

EVOLUTION DES ETATS DE SURFACE DES "TEPETATES" CULTIVES, HORIZONS INDURES DE SOLS VOLCANIQUES DU MEXIQUE ; IMPACT SUR LE RUISSELLEMENT ET L'EROSION.

**J.L. JANEAU¹, G. JEROME¹, Y. LEROUX¹, C. PRAT¹, P. QUANTIN² et
C. ZEBROWSKI³**

1 : ORSTOM, Cicerón 609, Col. Los Morales, 11530 Mexico D.F., Mexique

2 : ORSTOM, 32, Avenue H. Varagnat, 93143 BONDY Cedex

3 : ORSTOM, Representación en Ecuador, Apdo Post. 1711-6596, QUITO, Equateur

RESUME :

L'érodibilité des tepetates (horizons indurés de sols volcaniques mis à nu par érosion du sol) réhabilités en sols agricoles, a été étudiée dans la Vallée de Mexico au cours de deux programmes successifs (1989-92 et à partir de 1994) de l'Union Européenne au Mexique. Outre la mesure des pluies, du ruissellement et des pertes en terre, une observation a été faite de l'évolution des états de surface sur des parcelles de tepetate et de sol billonnées et plantées en maïs, ou laissées à nu. Ces observations, sur des petites parcelles "Wischmeier" (44 m²) en 1991 ou des terrasses de 500 m² en 1994, ont été faites selon la méthode de Casenave et Valentin (1989). Elles montrent une évolution maintenant bien connue des états de surface du tepetate et du sol cultivés par suite de la "fonte" des agrégats, à savoir : la formation successive de croûtes, d'abord "structurale" puis "d'érosion" sur les billons, et ensuite de "ruissellement" et de "décantation" dans l'interbillon. Cette évolution est beaucoup plus lente sur le tepetate que sur le sol, qui est très instable. Elle s'accélère sur le tepetate du fait des travaux culturaux renouvelés. Le suivi de cette évolution a consisté en des mesures périodiques, en fonction des travaux du sol, à savoir de : la fonte des agrégats, le diamètre minimum d'agrégat stable, la variation de la hauteur de la surface (par "points quadrats"), la surface du couvert végétal et des différents types d'encroûtement, ainsi que la porosité et la vitesse d'infiltration. Il y a une bonne relation entre développement des croûtes, tassement, diminution de la porosité et de la vitesse d'infiltration. La fonte totale des agrégats est plus rapide et plus liée à "l'effet splash", donc à l'intensité des pluies, sur sol que sur tepetate. Mais la relation entre les mesures globales de ruissellement et de perte en terre sur la parcelle versus la dégradation structurale et le développement des croûtes, n'est pas évidente sur des parcelles billonnées de tepetate ou de sol en condition de pluies faiblement érosives ou modérément érosives espacées, à cause de l'impact des billons. Cette relation est plus nette en condition de pluies érosives fréquentes ou fortement érosives ; sinon sur des parcelles non billonnées et laissées à nu en cas de pluies faiblement érosives.

MOTS CLES : ERODIBILITE, ETATS DE SURFACE, TEPETATES, HORIZONS INDURES, MEXIQUE.

SUMMARY : Title : Evolution of the surface features of cultivated "tepetates", indurated horizons of volcanic soils in Mexico ; its impact on runoff and soil erosion.

The erodibility of "tepetates" (indurated volcanic soil horizons, laid bare by soil erosion), after their rehabilitation to agricultural soils, has been tested in the Mexico Valley during two successive European Union Programmes (1989-92 and from 1994). Besides the measures of rainfall, runoff and soil loss, we observed the evolution of surface features on experimental plots of tepetate and soil, which have been ridged for maize growing, or laid bare. These observations, on either small (44 m²) "Wischmeier" plots in 1991 or terraces of 500 m² size in 1994, were

made after the Casenave and Valentin (1989) method. They show a now well know surface features reorganization of cultivated soil and tepetate, due to aggregate "melting", viz : the successive superficial formation of crusts (sealings) at first "structural", then "of erosion" on the ridges, further "of runoff" and "of sedimentation" in the furrow. This process was developing much slower on the cultivated tepetate than on the soil, which is very unstable. However on tepetate it was accelerating with repeated cultivation works. In order to observe this process we made several periodic measures, according to the cycle of cultivation works, viz : minimum size of stable aggregates, height variation of surface level (by "quadrat points" method), the area of vegetal cover and of various crusts, as well as of porosity and of infiltration rate. There was observed a rather good relationship between the global data of runoff and soil loss, versus the structural degradation and the crust development. In addition the aggregate "melting" is faster on soil than on tepetate, and more related to the "splash impact" and to the rainfall intensity. But the relationship between the data of whole plot runoff and soil loss, versus the structural degradation and crust development, is not obvious on the ridged tepetate or soil plots under weakly erosive rainfalls or moderately erosive but unfrequent, due to the ridge impact. This relationship is clearer in the case of more frequent moderately erosive rainfalls or of strongly erosive ones, if not on the non ridged but bare cultivated tepetate plots even under weakly erosive rainfalls.

KEY WORDS : ERODIBILITY, SURFACE FEATURES, TEPETATES, INDURATED HORIZONS, MEXICO.

INTRODUCTION

Un premier programme de la Communauté Européenne de 1989 à 1992 a été consacré à l'étude des "tepetates", horizons indurés de sols volcaniques du Mexique, en vue de leur réhabilitation agricole (Quantin et col. 1992). Cette étude a comporté notamment une mesure de l'érosion en parcelles de type Wischmeier sur des tepetates et sols cultivés sur une station près de Texcoco dans la Vallée de Mexico (H. Arias et al. 1992), ainsi qu'une observation des réorganisations superficielles sous l'impact des pluies (G. Jérôme 1992, en collaboration avec J.L. Janeau et C. Zébrowski). D'autres observations de l'érosion ont été faites sur trois stations dans la région de Tlaxcala (Baumann, 1992), mais sans étude des états de surface. Un deuxième programme de l'Union Européenne (1994-96) poursuit une recherche plus finalisée sur la régénération en sol agricole de ces mêmes matériaux au Mexique et en Equateur. Sur le même site près de Texcoco, dans la vallée de Mexico, les mesures de ruissellement et d'érosion sont faites non seulement sur des petites parcelles (24 m²) de référence, mais aussi sur des terrasses en pente de dimension paysanne (500 à 1 000 m²). De nouvelles observations des réorganisations superficielles ont été faites sur des terrasses de dimension paysanne (Y. Leroux 1995, en collaboration avec J.L. Janeau et C. Prat).

L'objectif de cet exposé est de montrer l'évolution des états de surface sous l'effet des pluies et de traitements culturels successifs. Il s'agit notamment de la fonte des agrégats et de la formation de croûtes structurales, d'érosion ou de dépôt, ainsi que de leur impact sur le ruissellement et l'érosion.

MATERIEL ET METHODES

Dans la vallée de Mexico les "tepetates" affleurent par suite de l'érosion des sols cultivés sur le piémont du massif volcanique de la Sierra Nevada. Ainsi sont apparues les surfaces stériles qu'il s'agit de réhabiliter en sol agricole puis de préserver de l'érosion.

