur.

- Utilisation d'un humidimètre à chocs thermiques (POUYAUD, CHEVALLIER, VALENTIN (A1)); avantage : très petite sphère d'influence, utilisable très près de la surface ; inconvénient : extrêmement fragile, inutilisable en milieu gravillonnaire, très délicat à manipuler.

- Mesure des temps qui séparent chaque averse ; avantage : pas besoin de matériel sophistiqué ; inconvénient : la méthode ignore totalement le stock hydrique.

Pour éviter certains de ces inconvénients, les hydrologues de l'ORSTOM utilisent souvent un indice d'humidité, IK (API, "Antecedant Precipitation Index", pour les Américains) qui n'a pas vraiment de signification physique, mais qui donne de bons résultats. Il se calcule :

$$IK_n = (IK_{n-1} - P_{n-1}) e^{-\alpha\theta}$$

où IK_n indice d'humectation immédiatement avant l'averse n ,
 P_{n-1} hauteur de l'averse de rang $n-1$,
 θ temps séparant la fin de la pluie $n-1$ du début de la pluie n ,
 α constante de calage.

On a $IK = 0$ pour la première pluie après une saison sèche assez longue (supérieure à deux mois, si possible).

3. QUELQUES RESULTATS CONCERNANT L'INFILTRATION

3.1. Effet de l'intensité de pluie et de l'hétérogénéité de surface du sol sur l'infiltration à régime constant

COLLINET et VALENTIN (5) ont vérifié sur les sols de la Mare d'Oursi et sur ceux de Galmi (Niger) la validité d'un modèle théorique d'infiltration à l'aide des techniques de simulation de pluie.

Ils ont observé que pour une surface homogène (croute de battance, par exemple), l'infiltration à régime constant est indépendante de l'intensité de la pluie, mais est surtout liée aux conditions initiales d'humectation. Dans le cas d'une surface hétérogène (champ cultivé, par exemple), la capacité d'infiltration est une fonction croissante de l'intensité de la pluie.

Ces résultats théoriques confirment le modèle théorique proposé par LAFFORGUE (9).

D'une façon beaucoup plus générale, toutes les campagnes de simulation de pluie réalisées depuis 1975 ont montré que ce sont les tout premiers centimètres de la surface du sol qui influencent le plus les conditions d'infiltration et de ruissellement. Une nouvelle branche de la pédologie a même été proposée : la "surfaçologie".

Les hydrologues utilisent maintenant pour l'analyse des facteurs du ruissellement sur petits bassins versants représentatifs des cartographies fines des différenciations morpho-structurales des états de surface (VALENTIN (13)) qui permettent d'évaluer l'aptitude au ruissellement par zones de comportement similaire.

3.2. Pluie d'imbibition

Certains résultats de mesure obtenus à l'infiltromètre ont été confrontés aux observations faites sur des averses naturelles, en particulier sur les bassins de Jalafanka (0,809 km²) et de Polaka (9,14 km²) (CHEVALLIER (2)).

Un des paramètres mesurés au simulateur peut être un indicateur du déclenchement possible ou non du ruissellement : la pluie d'imbibition. En effet par définition pour une hauteur de pluie inférieure à la pluie d'imbibition, il n'y aura pas de ruissellement.

On montre que sur une même parcelle d'expérimentation la pluie d'imbibition est directement liée par une relation d'allure hyperbolique (figure n°5) à l'indice d'humectation du sol IK.

Dans le cas du bassin de Jalafanka, la parcelle la plus significative a donné les résultats suivants :

