

## Aptitude au ruissellement et à l'infiltration d'un sol sableux fin après sarclage

**J. M. LAMACHERE**

*Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération, ORSTOM, 01 BP 182, Ouagadougou, Burkina Faso*

**Résumé** Dans la province du Yatenga, en zone sahélienne, des simulations de pluies ont été effectuées, en 1988, aux différents stades de l'évolution d'un sol sableux fin après un sarclage butté sous culture de mil. Sur un sol sableux fin sarclé, le nombre de facteurs explicatifs du ruissellement et de l'infiltration peuvent être réduits à six: trois facteurs pluviométriques qui sont l'intensité de pluie, la durée de l'averse et la somme des pluies antérieures tombées depuis le dernier sarclage; trois facteurs pédologiques qui sont le différentiel de ruissellement, l'intensité de pluie limite du ruissellement et la capacité de stockage superficiel du sol. Les trois facteurs pédologiques évoluent après le sarclage en fonction de la somme des pluies tombées à la surface du sol depuis le sarclage. Dès que la somme des pluies tombées atteint la valeur de 100 mm, la transformation de la surface du sol sous l'action des gouttes de pluie et du ruissellement provoque une forte diminution de l'infiltration. Au-delà d'un cumul de 200 mm de pluies, le sarclage ne joue plus aucun rôle, tous les paramètres se conjuguant pour que le ruissellement atteigne un rendement maximal et que l'infiltration soit minimale. Une formulation mathématique et une explication physique sont proposées pour expliquer cette évolution.

### INTRODUCTION

Depuis 1985, un programme d'hydrologie appliquée à la valorisation des ressources en eau de ruissellement se développe au Burkina Faso dans la région de Bidi, province du Yatenga, en étroite collaboration avec un programme agronomique d'étude des systèmes agraires.

Avec une pluviométrie moyenne interannuelle de l'ordre de 430 mm ces dernières années, la région de Bidi connaît actuellement un climat franchement sahélien. Les paysans de la région fondent leur stratégie agricole sur la culture du mil qui reste, malgré les vicissitudes récentes, la culture de base en zone sahélienne.

Le mil est traditionnellement cultivé sur des sols sableux fins peu travaillés en début de saison, mais sarclés deux fois au cours de l'hivernage: une première fois à la fin du mois de juillet, une seconde

ORSTOM Fonds Documentaire

N° : 34.754 ex 1

Cote : B P 50 M

23 OCT. 1991

fois à la fin du mois d'août. Le sarclage pratiqué est un contre-buttagé. Les mottes, constituées de terre et de jeunes plantes adventices, sont retournées et entassées entre les poquets de mil qui se trouvent ainsi placés dans des cuvettes qui communiquent entre elles par de petits cois situés entre les buttes.

Les expériences, qui ont été développées en 1988 à l'aide du simulateur de pluies sur ces sols sableux cultivés, ont visé à mettre en évidence le rôle du sarclage sur le ruissellement et sur l'infiltration des eaux de pluie. Des expériences ont été menées en saison des pluies et en saison sèche aux différents stades de l'évolution d'un sol sarclé. Cet article présente les résultats de cette expérimentation.

**PROTOCOLES EXPERIMENTAUX**

La simulation de pluies a été effectuée sur des microparcelles de 1 m<sup>2</sup> avec un dispositif utilisé depuis une dizaine d'années par les pédologues et les hydrologues de l'ORSTOM (Casenave, 1982).

**Types d'averses**

Le protocole pluviométrique a été standardisé (Tableau 1) en utilisant deux types d'averses. Le premier type (type 1), avec une hauteur pluviométrique au sol de 61.7 mm, correspond à une averse dont la période de retour est de une fois tous les deux ans dans la région de Bidi. Le second type d'averse (type 2), avec une hauteur pluviométrique au sol de 96.7 mm, correspond à une averse dont la période de retour est de une fois tous les 10 ans dans la région de Bidi.

Les répartitions temporelles des intensités de pluie sont présentées sur les Tableaux 2, 3 et 4.

**Protocoles expérimentaux**

Les expériences ont été menées successivement en saison des pluies et en saison sèche. Les protocoles expérimentaux, consignés sur le Tableau 1, ne sont pas identiques à ceux qui ont été utilisés par Albergel (1987) au Burkina Faso. Ils restent cependant parfaitement utilisables pour les besoins de notre démonstration.