Les horizons indurés sont trois dépôts de tuf altéré à la base d'une succession de trois paléosols enterrés sous le sol actuel (figure 1) (Quantin et col. 1992). Un climat à longue saison sèche a contribué à leur induration. La pluviosité actuelle varie de 600 à 800 mm et la saison sèche dure de 5 à 6 mois.

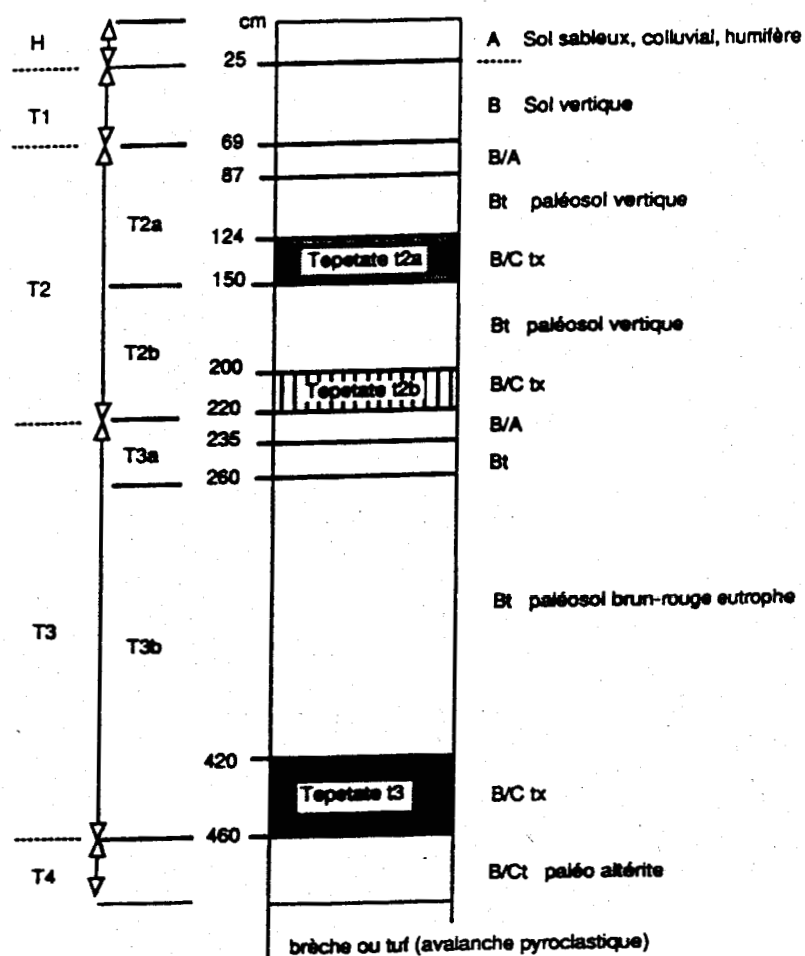


Figure 1 : Stratigraphie des dépôts pyroclastiques, sols et tepetates

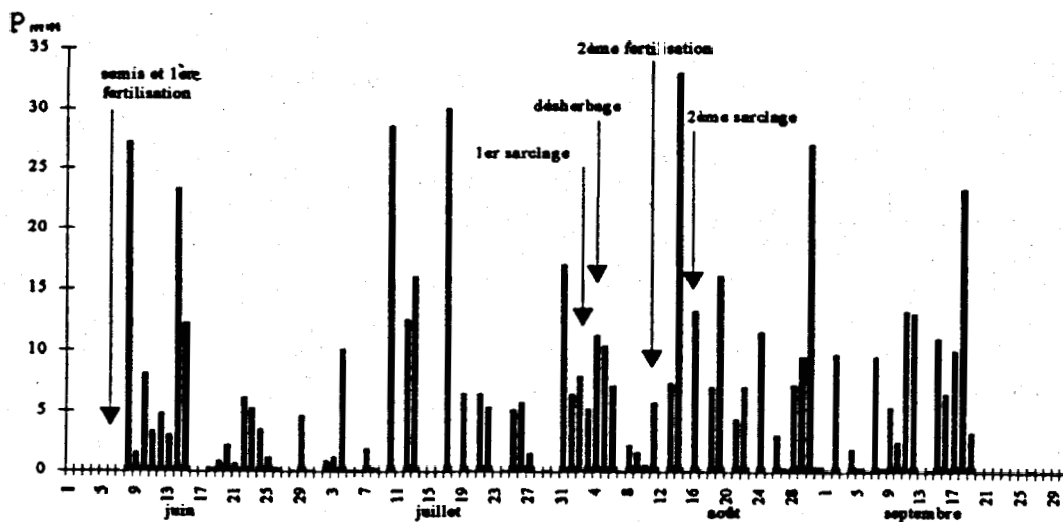


Figure 2 : Cycle des pluies et du travail du sol en 1994

Pour régénérer un sol agricole les tepetates sont défoncés par sous-solage et fragmentés par labour et pulvérisage pour obtenir une granulométrie adéquate. Une fertilisation minérale et éventuellement organique (fumier) pallie les carences minérales pour la plante.

En 1991 l'observation des états de surface a été faite selon la méthodologie de Casenave et Valentin (1989) sur des parcelles de mesure d'érosion de type Wischmeier, en culture de deuxième année de maïs sur billon. Ainsi ont été comparés sur sol (naturel) et tepetates cultivés l'effet de billonnage et du couvert végétal par rapport aux mêmes matériaux cultivés mais laissés à nu (G. Jérôme 1992).

En 1994 (Y. Leroux) la même observation a été reprise en deuxième année de culture de maïs sur billon, mais sur des terrasses de dimension paysanne. On a comparé sur quatre terrasses de tepetate cultivé l'effet d'un apport de fertilisation organique ou minérale, d'une culture de maïs seul ou associé à deux légumineuses (fève, haricot) et une terrasse de sol cultivé. Le cycle cultural a été rythmé par trois périodes de travail du sol (fig. 2), à savoir : Après le labour initial (26.04) avec charrue à soc pour former sillons et billons, la première période va du semis (+ fertilisation minérale, 7 au 8.06) au premier sarclage avec araire (2 au 3.08), suivi d'un désherbage manuel (4 au 5.08), qui détruit le premier billon pour former un buttage partiel du maïs ; la deuxième période succède jusqu'au deuxième sarclage avec araire (16.08) qui forme le buttage définitif du maïs. La troisième période s'achève avec la fin des pluies (20.09). L'unique parcelle avec fumure organique a reçu deux apports de fumier (25.07 et 15.08), qui ont modifié l'état de surface au milieu de la première période et au début de la troisième (cet essai est donc difficilement comparable). Les observations ont été faites au début, éventuellement au milieu, et à la fin de chaque période. Elles comportent une partie descriptive, sur la fragmentation et la fonte des agrégats, ainsi que la formation des croûtes sur le billon et dans l'espace interbillon, ou de griffes d'érosion, et une série de mesures.

