

Sécheresse et érosion au Sahel

Il paraît logique de penser que, lorsque les pluies diminuent, les risques d'érosion hydrique des sols s'atténuent et ceux d'érosion éolienne augmentent. En fait, l'exemple du Sahel montre que les pluies, moins abondantes mais encore intenses, désagrègent les sols en surface et les sensibilisent ainsi à l'érosion éolienne. Ce raisonnement néglige aussi les modifications des états de surface des sols et leur moindre perméabilité, conséquences d'une végétation plus clairsemée, du fait non seulement de la sécheresse, mais aussi de la surexploitation du milieu par l'homme.

La plupart des études d'érosion ont été entreprises dans des régions où les enjeux économiques exigent le maintien, voire l'amélioration, des ressources en sol : grandes plaines américaines, régions limoneuses du nord de l'Europe et de Chine... Dans les régions tropicales, la priorité a été accordée aux zones suffisamment humides pour produire des cultures d'exportation (arachide, coton, ananas...). Aussi a-t-il fallu les grandes sécheresses du Sahel, et la sensibilisation du grand public aux problèmes de désertification, pour que soient lancés des programmes d'étude de l'érosion dans les zones sèches d'Afrique de l'Ouest. Cet article se propose de tirer quelques enseignements de ces travaux. Après avoir rappelé certaines données sur la sécheresse au Sahel, il abordera ses conséquences sur les changements de structure à la surface du sol ainsi que les érosions hydrique et éolienne qui présentent de fortes interactions.

Les sécheresses

L'analyse statistique des séries climatiques depuis le début du siècle fait apparaître trois grandes périodes [1-4] :

– jusqu'aux années 40, la variabilité interannuelle des pluies est élevée mais les périodes de sécheresse (1911-1914, 1941-1942, 1947-1949) n'excèdent pas deux ou trois ans ;

– de 1940 à 1968, la région connaît une période de pluviosité excédentaire ;

– depuis, les pluies demeurent inférieures aux moyennes établies depuis le début des relevés, avec deux sécheresses très sévères en 1972-1974 et 1983-1985. Cette aridification du climat s'est traduite par un décalage vers le sud des isohyètes, nettement plus marqué au nord qu'au sud (près de 500 km pour l'isohyète 100 mm et 100 km pour l'isohyète 1 000 mm [5]). Parallèlement, l'isoligne séparant les vents rapides, très érosifs, des vents plus calmes est passée sensiblement du 15° au 13° N parallèle [6].

Cette aridification va-t-elle se poursuivre au cours des prochaines années ? Il n'entre pas dans l'objectif de cet article de passer en revue les différentes théories sur les causes de la sécheresse. Précisons toutefois qu'elles mènent à des conclusions contradictoires quant aux évolutions climatiques futures. L'étude du Quaternaire récent indique que le Sahel a subi des changements climatiques dans un passé relativement proche : de 20 000 à 12 000 ans BP, le Sahara s'est étendu bien plus au sud que sa li-