**RESULTATS**

Les notations utilisées sont les suivantes:

- t* temps,
- P* somme des hauteurs d'eau tombées depuis le début de l'averse,
- P<sub>i</sub>* intensité de pluie en mm h<sup>-1</sup>,

**Tableau 1** Protocoles expérimentaux

No. d'ordre averses	Dates début des averses	Type de pluie	Date de sarclage	Σ P <sub>A</sub> (mm)	Σ P <sub>P</sub> (mm)	IK (mm)
<i>Protocoles en saison des pluies</i>						
1	23/08/88	2	30/07/88	210	0	8.8
2	24/08/88	2	23/08/88	0	0	6.1
3	27/08/88	2	23/08/88	93	93	22.1
<i>Protocoles en saison sèche</i>						
1	29/10/88	2	27/08/88	80	0	0
2	31/10/88	1	27/08/88	187	107	39.4
3	01/11/88	1	27/08/88	252	172	81.3
4	03/11/88	1	27/08/88	314	234	52.6
5	04/11/88	2	27/08/88	375	295	89.0

Σ P<sub>A</sub> = somme des pluies antérieures depuis le sarclage

Σ P<sub>P</sub> = somme des pluies antérieures depuis le début du protocole

IK<sup>P</sup> = indice d'humectation du sol, indice de Kohler. L'indice de Kohler est exprimé par la relation suivante:

$$IK_n = (IK_{n-1} + P_{n-1}) e^{-0.5(t_n - t_{n-1})}$$

où (t<sub>n</sub> - t<sub>n-1</sub>) est l'intervalle de temps, exprimé en jours, qui sépare la pluie P<sub>n</sub> de la pluie antérieure P<sub>n-1</sub>

**Tableau 2** Résultats de la simulation de pluies pendant l'hivernage 1988

Durée min	t min	P <sub>i</sub> mm	Averse no. 1 (IK = 8.8)				Averse no. 2 (IK = 6.1)				Averse no. 3 (IK = 22.1)			
			P	R	R <sub>i</sub>	F <sub>i</sub>	R	R <sub>i</sub>	F <sub>i</sub>	R	R <sub>i</sub>	F <sub>i</sub>		
			mm	mm	mm h <sup>-1</sup>	mm h <sup>-1</sup>	mm	mm h <sup>-1</sup>	mm h <sup>-1</sup>	mm	mm h <sup>-1</sup>	mm h <sup>-1</sup>	mm h <sup>-1</sup>	mm h <sup>-1</sup>
0	15	30	0	0			0			0				
15	15	30	7.5	3.0			0			0				
30	10	135	15.0	8.2	20.8	9.2	0	50.4	84.6	1.8	8.4	21.6	48.6	48.6
40	10	120	37.5	26.5	109.8	25.2	5.6	48.0	72.0	16.2	86.4	48.6	48.6	48.6
50	10	90	57.5	43.2	100.2	19.8	13.6	48.0	72.0	29.2	78.0	42.0	42.0	42.0
60	10	70	72.5	54.8	69.6	20.4	19.2	33.6	56.4	39.6	62.4	27.6	27.6	27.6
70	10	70	84.2	64.6	58.8	11.2	22.5	19.2	50.8	47.4	46.8	23.2	23.2	23.2
85	15	50	96.7	74.0	37.6	12.4	23.9	5.4	44.6	55.1	30.8	19.2	19.2	19.2

R lame ruisselée depuis le début de l'averse,

R<sub>i</sub> intensité du ruissellement en mm h<sup>-1</sup>,

F lame infiltrée depuis le début de l'averse,

F<sub>i</sub> intensité d'infiltration en mm h<sup>-1</sup>.

Les résultats des expériences menées pendant l'hivernage 1988 sur les sols sableux fins sarclés de la région de Bidi sont consignés sur le Tableau 2.

Les résultats des expériences menées au cours de la saison sèche, du 29 octobre au 4 novembre 1988, sont consignés sur les Tableaux 3 et 4.