Les mesures sont les suivantes : sur la station le régime et l'intensité des pluies (pluviogrammes) ; sur chaque parcelle et pour chaque pluie le ruissellement (limnigramme) et la perte en terre (sédiments) ; sur un ou deux sites de 2 m² choisis sur chaque parcelle ou terrasse, des mesures de fonte d'agrégats, du "diamètre minimum" d'agrégat non inclus dans une croûte et du microrelief de la surface et du couvert végétal (par "points quadrats"). Les microparcelles de 2 m² recouvrent deux billons et deux interbillons. Elles sont situées soit au milieu de la terrasse (une seule), soit en amont et en aval (deux). En outre, l'humidité du sol superficiel (0-10 cm) a été mesurée périodiquement en 1991 sur l'ensemble des parcelles "Wischmeier" ou plus précisément en 1994 sur les billons et l'espace interbillon. Enfin la vitesse d'infiltration au champ (dans un cylindre) et la porosité globale (prélèvement d'un cylindre) ont été mesurées en 1991 sur les petites parcelles "Wischmeier", distinctement sur le billon et dans l'interbillon, au début et à la fin de chaque période culturale, afin de déterminer l'impact des réorganisations superficielles.

RESULTATS

1. Formation de croûtes et de griffes d'érosion

1.1. Parcelles de tepetate cultivé, billonné, planté en maïs

L'évolution des états de surface suit un cycle de destruction et réorganisation superficielle des agrégats d'une part, transport et sédimentation dans l'interbillon d'autre part. Ce cycle se renouvelle à chaque période culturale. Ainsi se forment successivement croûte structurale et croûte d'érosion, croûte de ruissellement et croûte de décantation (fig. 3), et éventuellement des griffes d'érosion.

Au départ, après labour et pulvérisage, la structure est finement motteuse, en fragments anguleux. Dès le billonnage, il se forme d'abord sur le haut du billon une fine "croûte structurale". Entre les agrégats, les fines particules qui les enrobaient sont détachées sous l'effet splash et constituent un voile continu, friable ; cette croûte inclut souvent des bulles d'air. Elle s'étend à l'ensemble du billon. Puis les agrégats en surface se fissurent et se fragmentent sous

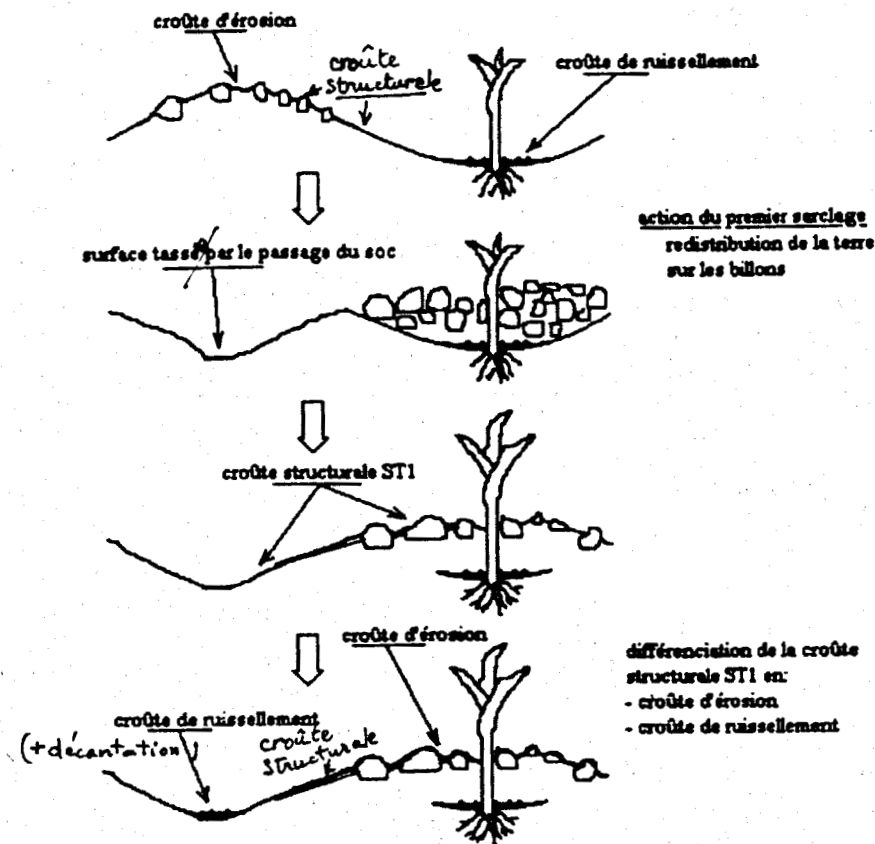


Figure 3a : action du premier sarcage

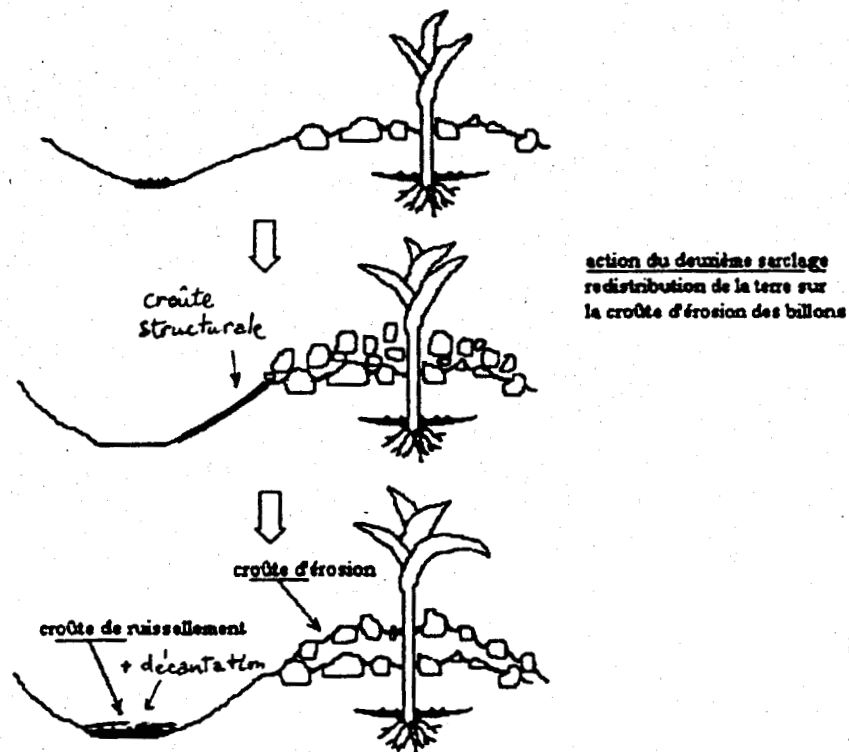
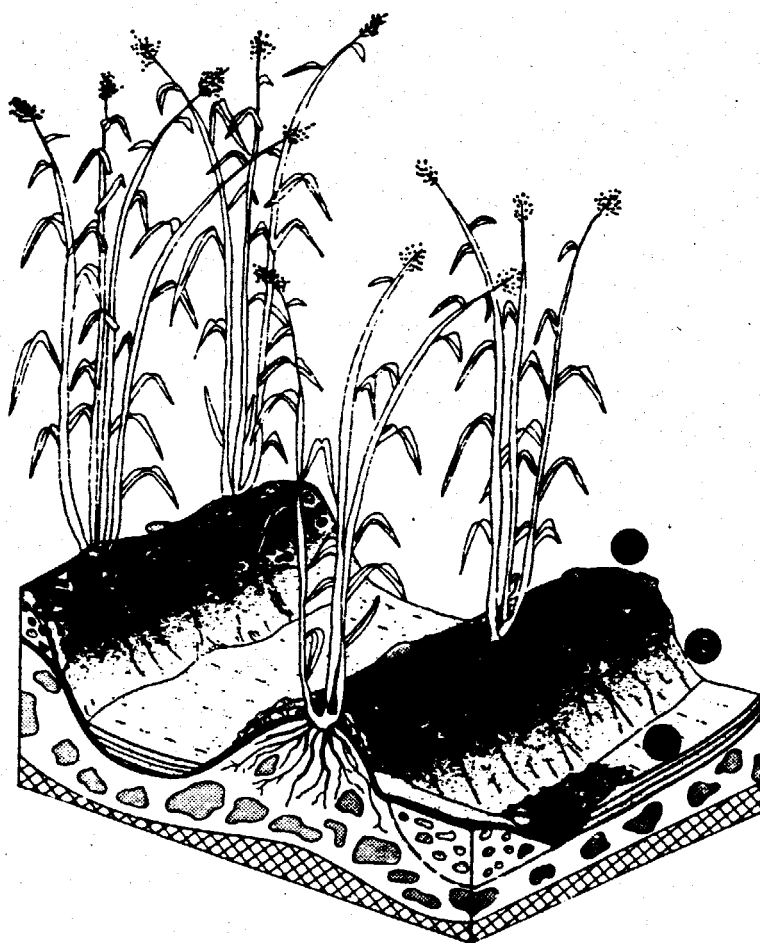