CHRISTIAN VALENTIN

Orstom
BP 11416
Niamey, Niger

Sécheresse n° 3, vol. 5, septembre 94

ORSTOM Fonds Documentaire

191

N° 44.204 ex 1

Cote : B

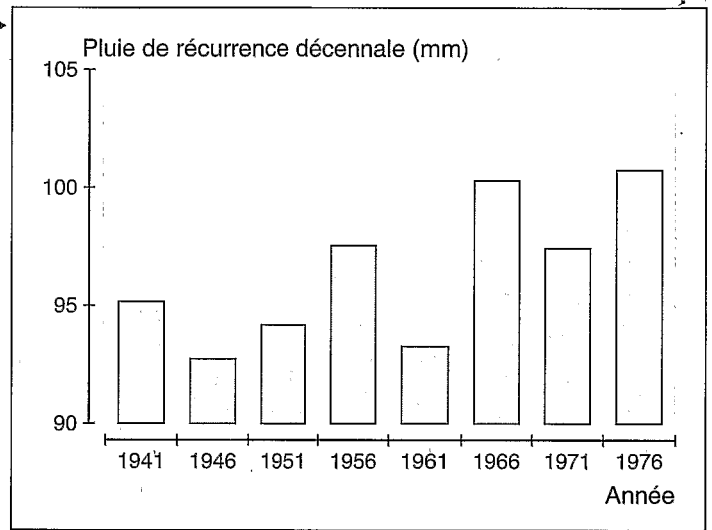
M P6

22 MARS 1995

Références

1. Lamb PJ. Persistence of subsahara drought. *Nature* 1982 ; 299 : 46-7.
2. Olivry JC. Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Sénégambie et aux îles du Cap-Vert. Examen de quelques séries de longues durées (débits et précipitations). *Cah Orstom Sér Hydrol* 1983 ; 20 : 47-69.
3. Ojo O. Rainfall trends in West Africa. In : Solomon SI, Beran M, Hogg W, eds. *The influence of climatic change and climatic variability on the hydrologic regime and water resources*. IAHS publ 1987 ; 168 : 47-69.
4. Sircoulon J. Bilan hydropluviométrique de la sécheresse 1968-1984 au Sahel et comparaison avec les sécheresses des années 1910-1916 et 1940-1949. In : *Les hommes face aux sécheresses*. Paris : Est-lheal, 1989 : 107-14.
5. Le Borgne J. La dégradation actuelle du climat en Afrique, entre Sahara et Équateur. In : Richard JF, éd. *Dégradation des paysages en Afrique de l'Ouest*. Université de Dakar, 1990 : 17-36.
6. Iroplo C. Travaux inédits, 1994.
7. Maley J. *Études palynologiques dans le bassin du Tchad et paléoclimatologie de l'Afrique nord-tropicale de 30 000 ans à l'époque actuelle*. Paris : Orstom, 1981, Coll. Travaux et Documents 129 ; 586 p.
8. Albergel J. *Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Du m² au km², étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution*. Thèse. Univ Paris, 1987 ; 336 p.
9. Perez P. *Genèse du ruissellement sur les sols cultivés du Sud Saloum (Sénégal). Du diagnostic à l'aménagement de la parcelle*. Thèse. Montpellier : Ensam, 1994 ; 250 p.
10. Yu B, Neil DT. Long-term variations in regional rainfall in the south-west of Western Australia and the difference between average and high intensity rainfalls. *Int J Climatology* 1993 ; 13 : 77-88.
11. Gavaud M. Nature et localisation de la dégradation des sols au Sénégal. *Cah Orstom Sér Hydrol* 1989 ; 25 : 253-62.
12. Yoder RE. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *J Amer Soc Agron* 1936 ; 28 : 337-51.
13. Hénin S, Monnier G, Combeau A. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann Agron* 1958 ; 1 : 71-90.
14. Le Bissonnais Y. *Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies*. Thèse. Univ Orléans, 1988 ; 225 p.
15. Bajracharya RM, Lal R. Seasonal soil loss and erodibility variation on a Miamian silt loam soil. *Soil Sci Soc Am J* 1992 ; 56 : 1560-5.
16. Valentin C, Janeau JL. Les risques de dégradation structurale de la surface des sols en savane humide. *Cah Orstom Sér Hydrol* 1989 ; 25 : 41-52.

Figure 1. Évolution entre 1934 et 1983 de la pluie décennale mesurée à Ouagadougou (Burkina Faso). Chaque donnée correspond à la moyenne glissante calculée sur 15 ans avec un pas de temps de 5 ans (d'après Albergel [8]).



mite actuelle comme en témoignent les dunes aujourd'hui fixées du Sahel. Entre 12 000 et 7 000 ans BP, les pluies redevinrent plus abondantes, permettant notamment la formation d'un très grand lac dans la cuvette tchadienne, le « Méga-Tchad ». [7]. Depuis environ 4 500-5 000 ans, la tendance s'est à nouveau inversée.

Si la hauteur de pluie annuelle constitue un indicateur important de sécheresse, c'est davantage la fréquence des pluies de forte intensité qui détermine la gravité de l'érosion hydrique. Or, aucune relation n'a pu être établie entre la diminution de la hauteur de pluie annuelle et la fréquence de ces pluies intenses. L'analyse des pluies journalières de vingt postes climatiques du Burkina Faso, relevées pendant cinquante ans, a montré qu'en dépit d'une diminution de la hauteur annuelle de pluie, très sensible depuis 1969, aucune réduction de l'intensité et de la hauteur des pluies de fréquence décennale n'avait été observée [8]. Dans certains cas, la hauteur de la pluie décennale avait même tendance à augmenter (figure 1). Des résultats tout à fait analogues ont été observés à Niour du Rip, au Sénégal [9], sur une série climatique de soixante ans (1932-1992) et dans le sud-ouest de l'Australie sur des séries pluviométriques de soixante-dix à quatre-vingts ans [10].

Dégradation de la structure superficielle des sols

Plusieurs mécanismes interviennent dans l'érosion : le détachement, le transport et le dépôt. Sauf cas exceptionnels, le ruissellement et le vent ne peuvent pas directement entraîner les agrégats de

terre. Ceux-ci doivent, au préalable, être fractionnés en micro-agrégats ou en particules élémentaires (sable, limon, argile). Il s'agit du processus de désagrégation. Soit les produits de cette désagrégation sont entraînés par le vent ou le ruissellement, soit ils se réorganisent sur place, ou à faible distance, et forment des croûtes superficielles. Force est de constater que les sécheresses récentes ont provoqué une très forte extension des croûtes superficielles au Sahel [11].

Instabilité structurale

Comment la sécheresse peut-elle influencer les principaux facteurs d'instabilité structurale ? Dans une large mesure, l'état hydrique de la surface du sol avant les pluies conditionne sa résistance à la désagrégation. En effet, l'humectation rapide de sols secs provoque la compression de l'air dans les pores fermés et l'éclatement des agrégats [12,13]. Des agrégats préalablement humectés résistent donc mieux à ce processus [14]. Ainsi, en climat tempéré, à intensité égale, une pluie tombant en été sur un sol sec favorise davantage l'encroûtement superficiel et l'érosion qu'une pluie survenant en hiver sur un sol humide [15]. En zone tropicale, la dessiccation rapide de la surface du sol augmente donc les risques de désagrégation [16].