Tableau 3 Résultats de la simulation en saison sèche, pluies de type 2

Averse no. 1 (IK = 0)						Averse no. 5 (IK = 89.0)							
Durée	t	P <sub>i</sub>	P	R	F <sub>i</sub>	Durée	t	P <sub>i</sub>	P	R	F <sub>i</sub>		
min	min	mm h <sup>-1</sup>	mm	mm	mm h <sup>-1</sup>	min	min	mm h <sup>-1</sup>	mm	mm	mm h <sup>-1</sup>		
0			0	0		0	15	30	0	0	18.6	11.4	
29	10	135	14.5	0	72.0	63.0	15	30	7.5	3.5	21.6	8.4	
39	5	135	37.0	7.2			30	10	135	15.0	8.9	94.8	40.2
44	5	135	48.2	10.1			40	10	120	37.5	24.1	92.4	27.6
54	10	120	68.2	20.9	65.0	55.0	50	10	120	57.5	39.5	87.6	-
64	10	90	83.2	30.9	62.0	28.0	55	5	90	65.0	46.8	87.6	-
74	10	70	94.9	38.1	33.2	36.8	65	10	70	76.7	54.2	50.4	19.6
89	15	50	107.4	44.3	26.4	23.6	75	10	50	85.0	61.1	41.4	8.6

Tableau 4 Résultats de la simulation en saison sèche, pluies de type 1

Averse no. 2 (IK = 39.4)					Averse no. 3 (IK = 81.3)			Averse no. 4 (IK = 52.6)					
Durée	t	P <sub>i</sub>	P	F <sub>i</sub>	R	R <sub>i</sub>	F <sub>i</sub>	R	R <sub>i</sub>	F <sub>i</sub>			
min	min	mm h <sup>-1</sup>	mm	mm h <sup>-1</sup>	mm	mm h <sup>-1</sup>	mm h <sup>-1</sup>	mm	mm h <sup>-1</sup>	mm h <sup>-1</sup>			
0			0	0				0					
10	10	40	6.7	0	74.4	45.6		2.3	24.0	16.0	0	20.5	19.5
20	10	120	26.7	11.0	48.0	42.0		15.7	80.4	39.6	1.5	98.4	21.6
30	10	90	41.7	19.0	38.4	31.6		24.2	51.0	39.0	17.4	70.8	19.2
40	10	70	53.4	25.4	24.0	26.0		32.2	48.0	22.0	25.8	50.4	19.6
50	10	50	61.7	29.4				37.8	33.6	16.4	34.3	33.6	16.4

INTERPRETATION

L'analyse des données des Tableaux 2, 3 et 4 montre que les variations de l'aptitude au ruissellement et à l'infiltration d'un sol sableux fin après un sarclage butté ne peuvent être expliquées en faisant intervenir l'indice d'humectation du sol, mais s'expliquent de manière satisfaisante en considérant la quantité de pluie tombée sur le sol depuis le sarclage comme facteur explicatif principal. Avant de poursuivre notre analyse, il nous paraît indispensable de redéfinir les concepts déjà formulés par Lafforgue (1977) et par Casenave (1982) en les utilisant pour une nouvelle formulation de la lame ruisselée.

Relations fondamentales

Pour une même averse, les Figs 1 et 2 montrent que l'intensité de ruissellement (R) est une fonction linéaire de l'intensité de pluie (P) lorsque l'intensité de pluie est supérieure à l'intensité de pluie limite du ruissellement (P<sub>il</sub>), ce qui peut s'exprimer comme suit:

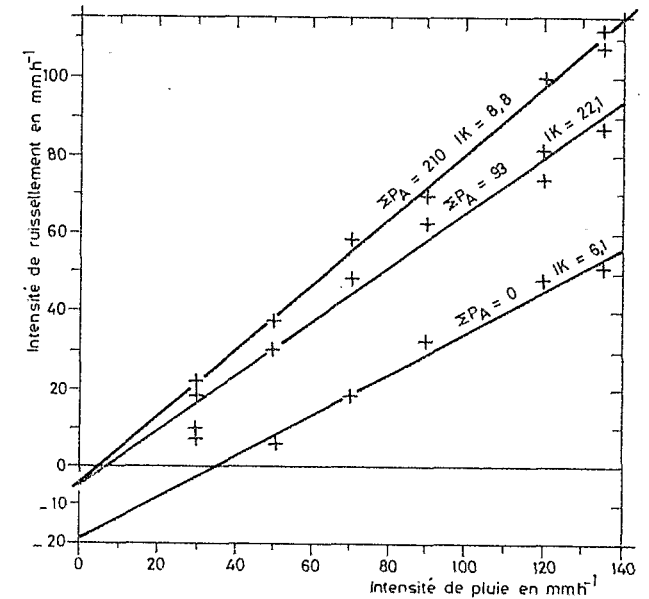


Fig. 1 Simulation en saison des pluies, intensités de ruissellement en fonction de l'intensité de pluie.