Figure 3b : action du deuxième sarcage

Figure 3 : Formation des croûtes superficielles au cours du cycle cultural sur un champ de maïs billonné.



- 1 - Croûte structurale ST1
- 2 - Croûte d'érosion ERO
- 3 - Croûte de ruissellement RUIS
- 4 - Croûte de décantation DEC -
en amont de la cloison interbillons.

Figure 4 : Types de croûtes superficielles sur un champ de sorgho billonné, d'après Casenave et Valentin (1989).

les effets combinés de gonflement-retrait, de dégazage de l'air dans les capillaires qui les fait éclater, et de l'érosion superficielle par impact des gouttes de pluie et effet splash. Il y a fonte des agrégats. Ainsi se constitue une croûte d'érosion, plutôt rugueuse sur le haut du billon tandis que la croûte structurale plus lisse se développe en bas du billon (fig. 4).

La croûte structurale a réduit la vitesse d'infiltration et accru le ruissellement et l'érosion des agrégats fins ; celle-ci alimente les dépôts dans l'interbillon, qui constituent une croûte de ruissellement (fig. 4), c'est un dépôt hétérogène, sous turbulence, incluant des bulles d'air, et inversé, les petits agrégats recouvrant les particules fines, ou entrecroisé. L'infiltration se réduit dans l'interbillon ; l'eau stagne dans les parties basses, à l'aval des billons et de la parcelle, où il se forme des plages de dépôt classé, le limon-argileux étant en surface, qui constitue la croûte de décantation (fig. 4). Son extension est très limitée, sauf en bas des parcelles après de fortes pluies. Elle peut être imbriquée dans les dépôts plus grossiers de la croûte de ruissellement.

Sous l'effet des fortes pluies l'eau de ruissellement déborde à l'aval des billons (en pente légère vers l'exutoire) et des parcelles. Des ruptures et griffes d'érosion se produisent alors sur le flanc des billons qui peuvent être à l'origine de rigoles et de microravines, comme cela a été observé sur d'autres terrasses lors de très fortes pluies.

1.2. Parcelles de tepetate cultivé, non billonnées, sans couvert végétal

La surface cultivée initiale est rugueuse et motteuse. Elle se couvre rapidement d'une croûte structurale, d'abord sur les plages d'agrégats fins, puis sur celles d'agrégats grossiers. Alors se développe la croûte d'érosion par fonte des agrégats sur les reliefs les plus élevés, tandis qu'une croûte de dépôt irrégulière se forme dans les petites dépressions. A partir des plages de croûte structurale naissent de fines griffes d'érosion ramifiées, qui se rassemblent en quelques rigoles d'érosion lors des pluies les plus fortes et alimentent des dépôts de ruissellement en bas de pente.

1.3. Sol cultivé et billonné, planté en maïs

Le sol naturel cultivé est plus instable que le tepetate ; le processus de réorganisation superficielle est plus rapide. Les agrégats fondent presque totalement ; les billons se tassent et s'effondrent, se recouvrant d'une mince croûte structurale, tandis que les interbillons se remplissent d'épais dépôts de ruissellement et de décantation. Mais on n'observe pas de griffes d'érosion, le matériau étant moins stable que celui d'un tepetate.

Ce processus, sur tepetate ou sur sol cultivé, se renouvelle à chaque période de travaux culturaux. Il est plus lent au cours de la première période ; il s'accélère durant les deux périodes suivantes, probablement à cause de la diminution de taille des agrégats et aussi la réduction de la perméabilité sous l'horizon superficiel (semelle de labour dans le nouvel interbillon, glaçage de surface en croûte structurale et enfouissement d'encroûtements sous le deuxième billon).

2. Fonte des agrégats

2.1. Sur tepetate cultivé : La fonte des agrégats est lente, progressive et seulement partielle, dès la première période de culture (fig. 5), quelle que soit la taille des agrégats (sauf ceux inférieurs à 2 mm, dont la fonte est rapide et totale). Cette fonte se poursuit sans être totale au cours de la troisième période (fig. 7) ; à chaque nouveau travail du sol il y a renouvellement en agrégats de plus grande taille à la surface. La fonte (partielle) des agrégats est indépendante de l'érosivité des pluies (fig. 6). Elle est surtout due aux effets de gonflement-retrait et de pression capillaire, mais pas ou peu à l'effet "splash" des gouttes de pluie.

2.2. Sur sol cultivé : La fonte des agrégats est rapide et très importante dès la première période de culture (fig. 5). Elle s'accroît en deuxième et surtout en troisième période (fig. 7). Elle est dépendante de l'érosivité des pluies (fig. 6), donc de l'effet "splash".