D'autres facteurs peuvent être invoqués pour expliquer, en région tempérée, une stabilité structurale plus élevée après une période sèche, comme l'augmentation de la cohésion du fait d'un meilleur contact interparticulaire [17, 18]. En région sahélienne, où prédominent les sols à surface sableuse, cet effet stabilisant intervient peu.

Il est bien établi que le stock organique de l'horizon superficiel accroît la stabili-

Références

17. Kemper WD, Roseneau RC, Dexter AR. Cohesion development in disrupted soils as affected by clay and organic matter and temperature. *Soil Sci Soc Am J* 1987 ; 51 : 860-7.

18. Mulla DJ, Huyck LM, Reaganold JP. Temporal variations in aggregate stability on conventional and alternative farms. *Soil Sci Soc Am J* 1992 ; 56 : 1620-4.

19. Combeau A, Quantin P. Observations sur les relations entre stabilité structurale et matière organique dans quelques sols d'Afrique centrale. *Cah Orstom Sér Hydrol* 1964 ; 2 : 3-11.

20. Charreau C, Nicou R. L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche ouest-africaine et ses incidences agronomiques. *Agron Trop* 1971 ; 26 : 903-78, 1183-247.

21. Sebillotte M. Stabilité structurale et bilan hydrique du sol. Influence du climat et de la culture. *Ann Agron* 1968 ; 19 : 403-14.

22. Boiffin J. Histoire hydrique et stabilité structurale de la terre. *Ann Agron* 1976 ; 27 : 447-63.

23. Combeau A, Quantin P. Observations sur les variations dans le temps de la stabilité structurale des sols, en région tropicale. *Cah Orstom Sér Hydrol* 1963 ; 1 : 17-26.

24. Pieri C. *Fertilité des terres de savane. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara*. Paris : ministère de la Coopération/Cirad, 1989 ; 444 p.

25. Albergel J, Valentin C. Sahéliisation d'un petit bassin versant soudanien : Kognere-Boulsa au Burkina-Faso. In : Bret B., éd. *Les hommes face aux Sécheresses, Nordeste brésilien - Sahel africain*. Paris : l'heal, Coll. Travaux et Mémoires, 1988 ; 42 : 179-91.

26. Serpantie G, Tezenas du Montcel L, Valentin C. La dynamique des états de surface d'un territoire agropastoral soudano-sahélien sous aridification climatique : conséquences et propositions. In : *L'aridité : une contrainte pour le développement*. Paris : Orstom, 1991 ; Coll Didactiques : 419-47.

27. Feller C, Fritsch E, Poss R, Valentin C. Effet de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques (Afrique de l'Ouest, en particulier). *Cah Orstom Sér Pédol* 1991 ; 26 : 25-36.

28. Chen Y, Tarchitzky J, Brouwer J, Morin J, Banin A. Scanning electron microscope observations on soil crusts and their formation. *Soil Science* 1980 ; 130 : 49-55.

29. Hanna FS, Stoops GJ. Contribution to the micromorphology of some saline soils of the north Nile delta in Egypt. *Pédologie* 1976 ; 26 : 55-73.

30. Valentin C. Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région sub-saharienne (Agadez-Niger). *Dynamique de formation et conséquences sur l'économie en eau*. Thèse. Univ Paris, 1981 ; 259 p.

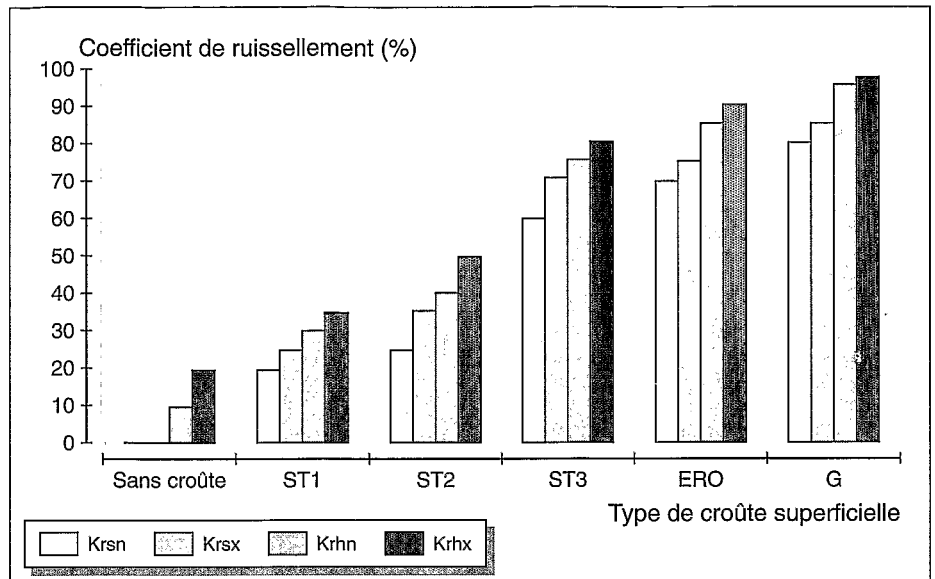


Figure 2. Coefficient de ruissellement (rapport de la lame ruisselée sur la hauteur de pluie, en %) pour différents types de croûtes superficielles et différents états hydriques initiaux (d'après Casenave et Valentin [40]).