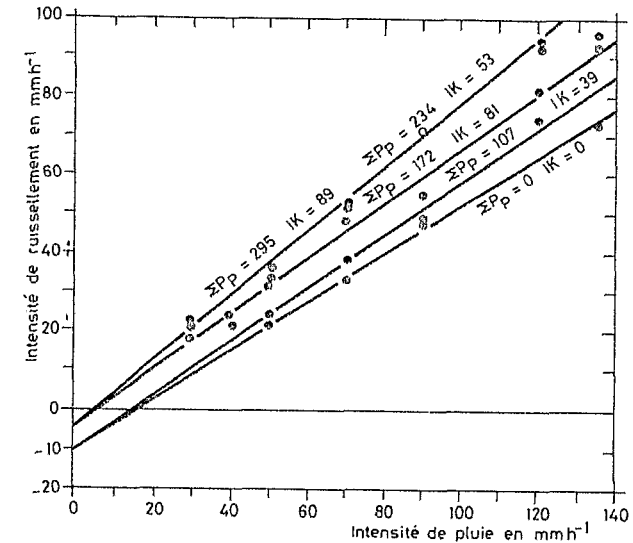


Fig. 2 Simulation en saison sèche, intensités de ruissellement en fonction de l'intensité de pluie.

pour  $P_i > P_{il}$   $R_i = a(P_i - P_{il})$

pour  $P_i \leq P_{il}$   $R_i = 0$

Les paramètres  $a$  et  $P_{il}$  peuvent être considérés comme constants au cours d'une même averse.

Le paramètre  $a$  est égal au rapport entre l'intensité de ruissellement et la différence entre l'intensité de pluie et l'intensité de pluie limite du ruissellement. Nous l'appellerons différentiel de ruissellement. Il correspond à la valeur maximale, jamais atteinte, des coefficients de ruissellement partiel.

La signification du paramètre  $P_{il}$  est plus facile à saisir, c'est l'intensité de pluie au-dessous de laquelle aucun ruissellement ne peut être observé.

En tenant compte des possibilités de stockage superficiel ( $S$ ) des eaux de pluie, l'équation du bilan hydrique à l'échelle de la micro-parcelle prend la forme suivante:

$$P = R + F + S$$

soit en dérivant cette équation en fonction du temps:

$$P_i = R_i + F_i + S_i$$

Les variations du stockage superficiel sont en général négligeables au cours du ruissellement. On peut alors exprimer l'intensité d'infiltration ( $F_i$ ) par la relation suivante:

pour  $P_i > P_{il}$   $F_i = (1 - a)(P_i - P_{il}) + P_{il}$

pour  $P_i \leq P_{il}$   $F_i = P_i$

La première de ces deux relations exprime la croissance de l'intensité d'infiltration (ou vitesse d'infiltration) en fonction de l'intensité de pluie. Cette croissance est bornée supérieurement par une valeur maximale qui correspond à la vitesse d'infiltration à saturation. Nous n'avons pas atteint cette borne supérieure de la vitesse d'infiltration dans le cadre de nos expériences.

Au début de l'averse, il existe une phase dite d'imbibition pendant laquelle, bien que l'intensité de pluie soit supérieure à l'intensité de pluie limite du ruissellement, le ruissellement n'apparaît pas à l'exutoire de la parcelle.

Tout se passe comme si le ruissellement non observé remplissait le réservoir superficiel du sol ( $S$ ). En intégrant la phase d'imbibition à l'équation du ruissellement sur l'intervalle de temps  $(t - t_0)$  pour une intensité de pluie constante  $P_i$ , il vient:

pour  $P_i > P_{il}$   $R = a(P_i - P_{il})(t - t_0) - S$

Cette nouvelle formulation de la lame ruisselée présente l'avantage d'une

intégration possible sur différents intervalles de temps pour des intensités de pluie variables. En supposant le stockage superficiel non récupérable pour le ruissellement, on en déduit l'expression de la lame infiltrée:

pour  $P_i > P_{il}$

$$F = (1 - a) P_i (t - t_0) + a P_{il} (t - t_0) + S$$

Détermination des paramètres explicatifs du ruissellement

Les expériences effectuées sur les micro-parcelles implantées dans la région de Bidi sur sols sableux fins cultivés permettent de calculer les paramètres  $a$ ,  $P_{il}$  et  $S$  pour différentes valeurs des totaux pluviométriques antérieurs tombés depuis le sarclage ( $\sum P_A$ ) ou tombés depuis le début du protocole ( $\sum P_p$ ) (Tableau 5).