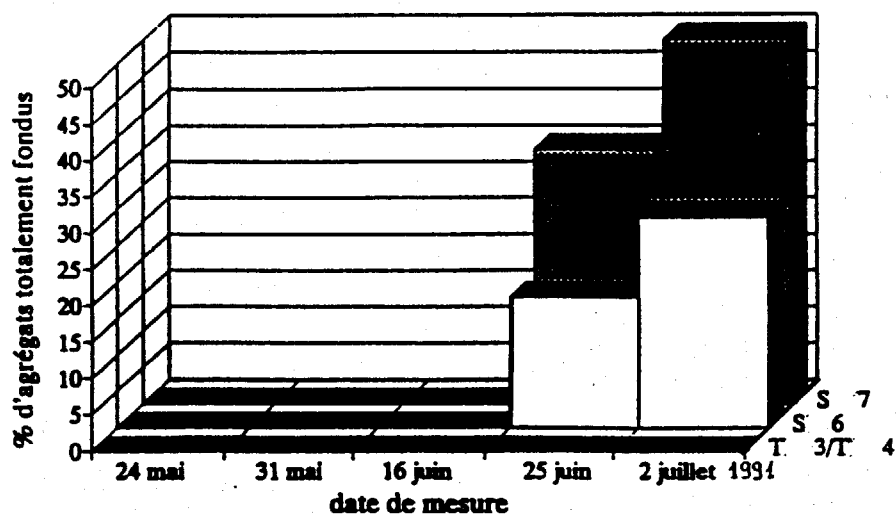


Figure 5 : Evolution de la fonte totale d'agrégats en surface ; 1ère période .

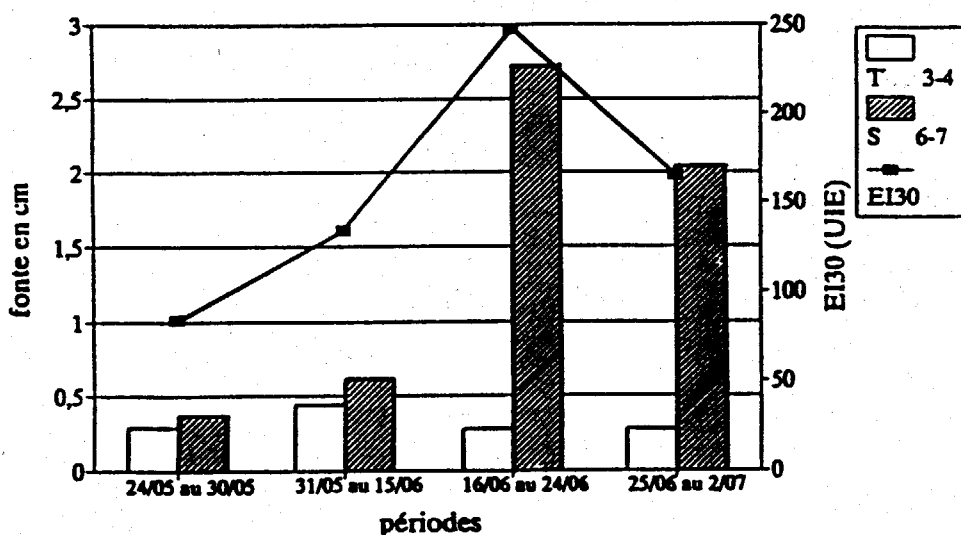


Figure 6 : Relation entre fonte des agrégats et érosivité (EI30) ; 1ère période

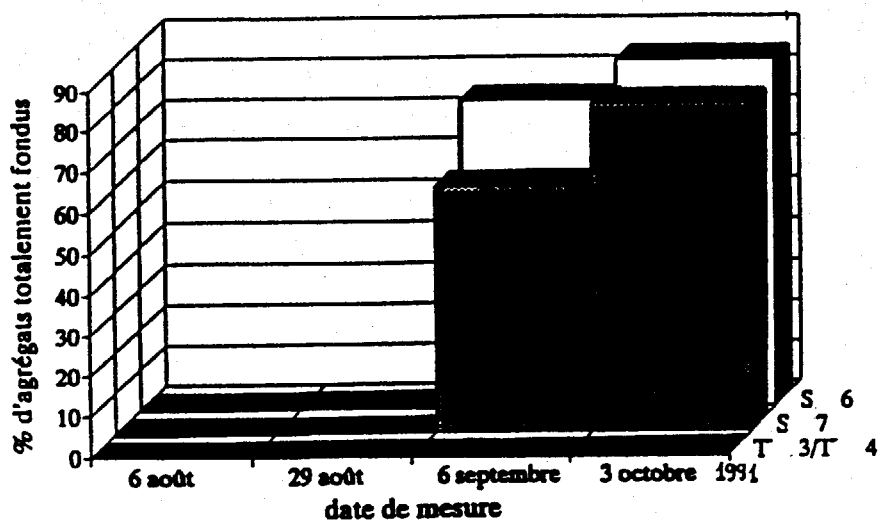


Figure 7 : Evolution de la fonte totale d'agrégats en surface ; 3ème période

2.3. Evolution du diamètre minimum et de la taille des agrégats, cas du tepetate cultivé.

Ce sont les petits agrégats (< 2 mm) qui fondent les premiers. Les agrégats de tepetate humide ont tendance à fondre plus vite que les agrégats secs. Les petits agrégats sont totalement intégrés (fondus) dans la croûte structurale sur le billon au bout de quelques jours ; ou bien ils sont entraînés et viennent recouvrir la croûte de ruissellement en interbillon (sédimentation inverse). Les plus gros agrégats de tepetate ne sont que partiellement intégrés dans la croûte structurale après quelques jours ; puis ils fondent progressivement et forment la rugosité de la croûte d'érosion. Chaque travail du sol renouvelle les agrégats grossiers en surface. Mais leur proportion et leur taille moyenne diminuent après le deuxième sarclage.

2.4. Comparaison des traitements

L'effet de la couverture de maïs (en 1991 et en 1994), par rapport au tepetate ou aux sols cultivés et laissés à nu, n'est pas évident. Ceci suggère que l'effet de cette couverture est trop tardif et partiel. Une culture associée (maïs, fève, haricot) permet d'obtenir plus rapidement une meilleure couverture. Cependant sur parcelles "Wischmeier" l'effet protecteur d'un filet près de la surface a réduit fortement la fonte des agrégats et la formation d'une croûte structurale (J.L. Oropeza et al., 1995, rapport préliminaire non publié).

L'apport de fumure organique semble ralentir la fonte des agrégats. Il peut produire un effet de "mulch" contre l'effet "splash" ou réduire la vitesse de réhumectation (les acides humiques sont hydrophobes) et ainsi l'accroissement de la pression capillaire (Y. Leroux, 1995). Cette expérience conduite anormalement en 1994, doit être mieux contrôlée en 1995.

Le travail du tepetate a des effets positifs et négatifs. Les deux sarclages successifs renouvellent en surface les agrégats grossiers et reforment un billon meuble et perméable ; mais ils enfouissent les croûtes antérieures sans les détruire et les croûtes se reforment rapidement en surface ; en outre ils rapprochent la semelle de labour de la surface dans l'interbillon, où le drainage diminue. Le désherbage manuel fragmente les agrégats grossiers et accroît la proportion d'agrégats fins instables qui servent à reformer la croûte structurale sur le billon et à alimenter l'érosion vers l'interbillon. La multiplication des façons culturales intensifie donc la dégradation de l'état de surface.