Krsn : coefficient de ruissellement minimum pour un état hydrique initial sec.

Krsx : coefficient de ruissellement maximum pour un état hydrique initial sec.

Krhn : coefficient de ruissellement minimum pour un état hydrique initial humide.

Krhx : coefficient de ruissellement maximum pour un état hydrique initial humide.

té structurale en ralentissant l'humectation brutale des sols secs et, donc, les risques d'éclatement [19, 20]. Cet effet s'avère d'autant plus efficace que la matière organique est hydrophobe [21]. Or, l'hydrophobie des composés orga-

niques augmente avec la sécheresse [22]. La stabilité structurale passe ainsi par un maximum en fin de saison sèche [23].

Toutefois, cet effet positif de la sécheresse sur la structure du sol se trouve anni-

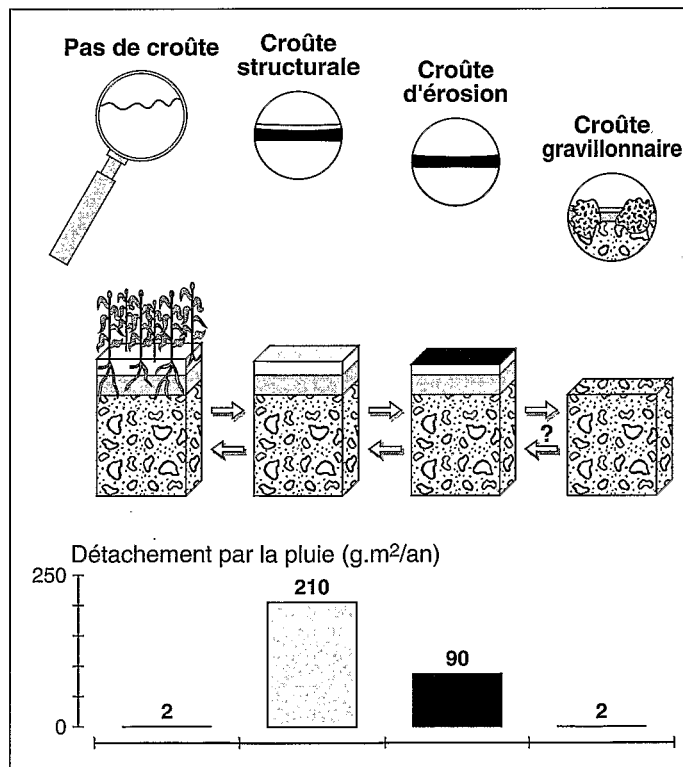


Figure 3. Évolution dans le temps de l'encroûtement superficiel et du décapage par l'érosion des premiers horizons du sol au Sahel. Conséquences pour l'érosion hydrique, calculée à partir de résultats de simulation de pluie sur 1 m², une pente de 2,5 % et une érosivité donnée (R = 250) (d'après Valentin [30], Collinet et Valentin [39]).

Références

31. Collinet J. *Comportements hydrodynamiques et érosifs de sols de l'Afrique de l'Ouest*. Thèse. Univ Strasbourg, 1988 ; 521 p.
32. Valet S. *Mission d'évaluation du projet « expérimentation-développement des terrasses du Niger »*. Niamey, 1990 ; 56 p.
33. Valentin C. Surface crusting of arid sandy soils. In : Callebaut F, Gabriels D, De Booot M, eds. *Assessment of soil surface sealing and crusting. Proc of the Symposium held in Ghent, Belgium, 1985*. Ghent : Flanders Research Centre for Soil Erosion and Soil Conservation, 1986 : 9-17, 40-7.
34. Hartmann C. *Évolution et comportement des sols sablo-argileux ferrallitiques sous culture de palmiers à huile (Côte d'Ivoire)*. Thèse. Univ Paris, 1991 ; 260 p.
35. Poss R, Pleuvret C, Saragoni H. Influence des réorganisations superficielles sur l'infiltration dans les terres de barre (Togo méridional). *Cah Orstom Sér Pédol* 1989 ; 25 : 405-15.
36. Pleuvret C. *Évolution des états de surface sur sols cultivés au Sud Togo. Caractérisation des facteurs conditionnant le ruissellement*. Thèse. Univ Paris, 1994 ; 284 p. + ann.
37. Bresson LM. Travaux inédits, 1994.
38. Bouvier C. *Analyse et modélisation des écoulements en milieu urbain africain*. Paris : Orstom, 1990. Coll. Études et Thèses ; 313 p. + app.
39. Collinet J, Valentin C. Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications agronomiques. *Cah Orstom Sér Pédol* 1979 ; 17 : 283-328.
40. Casenave A, Valentin C. *Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*. Paris : Orstom, 1989, Coll Didactiques ; 230 p.
41. Valentin C. Surface sealing as affected by various rock fragments covers in West Africa. *Catena* 1994 ; 11 p.
42. Casta P, Chopart JL, Janeau JL, Valentin C. Mesure du ruissellement sur un sol gravillonnaire de Côte d'Ivoire après six ans de culture continue avec ou sans labour. *Agron Trop* 1989 ; 44 : 255-62.