Tableau 5 Variations des paramètres explicatifs du ruissellement et de l'infiltration

$IK$ (mm)	$\sum P_p$ (mm)	$\sum P_A$ (mm)	$a$	$a P_{il}$ (mm h <sup>-1</sup> )	$P_{il}$ (mm h <sup>-1</sup> )	$S$ (mm)
<i>Simulation en saison des pluies</i>						
0	0	0	0.54	20	37	10
21	93	93	0.70	5	7	7
9	0	210	0.85	5	6	5
<i>Simulation en saison sèche</i>						
0	0	80	0.63	10	16	20
39	107	-	0.70	8	11.4	7
81	172	-	0.75	5	6.7	5
53	234	-	0.83	5	6.0	4
89	295	-	0.83	5	6.0	4

Variations du différentiel de ruissellement

Le différentiel de ruissellement,  $a = R_i / (P_i - P_{il})$ , varie linéairement en fonction de la somme des pluies tombées depuis le sarclage entre une valeur minimale égale à 0.54 immédiatement après le sarclage et une valeur maximale égale à 0.84 dès que la somme des pluies antérieures est égale à 200 mm. La formulation mathématique de cette évolution est la suivante:

pour  $\sum P_A < 200$  mm  $a = 0.54 + 0.15 \times 10^{-2} \sum P_A$

pour  $\sum P_A \geq 200$  mm  $a = 0.84$

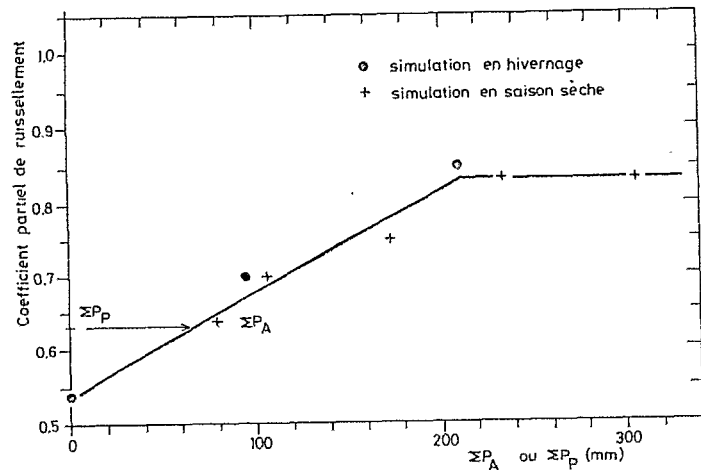


Fig. 3 Variation du coefficient partiel de ruissellement (a) en fonction de la somme des pluies depuis le sarclage.

L'examen de la Fig. 3 permet de constater une bonne coïncidence entre les variations du différentiel de ruissellement en saison sèche et en saison des pluies à condition de prendre en considération pour la simulation réalisée en saison sèche:

- la somme des pluies tombées depuis le dernier sarclage en début de protocole mais seulement pour la première averse;
- la somme des pluies tombées depuis le début du protocole pour les autres averses.

Variations de l'intensité de pluie limite du ruissellement

Les variations de l'intensité de pluie limite du ruissellement en fonction de la somme des pluies antérieures tombées depuis le sarclage sont représentées sur la Fig. 4.

L'intensité de pluie limite du ruissellement décroît très rapidement de la valeur 37 mm h<sup>-1</sup> juste après le sarclage, à la valeur 12 mm h<sup>-1</sup> dès que la somme des pluies tombées depuis le sarclage est égale à 100 mm. La décroissance est ensuite beaucoup plus lente jusqu'à la valeur minimale de 6 mm h<sup>-1</sup> pour une somme des pluies antérieures égale à 180 mm.