3. Evolution de la porosité et de la vitesse d'infiltration

Il s'agit de mesures faites en 1991 (G. Jérôme 1992) sur le billon et dans l'interbillon (tab. 1). La porosité initiale du tepetate n'est que de 44 %. Le labour l'amène à 58 % ; elle s'abaisse à 53 % en fin de première période, puis revient à 58 % au premier sarclage, mais seulement à 51 % au deuxième sarclage et finalement tombe à 50 % en fin de culture, par suite du tassement des agrégats.

Tableau 1. Evolution de la porosité (1) et vitesse d'infiltration (2)

Période ->		1		2		3	
		1,1	1,2	2,1	2,2	3,1	3,2
Tepetate	P	58,1	53,2	57,7	54,3	51,1	50,6
	Vi 1	96	45	48	28	21	10
	2	52	16	24	12	8	2
Sol	P	56,4	50,9	55,3	51,5	50,0	48,9
	Vi 1	68	32	16	8	10	4
	2	52	0	12	2,4	5	0

(1) P : Porosité totale en % - (2) Vi : vitesse d'infiltration en mm/h.

Période 1,1 début de 1; 1,2 fin de 1; etc...- Vi : 1 sur le billon; 2 sur le sillon

Nota bene : tepetate initial P = 44 % Vi = 0,3 à 0,5 mm/h

L'évolution de la vitesse d'infiltration est plus spectaculaire. Au départ dans le tepetate elle était de moins de 1 mm/heure. Après labour et billonnage elle atteint près de 100 mm/heure sur le billon et 50 mm/heure dans l'interbillon. A chaque période la diminution est très importante, en raison de l'encroûtement superficiel. En fin de troisième période elle n'est plus que de 10 mm/heure sur le billon et 2 mm/heure dans l'interbillon, par suite de la présence de la croûte de dépôt directement sur une semelle de labour. Cette évolution est plus accentuée sur le sol cultivé, car la fonte des agrégats est quasi totale en surface et l'encroûtement y est plus rapide et plus développé dans l'interbillon.

4. Mesure des "points quadrats", évolution du relief superficiel

En 1991 (tab. 2, G. Jérôme 1992) nous avons déterminé la variation moyenne des hauteurs du billon "Hb" et de l'interbillon (sillon "Hs". En première période culturale, il y a d'abord diminution de la hauteur du billon par tassement, en même temps que se forme la croûte structurale. L'élévation de hauteur dans l'interbillon ne démarre que lorsque la croûte structurale est assez développée pour déclencher ruissellement, érosion et formation d'une croûte de dépôt (de ruissellement puis de décantation). Ce processus est plus rapide en deuxième et en périodes, c'est à dire que la croûte structurale se développe rapidement et que l'érosion démarre presque aussitôt. En fin de cycle cultural on observe une diminution de la hauteur moyenne de la surface (calculée). Ceci n'est pas dû seulement à l'érosion, mais pour une large part au tassement, à la fonte des agrégats et à la formation des croûtes.

Tableau 2 : Variation en cm de la hauteur moyenne du billon Hb et de l'interbillon Hs, en 1991.

Périodes/Traitements →		Tepetate cultivé		Sol cultivé	
		nu	maïs	nu	maïs
Première	Hb : 22-04/2-07	-1,16	-4,13	-5,90	-5,35
	Hs : 22-04/20-06	-1,03	-1,71	-2,93	-2,45
	Hs : 21-06/2-07	+0,67	+1,01	+0,98	+1,10
Deuxième	Hb : 9-07/1-08	-0,58	-0,56	-0,82	-0,72
	Hs : 9-07/15-07	-1,01	-0,96	-1,50	-0,98
	Hs : 16-07/1-08	+0,25	+0,11	+0,27	+0,52
Troisième	Hb : 6-08/9-10	-1,62	-0,53	-2,63	-3,57
	Hs : 7-08/5-09	-1,71	-2,07	-1,93	-1,48
	Hs : 6-09/9-10	+0,72	+0,47	+0,67	+0,72

NB : Il y a eu permutation du billon et de l'interbillon entre première et deuxième période (maïs semé dans le sillon, puis butté ; même travail sur parcelle nue).

Ces observations ont été confirmées en 1994 (Y. Leroux, 1995). La variation calculée de la hauteur moyenne de la surface a été exprimée en variation de volume (déplacement de la matière). Les mesures ont été faites de la fin de la première période (28.07) au milieu de la troisième (1.09), permettant ainsi de mettre en évidence les effets du premier et du deuxième sarclage. Sur la terrasse T6, ont été comparées la situation haut de parcelle (T6h) et bas de parcelle (T6b). Chaque travail du tepetate provoque une augmentation de volume ; celle-ci est suivie rapidement d'une diminution qui coïncide exactement avec le développement de la surface encroûtée. Cette diminution moyenne globale du volume est moindre en bas de parcelle, sans doute à cause d'atterrissements accrus de sédiments dans les interbillons à l'aval (tab. 3). La diminution moyenne globale de hauteur est de 2 à 3 cm. Elle est surtout due au tassement.

Tableau 3 : Variation moyenne globale du volume en cm³ de la parcelle T6, en 1994.

Périodes / situation amont/aval ->	T6h	T6b
Fin première période 28-07	-61,38	-1,98
1er sarclage 3-08	+21,78	+33,66
Intervalle 4-08	-8,96	-75,24
Désherbage 5-08	+49,50	+43,56
Deuxième période 6 au 15-08	-186,12	-9,90
2ème sarclage 16-08	+45,54	+1,98
Troisième période 17-08 au 1-09	-452,70	-419,76
Total cumulé en volume, cm ³	-552,42	-427,68
Total équivalent hauteur en cm	-2,79	-2,16

5. Ruissellement et érosion

Nous n'avons que peu de résultats complètement élaborés et publiés, seulement des évaluations globales de perte en terre sur les parcelles de Wischmeier en 1990 et 1991, ainsi que trois mesures du taux de ruissellement pour les trois pluies les plus érosives de 1991 (Quantin et col. 1992, d'après Arias et Miranda 1992). Ceci ne nous permet pas d'établir une relation détaillée entre le ruissellement et l'érosion en correspondance avec les périodes culturales et l'évolution des états de surface.

5.1. Ruissellement et érosion des trois pluies les plus érosives

Les taux de ruissellement des trois plus fortes pluies de 1991 (Quantin et col. 1992) peuvent être comparés à l'indice d'érosivité des pluies, les pertes en terre et l'état de surface des parcelles de tepetate ou de sol cultivés (G. Jérôme 1992). Les traitements à comparer sont le tepetate : T1 naturel à nu ; T2 défoncé (sous solé) ; T3 cultivé et billonné à nu ; T4 cultivé et billonné, en maïs ; et le sol cultivé et billonné : S6 à nu et S7 en maïs (tab. 4).

Tableau 4 : Variation des taux de ruissellement (R en %) et de perte en terre (E en kg/ha) en fonction des trois pluies les plus érosives et de leur indice d'érosivité (E.I30 en UIE).