IK	0	5	10	15	20	25	30
Pi mm	6.2	5.1	4.4	3.8	3.5	3.0	2.6

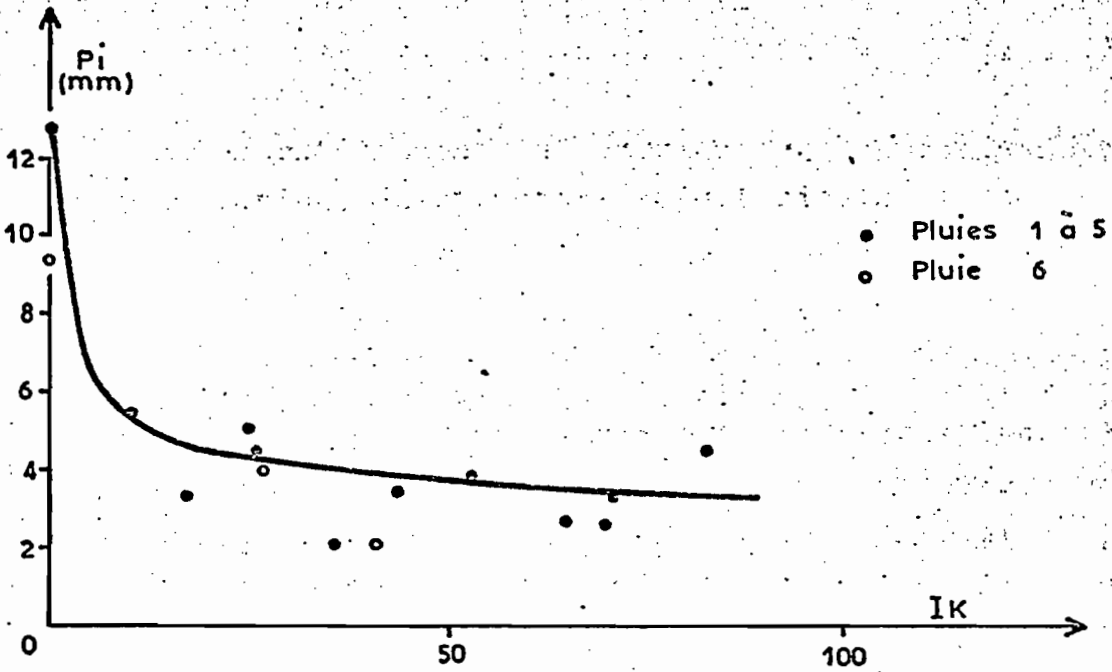
Chacune des pluies naturelles de l'année 1980 a été comparée à la valeur de la pluie d'imbibition mesurée sur la parcelle pour l'indice d'humidité correspondant. Si la valeur de la pluie naturelle est inférieure à la pluie d'imbibition, le bassin ne doit pas ruisseler. Dans le cas contraire il doit y avoir ruissellement.

On s'aperçoit que pour l'année 1980 le principe n'est mis en défaut qu'une seule fois sur 33 cas. Des résultats semblables ont été obtenus sur le bassin de Polaka. Il est donc possible d'utiliser efficacement l'infiltromètre pour quantifier ce qu'il est convenu d'appeler traditionnellement la capacité d'absorption maximale et qui correspond à la pluie d'imbibition.