hilé par la faiblesse des teneurs en matière organique, tombées le plus souvent en dessous de 0,5 %. Pour les sols sableux, les plus fréquents en zone sahélienne, une faible diminution du taux de matière organique entraîne une forte dégradation de la structure [24]. La sécheresse a provoqué une diminution des teneurs en matière organique, non seulement sous l'effet de la réduction du couvert végétal, mais aussi de l'activité biologique des sols. Or, face à une diminution des rendements, les paysans tendent à accroître les surfaces cultivées, ce qui revient, très souvent, à réduire la durée des jachères [25, 26]. De plus, la culture prolongée entraîne elle aussi une diminution sensible des teneurs en matière organique [27].

Les types de croûtes

Des mécanismes complexes relient la sécheresse à l'encroûtement superficiel, au ruissellement et à l'érosion. Pour les analyser, il convient, en premier lieu, de caractériser différents types de croûtes. Les processus de formation permettent de les classer en deux grands groupes [28] : les croûtes structurales et les croûtes de dépôts. Tandis que les premières résultent d'une réorganisation *in situ*, les secondes sont constituées d'éléments qui ont subi un transport. En fait, une gamme plus large de croûtes superficielles a été identifiée au Sahel. Après les avoir brièvement caractérisées, nous aborderons leurs liens avec la sécheresse.

- Trois grands types de croûtes structurales peuvent être distingués en fonction du nombre et de la nature de leurs micro-horizons.

Le premier est formé de croûtes structurales à un micro-horizon, appelées aussi croûtes de désagrégation, qui sont constituées d'un seul micro-horizon formé d'éléments fins (ST1). S'y décèle

une certaine rugosité due aux reliques d'anciens agrégats. Ce type de croûte se forme dans les matériaux suffisamment riches en argile (> 15-20 %). Les processus, outre l'éclatement des agrégats lors de leur humectation rapide à l'état sec, peuvent mettre en jeu le gonflement et la sursaturation [29-31]. La combinaison de ces deux processus favorise la formation de microcoulées boueuses qui colmatent la macroporosité interagrégats. Certes, l'impact des gouttes de pluies accélère l'effondrement de la structure, mais cette désagrégation, liée à l'humectation brutale d'un sol initialement sec, peut intervenir sans que la surface soit soumise à l'énergie cinétique de pluies. Tel est le cas, par exemple, des sols irrigués par gravité [32].

Le deuxième grand type de croûtes structurales est composé d'organisations présentant un tri granulométrique vertical en :

- deux micro-horizons (ST2) : quelques millimètres de sables recouvrent une pellicule fine, dure et plasmique (constituée d'éléments fins) ;
- trois micro-horizons (ST3) : un micro-horizon superficiel de sable grossier recouvre un micro-horizon intermédiaire de sable fin. À la limite entre les sables fins et la pellicule plasmique sous-jacente, des vésicules se distinguent même à l'œil nu.

Ces deux types de croûtes couvrent des surfaces très importantes au Sahel car elles affectent surtout les sols sableux (moins de 15 à 20 % d'argile en surface). Elles se développent sous l'effet de l'impact des gouttes de pluies. Celles-ci forment de petits cratères dont la profondeur est d'autant plus grande que le sol a une cohésion faible. Criblés d'impacts, les premiers millimètres subissent un effet de tamis ; en dessous, le matériau se tasse [30, 33]. Les parois des

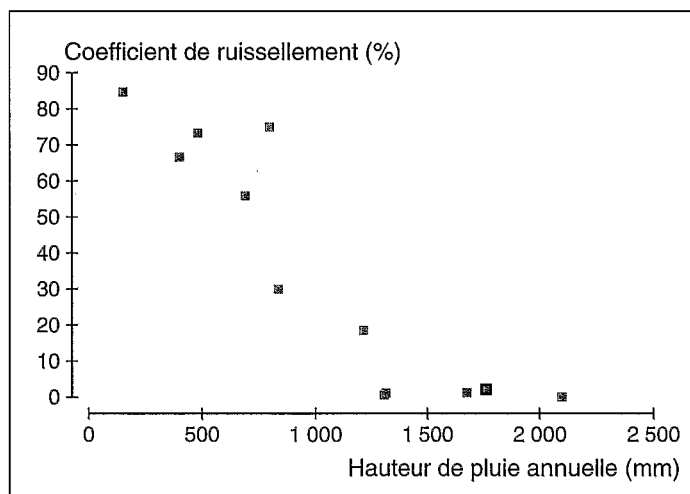


Figure 4. Influence de la pluviosité annuelle sur le coefficient de ruissellement moyen [d'après Valentin [30] et Collinet [31]].