Les variations de l'intensité de pluie limite du ruissellement peuvent être formulées de la manière suivante:

pour  $\Sigma P_A < 100$  mm  $P_{il} = 37 - 0.24 \Sigma P_A$

pour  $100 \leq \Sigma P_A \leq 180$   $P_{il} = 20 - 0.078 \Sigma P_A$

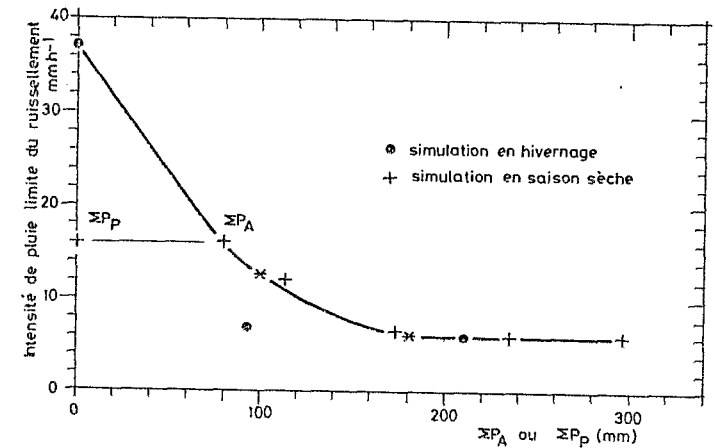


Fig. 4 Variations de l'intensité limite de ruissellement ( $P_{il}$ ) en fonction de la somme des pluies depuis le sarclage.

pour  $\Sigma P_A > 180$  mm  $P_{il} = 6$  mm h<sup>-1</sup>

Les variations de l'intensité de pluie limite du ruissellement observées en saison des pluies coïncident avec celles de saison sèche à condition de prendre en considération pour la simulation réalisée en saison sèche:

- la somme des pluies tombées depuis le dernier sarclage au début du protocole et seulement pour la première averse;
- la somme des pluies tombées depuis le début du protocole pour les autres averses.

Variations du stockage superficiel (Fig. 5)

Le stockage superficiel (S) correspond à une certaine quantité d'eau soustraite au ruissellement en début d'averse. Cette quantité d'eau est de l'ordre de 10 à 20 l m<sup>-2</sup> juste après le sarclage. Elle correspond à une hauteur pluviométrique de 10 à 20 mm.

Le stockage superficiel décroît plus ou moins rapidement selon sa valeur initiale pour atteindre la valeur de 7 mm lorsque la somme des pluies antérieures tombées depuis le sarclage est égale à 100 mm. La valeur minimale du stockage superficiel, soit 4 mm, est atteinte pour une somme des pluies antérieures égale à 200 mm.

La formulation mathématique de l'évolution du stockage superficiel en fonction des pluies antérieures tombées depuis le sarclage prend la forme suivante:

pour  $\Sigma P_A < 100$  mm  $S = S_0 - \frac{S_0 - 7}{100} \Sigma P_A$

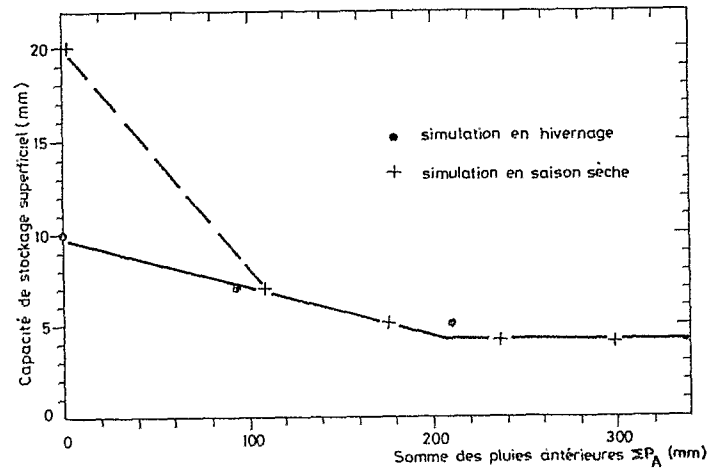


Fig. 5 Variation de la capacité de stockage superficiel ( $S$ ) en début d'averse en fonction de la somme des pluies depuis le sarclage.

$$\text{pour } 100 \leq \Sigma P_A \leq 200 \text{ mm} \quad S = 10 - 0.04 \Sigma P_A$$

$$\text{pour } \Sigma P_A > 200 \text{ mm} \quad S = 4 \text{ mm}$$

La valeur initiale du stockage superficiel ( $S_0$ ) dépendrait du micro-relief après sarclage et de la position du cadre métallique de la parcelle par rapport aux buttes de sarclage.