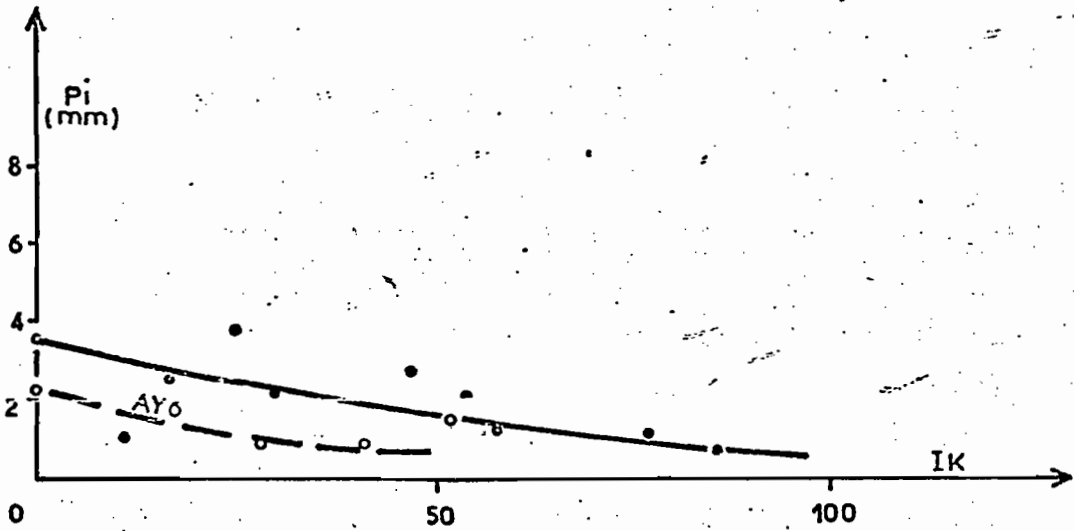
Fig. n° 5

PLUIE D'IMBIBITION - INDICE IK
Site A

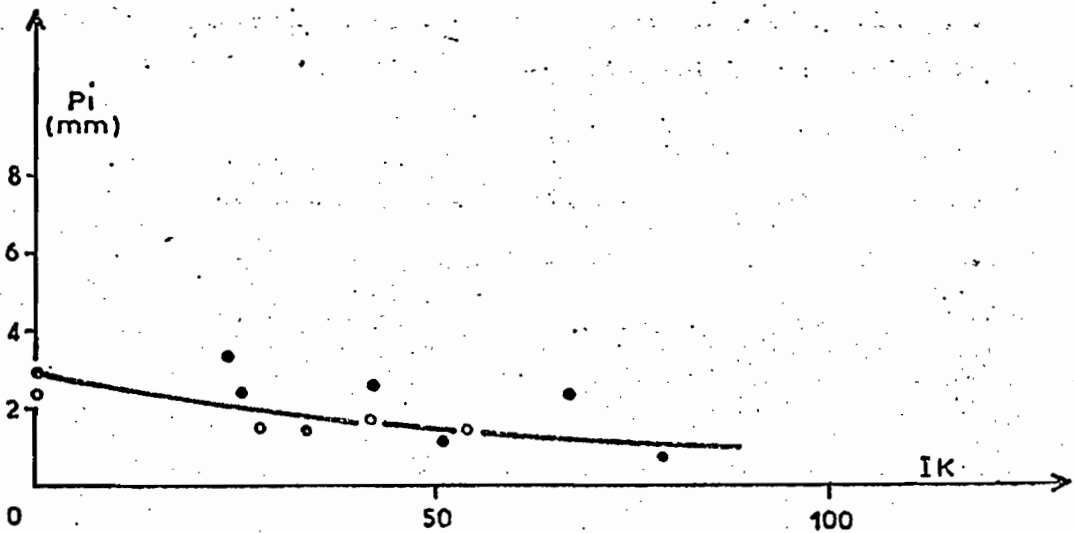
Parcelle
AX



Parcelle
AY



Parcelle
AZ



3.3. Classification des sols suivant leur aptitude au ruissellement

La relation essentielle du point de vue de l'hydrologue est celle qui lie la pluie utile à la lame ruisselée. Cette relation privilégiée est fonction de l'état de saturation du sol, caractérisé ici par l'indice IK.

CASENAVE (1) propose l'établissement de courbes caractéristiques pour chacune des parcelles donnant la lame ruisselée en fonction de la pluie utile et de l'indice IK. Ce réseau de courbes est obtenu soit graphiquement, soit par régression multiple.

Dans le cas des bassins versants d'Oursi nous proposons d'utiliser comme indicateur de l'aptitude au ruissellement la lame ruisselée correspondant à une pluie de 40 mm pour un indice IK de 10. Cela correspond à une pluie qui se produit au moins une fois par an pour un état d'humectation que l'on trouve en général en milieu de saison des pluies dans le contexte sahélien d'Oursi.