Traitements->				Tepetate cultivé				Sol cultivé	
Pluies				T1	T2	T3	T4	S6	S7
dates	Hmm	I30	EI30						
10.07	19	24,5	108	R : 83,4 E : -	48,2 -	0,6 -	0,1 74	14,8 554	14,7 677
13.07	30,2	24,7	170	R : 92,1 E : -	38,2 -	23,6 607	11,3 548	23,2 137	21,4 329
2.09	34,5	27,8	195	R : 88,1 E : -	48,3 339	8,9 232	2,1 102	0,2 108	1,2 58

Le taux de ruissellement est élevé et varie peu, de 83 à 92 %, sur tepetate naturel à nu. Il diminue entre 48 et 38 % sur tepetate défoncé. Mais il varie fortement sur tepetate et sur sols cultivés et billonnés, selon l'évolution de l'état de surface. La forte pluie du 10.07 s'infiltre bien sur le tepetate cultivé, deux jours après le premier sarclage ; la croûte structurale ne s'est pas encore assez développée pour réduire l'infiltration ; en conséquence l'érosion est infime. Mais

sur le sol cultivé le taux de ruissellement atteint près de 15 % et l'érosion de 554 à 677 kg/ha ; la fonte très rapide des agrégats y a réduit sensiblement l'infiltration. La forte pluie du 13.07, 5 jours après le sarclage, produit un ruissellement accru, aussi bien sur tepetate que sur sol cultivé : près de 23 % sur tepetate et sol cultivés, à nu ; le développement de la croûte structurale est alors suffisant pour réduire fortement l'infiltration et provoquer une érosion importante : 607 kg/ha sur tepetate cultivé à nu, mais seulement 137 kg/ha sur sol cultivé à nu, 329 kg/ha sur sol cultivé en maïs ; malgré une plus grande instabilité le sol semble moins érodible que le tepetate. L'effet de la couverture du maïs à ce stade végétatif (environ 1 mois de croissance) est peu sensible sur l'érosion, bien que le taux de ruissellement soit deux fois moindre (11 %) que sur tepetate cultivé à nu. La forte pluie du 2.09, 28 jours après le deuxième sarclage a un effet bien moindre que celle du 13.07, puisque le taux de ruissellement est faible : de 9 à 2 % sur tepetate, et de 1 % sur sol ; en conséquence le taux de perte en terre est faible : de 232 à 102 kg/ha sur tepetate et de 108 à 58 kg/ha sur sol. Pourtant le développement important des croûtes devrait réduire fortement l'infiltration. Peut-être est-ce la proximité temporelle des deux fortes pluies du 10 et du 13.07, qui a amplifié l'effet de la seconde, plus que le développement de la croûte structurale ? Il nous faudrait plus d'événements érosifs pour en faire une analyse plus cohérente.

5.2. Evolution de l'érosion suivant les périodes structurales

D'après les résultats de perte en terre relevés par G. Jérôme (1992) en 1991, sur les mêmes parcelles où elle a suivi l'évolution des états de surface (T3, T4, S6, S7), nous avons tenté d'établir une relation entre ces deux paramètres (tab. 5).

Tableau 5 : Evolution des pertes en terre (sédiments grossiers en kg/ha), suivant les périodes culturales, en 1991.

Périodes culturales	durée observée	Erosivité E.I30*	Tepetate cult.		Sol cultivé	
			nu	maïs	nu	maïs
Première	14 au 30.06	419	149,0	101,4	152,1	85,7
Premier saclage	5 au 8.07	151	15,4	11,3	52,9	11,0
Deuxième	9 au 23.07	375	653,2	564,1	906,5	1037,6
Troisième	1 au 13.09	408	342,1	164,6	154,0	69,9
Total des périodes obs.		1353	1159,8	841,4	1265,6	1200,2

* Erosivité des pluies en indice E.I30 (UIE) cumulé ; perte en terre kg/ha.

La première période d'observation (14 au 30.06) a été peu érosive : de 0,09 à 0,15 T/ha en 17 jours ; elle n'a pas présenté de fortes pluies, seulement quatre pluies faiblement érosives (E.I30 de 77 à 49 UIE les 19, 21, 23 et 26.06). De même la période de sarclage (5 au 8.07) : 0,01 à 0,05 T/ha en 4 jours, qui n'a présenté que deux pluies faiblement érosives (E.I30 de 58 et 66 UIE les 5 et 6.07). Mais la deuxième période (9 au 23.07), a été fortement érosive : 0,6 à 1 T/ha en 15 jours, par suite de deux pluies fortes et modérément érosives rapprochées (E.I30 de 108 et 170 UIE les 10 et 13.07) ; en relation avec un accroissement sensible du taux de ruissellement lors de la deuxième pluie érosive (Tab. 4). En revanche durant la troisième période, l'érosion a été faible : de 0,07 à 0,34 T/ha, malgré l'occurrence d'une forte pluie modérément érosive (E.I30 de 195 UIE le 2.09), mais isolée, et de trois pluies faiblement érosives (E.I30 de 56, 49 et 74 UIE les 3, 4 et 13.09).

Malgré la dégradation des états de surface conduisant à un encroûtement généralisé du billon et de l'interbillon pendant la 1ère et la 2ème périodes, il semble que l'impact du billonnage ait été très important et qu'il soit parvenu à réduire fortement la perte en terre de la parcelle, en provoquant le dépôt des sédiments dans l'interbillon, en condition de pluies faiblement érosives (E.I30 de 50 à 100 UIE), ou modérément érosives E.I30 de 100 à 200 UIE) isolées. Cependant deux pluies modérément érosives rapprochées en 2ème période ont accru fortement ruissellement et érosion.

Il y a donc une limite à l'efficacité du billonnage, qui se marque (observations de Y. Leroux, 1995) par la rupture du billon et le développement de griffes d'érosion, surtout à la partie aval des billons, orientés en faible pente vers l'exutoire de la terrasse. Cette limite est dépendante de l'intensité et de l'érosivité des pluies. Ainsi en 1991 sur deux autres stations de la région de Tlaxcala, l'occurrence de 4 à 5 pluies fortement érosives ($E.I30 > 400$ UIE), a multiplié par 4 (de 5 à 20 %) le taux moyen de ruissellement et par 25 (de 1 à 25 T/ha) le taux d'érosion, dans les mêmes conditions culturales, par rapport à une station faiblement érosive, analogue à celle de nos précédentes observations (Baumann 1992, Quantin et col. 1992).

La comparaison des traitements : tepetate cultivé à nu ou en maïs, ou sol cultivé à nu ou en maïs, (tab. 5), ne montre pas une différence significative entre tepetate et sol à nu (de 1,12 à 1,2 T/ha) ; il y a seulement une légère diminution de la perte en terre sur la parcelle de tepetate en maïs, mais pas sur la parcelle de sol. L'effet de la couverture de maïs a été peu marqué, sinon légèrement sur le tepetate dont les agrégats sont plus stables que ceux du sol naturel.