Références

43. Valentin C. Surface crusting in two alluvial soils of northern Niger. *Geoderma* 1991 ; 48 : 201-22.

44. Le Feyre J. *L'évaporation au sein de sols sableux du Niger au cours de la saison humide*. Rennes : DEA Ensa, 1993 ; 43 p. + app.

45. Valentin C. Effects of grazing and trampling on soil deterioration around recently drilled water-holes in the Sahelian zone. In : El Swaify SA, Moldenhauer WL, Lo A, eds. *Soil erosion and conservation*. Ankeny : Soil Conservation Society of America, 1985 : 51-65.

46. Le Houérou HN. *The grazing land ecosystems of the African Sahel*. Ecological Studies ; 75. Berlin : Springer Verlag, 1989 ; 282 p.

47. Collinet J, Valentin C. Evaluation of factors influencing water erosion in West Africa using rainfall simulation. In : *Challenges in African Hydrology and Water Resources*. IAHS Publ 1985 ; 144 : 451-61.

48. Mougenot B, Timouk F. 1994. Suivi de la dégradation des états de surface et des sols par télédétection autour de la ville de Niamey au Niger. *XV^e Congrès international de science du sol*. Acapulco, Mexique, juillet 1994 (sous presse).

49. White WR. Reservoir sedimentation and flushing. *IAHS Publ* 1990 ; 194 : 129-39.

50. Shahin MMA. An overview of reservoir sedimentation in some Africa river basins. *IAHS Publ* 1993 ; 217 : 93-100.

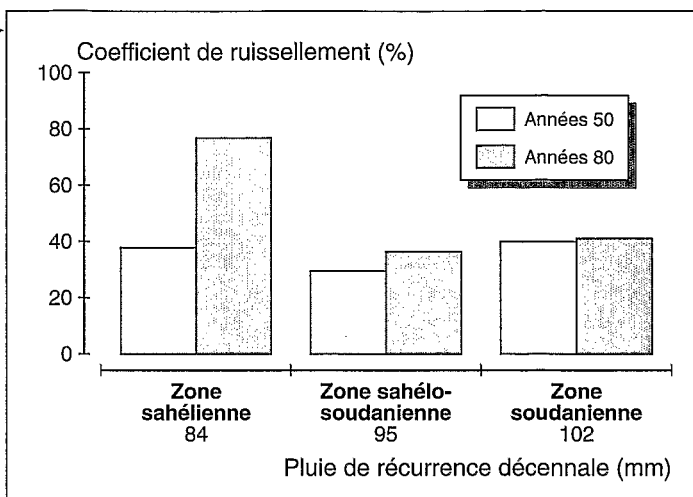
51. Serpantie G, Tezenas du Montcel L, Valentin C. La dynamique des états de surface d'un territoire agropastoral soudano-sahélien sous aridification climatique : conséquences et propositions. In : *L'aridité : une contrainte pour le développement*. Paris : Orstom, 1991, Coll. Didactiques : 419-47.

52. Fryrear DW. Soil cover and wind erosion. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 1985 ; 28 : 781-4.

53. McTainsh GH. Harmattan dust deposition in northern Nigeria. *Nature* 1980 ; 286 : 587-8.

54. Middleton NJ, Goudie AS, Wells GL. The frequency and source areas of dust storms. In : Nikling WG, ed. *Eolian geomorphology*. 1986 : 237-59.

Figure 5. Évolution entre les années 50 et 80 des coefficients de ruissellements calculés pour la pluie décennale sur trois bassins versants correspondant à trois zones climatiques du Burkina Faso [d'après Albergel [8]].



microcratères se trouvent ainsi tapissées de particules fines à la base, grossières en surface. Peu à peu, ces microcratères deviennent coalescents, et les deux (ou trois selon la granulométrie du sol) micro-horizons se forment. Précisons que ces croûtes, identifiées et reconstituées expérimentalement sous simulation de pluie au Sahel [30], s'avèrent davantage caractéristiques des sols sableux dénudés que des zones arides puisqu'elles ont été signalées en zones tropicales humides [16, 34-36], en milieu tempéré (dans une clairière en forêt de Rambouillet [37]), et même en milieu urbain [38].