Il est possible alors de classer les parcelles de celle qui ruisselle le plus vers celle qui ruisselle le moins :

nom parcelle	Lr (mm) IK =10 Pu =40	Etat de surface
BY-BZ	36	sol nu, débris de cuirasse
CY	35	sol nu, épandage gravillonnaire
DY	34	sol nu, pellicule indurée
DZ	31	sol nu, pellicule indurée fracturée
AY	30	sol nu, sable grossier, pel. indurée
AZ	29	" " "
CZ	28	prép. standard, épandage gravillons
DX	24	végétation, pellicule indurée
AX	16	végétation, sables grossiers
BX	12	végétation, sables bouillants
CX	10	végétation, épandage sableux

CONCLUSION

Le problème fondamental qui se pose à l'issue de ces expériences est celui de la transposition au milieu naturel à toutes les échelles. De la parcelle de 1 m² au petit bassin versant de plusieurs dizaines d'hectares, il y a toute une gamme de phénomènes qui interviennent lorsque l'on franchit différents seuils d'échelle.

Déjà quand on passe des mesures sur 1 m² avec l'infiltromètre à aspersion aux mesures sur 50 m² avec le simulateur SWANSON on observe un changement d'échelle. Par exemple les mesures des transports solides faites à l'infiltromètre ne donne des indications que sur la détachabilité des éléments du sol sous l'action de l'énergie cinétique des gouttes, alors qu'avec le simulateur SWANSON s'introduit déjà la notion de longueur de pente et l'on peut réellement assimiler le transport solide à une érosion.

La complexité des systèmes et la difficulté du transfert d'information obtenue sur une petite parcelle expérimentale augmente avec la superficie de la zone naturelle étudiée et c'est là une des principales questions que tentent de résoudre actuellement les chercheurs en sciences de la terre.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) CASENAVE (A.) - 1982
Le minisimulateur de pluie. Conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures.
Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIX, n°4-1982
- (2) CHEVALLIER (P.) - 1982
Simulation de pluie sur deux bassins versants sahéliens (Mare d'Oursi, Haute-Volta).
Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIX, n°4-1982
- (3) COLLINET (J.), LAFFORGUE (A.) - 1979
Mesures de ruissellement et d'érosion sous pluies simulées pour quelques types de sols de Haute-Volta.
ORSTOM, multigr.
- (4) COLLINET (J.), VALENTIN (C.) - 1979
Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle.
ORSTOM, multigr.
- (5) COLLINET (J.), VALENTIN (C.) - 1980
Effet de l'intensité de pluie et de l'hétérogénéité de surface du sol sur l'infiltration à régime constant.
DGRST-ORSTOM, multigr.
- (6) COLLINET (J.), VALENTIN (C.), ASSELINE (J.), CHEVALLIER (P.), SICOT (M.) - 1980
Etude LAT/03. Ruissellement, infiltration et érosion en zones sahéliennes et subdésertiques. Rapport de terrain sur la première opération "Mare d'Oursi".
DGRST-ORSTOM, multigr.

- (7) COLOMBANI (J.), LAMAGAT (J.P.), THIEBAUX (J.) - 1972
Mesure de la perméabilité des sols en place : un nouvel
appareil pour la méthode MÜNTZ. Une extension de la
méthode PORCHET aux sols hétérogènes.
Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol IX, n°3-1972
- (8) HILLEL (D.)- 1974
L'eau et le sol. Principes et processus physiques.
Vander Ed.
- (9) LAFFORGUE (A.) - 1977
Inventaire et examen des processus élémentaires de
ruissellement et d'infiltration sur parcelles.
Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIV, n°4-1977
- (10) MOREL-SEYTOUX (M.J.) - 1973-1975
Pour une théorie modifiée de l'infiltration.
Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., n°2-1973, 3-1973, 1-1974,
3-1974 et 4-1975.
- (II) POUYAUD (B.), CHEVALLIER (P.), VALENTIN (C.) - 1980
Notice d'utilisation de l'humidimètre à chocs thermiques
construit par R. FRON.
ORSTOM, multigr.
- (12) SICOT (M.) - 1981
Analyse sommaire de la dynamique de l'eau dans les
sols sahéliens sous pluies simulées.
ORSTOM, multigr.
- (13) VALENTIN (C.) - 1981
Esquisse au 1/25 000 des différenciations morphostruc-
turales de la surface des sols d'un petit bassin
versant sahélien (Polaka -Oursi, Nord Haute-Volta)
ORSTOM, multigr.