Le premier sarclage n'a pas accru, mais réduit la perte en terre : ceci est dû à l'amélioration de l'infiltration et aussi à l'absence de fortes pluies pendant ce travail du sol.

La comparaison des traitements tepetate cultivé "à plat" et laissé à nu ou billonné et laissé à nu sur la même station en 1991 (Arias et al. 1992) a montré que le taux d'érosion est de 21,9 T/ha soit près de vingt fois plus élevé sans billon. Dans ce cas l'effet de la dégradation structurale et de l'encroûtement sur l'érosion n'est plus contrôlé par l'obstacle des billons ; il se manifeste même en l'occurrence de pluies faiblement érosives, où la culture à plat produit dix fois plus de perte en terre que la culture en billon (G. Jérôme, 1992).

CONCLUSION

Il y a donc une évolution importante et rapide des états de surface aussi bien du tepetate que du sol cultivés. Cette évolution consiste en une dégradation des agrégats et en une redistribution des particules détachées sous l'effet des fortes pluies. Cette évolution suit un cycle bien connu (Casenave et Valentin 1989), à savoir : désagrégation et fonte des agrégats fins sur les billons et formation d'une croûte structurale ; puis accroissement du ruissellement et formation d'une croûte d'érosion sur le haut des billons ; alors commence la redistribution vers l'interbillon, formant d'abord une croûte de ruissellement irrégulière et granuleuse, puis lorsque le drainage diminue et la sédimentation se ralentit quelques plages de croûte de décantation d'un limon argileux. Si le flux déborde quand l'interbillon devient peu perméable et la pluie trop forte, les billons sont disséqués par des griffes d'érosion, en aval des parcelles.

Cette évolution est plus rapide sur le sol cultivé, dont les agrégats sont très instables et fondent totalement, que sur tepetate où la fonte des agrégats n'est que partielle. Dans ce cas seuls les agrégats inférieurs à 2 mm fondent totalement et contribuent à la formation de croûtes et à l'érosion. Ce qui explique que dans le cas du tepetate, au contraire du sol, la fonte des agrégats est peu dépendante de l'érosivité des pluies, donc de l'effet splash. Cependant la dégradation par fonte des agrégats et encroûtement dans le cas du tepetate cultivé s'accélère en fonction de la répétition du travail du sol suite aux deux opérations de sarclage, et celles de désherbage et de buttage du maïs.

En effet ces opérations répétées diminuent la taille des agrégats et accroissent la fraction inférieure à 2 mm. L'effet améliorant du sarclage sur la porosité et l'infiltration est instable et fugace. Les mesures de porosité et de vitesse d'infiltration à différentes périodes mettent clairement en évidence une évolution cyclique à chaque période dans le sens d'un compactage et d'une forte diminution de l'infiltration, surtout dans la partie interbillon. Les mesures de hauteur relative de la surface à différentes périodes permettent aussi de suivre le sens de cette évolution, négative sur les billons, positive dans l'interbillon, mais globalement négative sur l'ensemble de la surface. Plus que le seul effet de la perte en terre, il s'agit d'un tassement généralisé de 2 à 3 cm de hauteur en moyenne en un cycle complet de culture.

La conséquence sur le ruissellement et l'érosion de l'évolution des états de surface n'a pu être analysée en détail, faute de données précises sur les taux de ruissellement et d'érosion pour chaque événement érosif. Cette étude reste à faire. Cependant nous avons établi quelques relations à propos de trois pluies érosives en 1991, et des résultats de mesures de sédimentation grossière pendant les périodes d'observation des états de surface en 1991.

Sur le tepetate et le sol cultivés en billon, laissés à nu ou plantés en maïs, l'effet anti-érosif du billon est déterminant en condition de pluies faiblement érosives, ou modérément érosives mais espacées. Le ruissellement et l'érosion n'augmentent (à l'échelle de la parcelle) que lorsqu'il y a deux fortes pluies rapprochées ; ou bien comme nous l'avons observé ailleurs (Baumann 1992) en cas de pluies fortement érosives qui vont provoquer la rupture des billons. En condition de pluies faiblement érosives, l'effet protecteur du couvert de maïs est peu évident sur sol cultivé et très léger sur tepetate cultivé. L'effet d'un apport de fumure organique en surface semble avoir ralenti la fonte des agrégats et la dégradation des états de surface. Cet effet est probablement passif, à l'égal d'un mulch de paille ou d'un filet protecteur qui réduisent l'effet splash. De toute manière en condition de pluies faiblement érosives ou modérément érosives et espacées, l'effet anti-érosif du billon est plus déterminant que l'évolution des états de surface et même du couvert végétal. En revanche en culture "à plat" et à nu l'érodibilité du tepetate cultivé est importante même en condition de pluies faiblement érosives, puisqu'elle est au moins vingt fois supérieure au tepetate cultivé en billon. Sans billon il est probable que l'effet des états de surface est beaucoup plus significatif. Cependant en condition de pluies fortement érosives le billon ne pourra plus remplir son rôle protecteur, seulement retarder l'échéance ; dans ce cas les états de surface (avec ou sans billon) et le couvert végétal pourront jouer un rôle déterminant.

REFERENCES

ARIAS H., MIRANDA M.E., et GABRIELS D., 1992 - Dinámica de la erosión en tepetates roturados. Terra, vol. 10 : 370-373.

ARIAS H. et MIRANDA M.E., 1992 - Rapport annexe au rapport final du contrat CEE-ORSTOM n° TS2-0212C.

BAUMANN J., 1992 - Investigaciones sobre la erodibilidad y el regimen hídrico de los duripanes (tepetates) rehabilitados para los cultivos, en el broque de Tlaxcala. Rapport final annexe pour le contrat CEE-ORSTOM n° TS2-0212C.

CASENAVE A. et VALENTIN C., 1989 - Les états de surface de la zone sahélienne ; influence sur l'infiltration. Ed. ORSTOM, Coll. Didactiques, 229 p.

JEROME G., 1992 - Etude des réorganisations superficielles sous pluies naturelles sur un sol volcanique induré, dans la Vallée du Fleuve Texcoco au Mexique ; Comparaison avec un sol non induré. Mémoire de fin d'études Inst. Sup. Techn. Outre-Mer, juin 1992, 191 p.

LEROUX Y., 1995 - Suivis de réorganisations superficielles de parcelles de sol et de tepetate (Texcoco-Mexique). Mémoire de fin d'études Inst. Sup. Techn. Outre-Mer, juin 1995, 76 p.

OROPEZA J.L. et al., 1995 - Contribution au rapport scientifique 1994 du contrat CEE-ORSTOM n° ERB-TS3*CT930252, intitulé "Régénération et conservation de sols volcaniques indurés et stériles d'Amérique Latine : Chile, Ecuador, Mexico", Quantin et col. mars 1995.

QUANTIN P. et col., 1992 - Rapport scientifique final du contrat CEE-ORSTOM n° TS2-A202C intitulé "Etude des sols volcaniques indurés "Tepetates" des Bassins de Mexico et de Tlaxcala, en vue de leur réhabilitation agricole" ; juin 1992, 77 pages.