Le troisième grand groupe de croûtes structurales concerne les croûtes gravillonnaires (G), les pavages désertiques ou « regs ». Leur organisation se distingue de celle de ST3 par l'inclusion d'éléments grossiers (de la taille de gravillons jusqu'à celle de galets), par une

épaisseur plus marquée de la pellicule plasmique et par un développement très net de la porosité vésiculaire. Ce type de croûte n'est fréquent que dans les zones sèches, même s'il a pu localement être identifié dans des zones plus arrosées, comme sur les collines dénudées de Bangui par exemple. En effet, dans les régions humides où prédominent les argiles de la famille de la kaolinite et les gravillons produits par le démantèlement des cuirasses, ces éléments grossiers demeurent le plus généralement libres à la surface du sol où ils tendent à favoriser l'infiltration [39-41]. En faisant remonter à la surface des gravillons des horizons plus profonds, le travail du sol tend ainsi à le protéger de l'encroûtement superficiel [42].

- Trois grands types de croûtes de dépôts peuvent également être distingués :
 - les croûtes de dépôt éolien, consti-

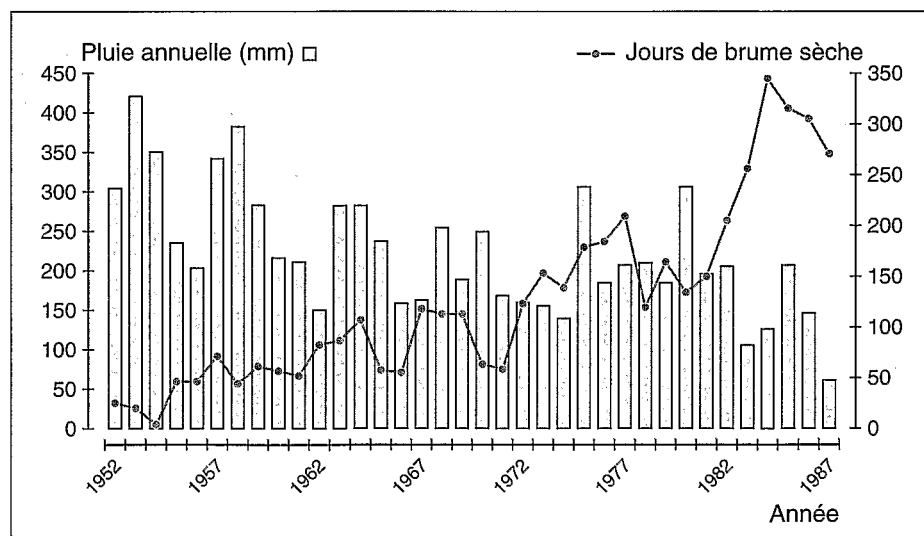


Figure 6. Évolution de la pluviosité annuelle et du nombre de jours de brume sèche entre 1952 et 1987 à Gao [d'après N'Tchayi [55]].

Références

55. N'Tchayi MG. *Étude statistique des brumes sèches au-dessus du Sahara à partir des réductions de visibilité au sol*. DEA, Univ Abidjan, 1988.
56. Prospero JM, Nees RT. Dust concentration in the atmosphere of the equatorial North Atlantic: possible relationship to the Sahelian drought. *Science* 1977 ; 196 : 1196-8.
57. Mann R. Development and the Sahel disaster: the case of Gambia. *The Ecologist* 1987 ; 17 : 84-90.
58. McTainsh GH. A dust monitoring programme for desertification control in West Africa. *Environmental Conservation* 1986 ; 13 : 17-25.
59. Orange D, Gac JY. Bilan géochimique des apports atmosphériques en domaines sahélien et soudano-guinéen d'Afrique de l'Ouest (bassins supérieurs du Sénégal et de la Gambie). *Géodynamique* 1990 ; 5 : 51-65.
60. Moberg JP, Esu IE, Malgwi WB. Characteristics and constituent composition of Harmattan dust falling in Northern Nigeria. *Geoderma* 1991 ; 48 : 73-81.
61. Ambouta JMK. *Étude des facteurs de formation d'une croûte d'érosion et de ses relations avec les propriétés internes d'un sol sableux fin au Sahel*. Univ Laval, Québec, 1994 ; 97 p.
62. McTainsh GH, Rose CW, Okwach GE, Palis RG. Water and wind erosion : similarities and differences. In : Hurni H, Tato K, eds. *Erosion, conservation, and small-scale farming*. Marceline : Walsworth Publ. Comp, 1992 : 107-19.
63. Oldeman LR, Hakkeling RTA, Sombroek WG. *World map of the status of human-induced soil degradation : an explanatory note*. Wageningen : ISRIC, Nairobi : UNEP, 1991 ; 34 p.
64. Planchon O, Rémy D, Valentin C. Un système d'information géographique sur l'Afrique de l'Ouest appliqué à l'étude des facteurs d'érosion. *XV^e Congrès international de science du sol*. Acapulco, Mexique, juillet 1994 (sous presse).

tuées de très nombreux lits de sables fins. Lorsque ces croûtes ne sont pas elles-mêmes reprises par l'érosion éolienne, elles évoluent souvent en ST2 ou ST3 ;