## CONCLUSION

Le simulateur de pluies se révèle être un outil efficace pour l'étude de l'évolution du ruissellement et de l'infiltration sur des sols cultivés avec un micro-relief modéré. Bien que la simulation soit effectuée sur des surfaces au sol de  $1 \text{ m}^2$  les renseignements qui sont extraits des expériences ont une portée très générale et permettent d'expliquer le comportement hydrologique de surfaces beaucoup plus grandes. Ainsi les expériences de simulation de pluies effectuées sur sols sableux fins sarclés confirment-elles les résultats obtenus à partir d'expériences menées dans le même région sur des parcelles agronomiques de grande taille ( $3000 \text{ m}^2$ ) couvertes par le même type de sol (Serpantié & Lamachère, 1990).

Sur un sol sableux fin sarclé, le nombre de facteurs explicatifs du ruissellement et de l'infiltration peut être réduit à six: trois facteurs dépendant des chutes de pluies et trois autres facteurs dépendant de la nature du sol et de l'état initial de sa surface avant l'averse.

Les trois facteurs pluviométriques sont: l'intensité de pluie ( $P_p$ ), la durée

de l'averse ( $t - t_0$ ) et la somme des pluies antérieures tombées depuis le sarclage ( $\Sigma P_A$ ).

Les trois facteurs pédologiques sont: le différentiel de ruissellement ( $a = R/(P_i - P_{i1})$ ), l'intensité de pluie limite du ruissellement ( $P_{i1}$ ) et la capacité de stockage superficiel du sol en début d'averse ( $S$ ). Ces trois facteurs pédologiques évoluent après le sarclage en fonction de la somme des pluies tombées à la surface du sol.

Un sarclage butté sur sols sableux augmente considérablement l'infiltration de l'eau et améliore nettement l'alimentation hydrique des cultures. Le gain est d'autant plus sensible que l'intensité de pluie est faible.

L'effet du sarclage est temporaire. Lorsque la somme des pluies tombées depuis le dernier sarclage croît de la valeur zéro à la valeur 100 mm la transformation de la surface du sol sous l'action des gouttes de pluie et du ruissellement provoque une réduction de moitié de la capacité d'infiltration du sol: le différentiel de ruissellement augmente de la valeur 0.54 à la valeur 0.69 et l'intensité de pluie limite du ruissellement décroît de la valeur  $37 \text{ mm h}^{-1}$  à la valeur  $13 \text{ mm h}^{-1}$ .

Au-delà d'un cumul pluviométrique de 200 mm tombés sur un sol sableux fin sarclé, le sarclage ne joue plus aucun rôle, tous les paramètres conjuguant leurs effets pour que le ruissellement atteigne un rendement maximal: un différentiel de ruissellement égal à 0.84, une intensité de pluie limite du ruissellement égale à  $6 \text{ mm h}^{-1}$ , une capacité de stockage superficiel égale à 4 mm.

La nouvelle formulation proposée pour exprimer le ruissellement et l'infiltration rend possible l'intégration de ces équations pour des pluies naturelles à intensité variable. Elle devrait se révéler particulièrement bien adaptée à l'estimation des lames infiltrées sur les sols cultivés.

## REFERENCES

- Albergel, J. (1987) Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Du  $\text{m}^2$  au  $\text{km}^2$ . Etude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris, France. Etudes et thèses de l'ORSTOM, ORSTOM, Paris.
- Casenave, A. (1982) Le minisimulateur de pluie. Conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures. *Cahier ORSTOM, série Hydrol.* XIX, (4), 207-227.
- Casenave, A. & Valentin, C. (1989) Les États de Surface de la Zone Sahélienne. Influence sur l'Infiltration. Collection didactiques, ORSTOM.
- Lafforgue, A. (1977) Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. Application à une exploitation méthodique des données obtenues sous pluies simulées. *Cahier ORSTOM, série Hydrol.* XIV (4), 299-344.
- Serpantié, G. & Lamachère, J. M. (1990) Valorisation agricole des eaux de ruissellement et lutte contre l'érosion sur champs cultivés en mil en zone soudano-sahélienne - Burkina Faso, Province du Yatenga, région de Bidi. Colloque AUPELF-UREF, Ouagadougou, mars 1990.