– les croûtes de ruissellement dans lesquelles alternent des lits de sables et d'argile très compacts. S'y développe très souvent une importante porosité constituée de vésicules. Celles-ci se forment à partir d'air emprisonné dans un milieu déformable. Elles témoignent d'une très faible infiltrabilité [40]. Ces petites bulles d'air, indépendantes les unes des autres, ne constituent pas en effet une porosité fonctionnelle quant à l'infiltration. Ces croûtes se forment dans les zones de ruissellement et recouvrent communément des croûtes structurales formées avant l'apparition du ruissellement [30, 43] ;

– les croûtes de sédimentation hydrique, qui se caractérisent par un tri granulométrique vertical très net, inverse de celui de ST3 : les sables se trouvent à la base, l'argile au sommet. Elles se forment lors de la décantation de sédiments dans l'eau au repos (flaques, mares). En séchant, elles se craquent et se fendent. La différence des tensions, liée au tri granulométrique, favorise souvent le rebroussement de squames superficielles. Quoique d'occurrence saisonnière, ces croûtes de fond de mares asséchées symbolisent, pour les médias, l'effet même de la sécheresse.

• À ces deux grands groupes de croûtes structurales et de dépôts a dû être ajouté un troisième : les croûtes d'érosion (ERO). C'est assurément la seule organisation superficielle qui soit d'emblée identifiée comme croûte superficielle par le plus grand nombre. Les pasteurs et les paysans l'appellent *zipelle* ou *vuigo* en more au Burkina Faso (terre blanche, ou vide), *gangani* en djarma, *ako* en haoussa au Niger, *harde* en foulani au Nord-Cameroun et *nage* en arabe du Tchad. Il s'agit d'un micro-horizon mince et dur, argileux et lisse bien que pouvant être craquelé. Il peut contenir quelques vésicules. Cette faible porosité entraîne une perméabilité très réduite tant à l'eau liquide (*figure 2*) qu'à l'eau vapeur : de 1 à 2 mm/jour même en fortes conditions évaporatoires [44]. Ces croûtes d'érosion se développent tant sur des sols argileux, limoneux que sableux, aux dépens de ST1, ST2 et ST3 :

– ST1 → ERO. Les produits de la désagrégation (particules élémentaires ou petits fragments d'agrégats) se déposent dans les microflaques qui apparaissent dès que la capacité d'infiltration de ST1 devient inférieure à l'intensité de la pluie (ou de l'apport en eau en cas d'irrigation). Lorsque la rugosité diminue sous l'effet de l'impact des pluies, ces flaques s'anastomosent et le ruissellement se généralise, entraînant sur des distances de

plus en plus grandes les produits de la désagrégation. Peu à peu, la surface devient lisse et concentre des éléments fins compactés, formant ainsi une croûte d'érosion ;

– ST2 ou ST3 → ERO. Une fois formés, les micro-horizons sableux subissent l'action du ruissellement et du vent. Affleure ainsi la pellicule plasmique qui, soumise directement à l'effet des pluies, se transforme en croûte d'érosion.

Dynamiques des états de surface

Précisons d'emblée que, si les processus décrits ici peuvent certes être accélérés par l'action de l'homme et du bétail, il n'en demeure pas moins qu'ils ont été mis en évidence également dans des zones mises en défens [45].

Examinons le cas d'un couvert herbacé, homogène tant que la pluviosité demeure suffisante. Survient une sécheresse. Le couvert herbacé se clairseme là où les ressources en eau demeurent suffisantes, disparaît ailleurs. Le sol nu se couvre de croûtes structurales, rapidement relayées par des croûtes d'érosion (*figure 3*). Le sable mobilisé lors de la formation des croûtes structurales subit la déflation et s'accumule là où subsistent des plantes herbacées, formant ainsi des microdunes. Si la pluviosité redevient suffisante, les versants de ces microdunes s'érodent, les sables recouvrent à nouveau la croûte d'érosion, piègent des graines et favorisent l'infiltration. Le couvert peut retrouver ainsi son état initial. Si la sécheresse persiste, où si les conditions pédologiques sont moins favorables que dans le cas précédent, la végétation des microdunes ne protège plus suffisamment le sol pour s'opposer à la formation de croûtes structurales, puis, le cas échéant, de croûtes d'érosion. Plusieurs niveaux de croûtes d'érosion peuvent s'étager ainsi. Les eaux de ruissellement se concentrent sur la croûte d'érosion la plus basse. Quoique relativement résistante à l'érosion en nappe (*figure 3*), celle-ci n'en subit pas moins l'érosion linéaire. Peu à peu, rigoles et ravines affouillent les horizons gravillonnaires sous-jacents où se forment des croûtes gravillonnaires. D'une surface couverte et perméable, cette spirale de dégradation conduit à une surface purement minérale à très faible capacité d'infiltration (*figures 2 et 3*). Cette dégradation progressive des facteurs d'infiltration conduit à une aridité accrue et à une auto-accelération du processus.

Pour une grande part, la réaction du milieu face à la sécheresse dépend donc des conditions morphopédologiques. La disparition des pérennes et la mort des ligneux laissant place à des « cimetières » d'arbres s'observent surtout sur des sols qui :

– présentent une forte sensibilité à l'en-