

# EROSION ET CONSERVATION DES SOLS

## Place de la Recherche française en régions tempérées et tropicales

E. ROOSE \*

Étymologiquement, éroder veut dire ronger... comme la maladie ronge un corps. Pourtant, l'érosion est un phénomène naturel et complexe. Il débute dès qu'une terre émerge de l'océan : il tend à raba-ter toute dénivellation et à réduire le paysage à l'état de pénéplaine (TRICART, 1953 à 1970). Il comprend trois phases — arrachement, transport et sédimentation — qui peuvent se développer simultanément, mais avec des intensités différentes, selon les sites d'un paysage (BIROT, 1981). Son étude à toutes les échelles fait appel à de nombreuses disciplines, mais nous nous limiterons ici à l'échelle du champ et du versant, plus particulièrement appropriée aux études des pédologues, agronomes et géomorphologues.

Dans les conditions naturelles, l'érosion « normale » est un phénomène lent ( $\pm 150$  kg/an ou 1 mètre par 100 000 ans) en équilibre avec la pédogenèse (20 000 à 100 000 ans pour altérer un mètre de granite : LENEUF, 1959). Cet équilibre peut être rompu naturellement, suite à des modifications climatiques ou orogéniques dont témoignent le rajeunissement des montagnes, les terrasses, les masses colluviales et alluviales (cf. théorie bio-rhexistase, ERHART, 1956) et peut-être également l'organisation structurale de certaines couvertures pédologiques (ex. Guyane : BLANCA-NEAUX, 1979 ; BOULET et al., 1979).

Cependant, en modifiant le couvert végétal, en arrachant le réseau racinaire à chaque défrichage et en exposant directement la surface du sol à l'énergie du vent, des pluies, du ruissellement et des engins mécaniques de plus en plus puissants (lourds), l'homme accélère considérablement (10 à 100 fois) les processus de dégradation physique, chimique et biologique des horizons humifères, les plus fertiles.

Toutes les civilisations ont été confrontées à cet obstacle qui barre la route au développement. C'est ainsi que naquirent empiriquement des techniques antiérosives adaptées aux circonstances écologiques et socio-économiques rencontrées : la culture itinérante dans les zones tropicales à faible densité de population, l'association de la cul-

ture et de l'élevage, de haies, de rideaux et de bocages dans les plaines des régions tempérées, les terrasses de diversion et l'agriculture mécanisée de la Grande Plaine américaine, les terrasses en gradins là où les terres sont rares et la main-d'œuvre bon marché (bassin méditerranéen, Asie, Amérique latine).

Pendant 7 000 ans, les hommes ont tenté de maîtriser l'érosion accélérée en créant des obstacles à l'énergie du ruissellement ; ils ignoraient le rôle de l'énergie des gouttes de pluie sur le déclenchement des processus érosifs (FOURNIER, 1960 ; STALLINGS, 1957). Il a fallu attendre les travaux de LAWS (1940) sur les caractéristiques des gouttes de pluie et ceux d'ELLISON (1944 à 1952) sur la battance des pluies pour ouvrir une ère nouvelle de recherches sur la lutte antiérosive, en particulier sur les méthodes biologiques visant à couvrir le sol. Mais ces idées nouvelles sur l'origine de l'érosion n'ont pas été accueillies favorablement par tous les chercheurs et les pionniers de la DRS. BENNET lui-même repoussait encore ce concept en 1951. « Les plus graves manifestations de l'érosion (ravines) ne sont-elles pas associées à l'énergie abrasive liée au ruissellement et à la fonte des neiges, aux sapements de berges et aux glissements de terrain ? » (HEUSCH, 1977).

En région méditerranéenne semi-aride, HEUSCH (1977) considère toujours que l'érosion en ravine ou en masse est 100 à 1 000 fois plus importante que l'érosion en nappe et rigole.

\* Directeur de recherches à l'ORSTOM, section Pédologie, 24, rue Bayard, 75008 Paris.

Face à ces deux approches (énergie de la pluie ou du ruissellement) qui influencent directement le choix des méthodes de lutte antiérosive (biologique ou mécanique), comment se situent les travaux des chercheurs français en France et outre-mer ? Comment ont évolué les méthodes d'investigation ? Quels sont les principaux résultats acquis et les voies nouvelles à explorer dans le domaine de l'érosion hydrique et de la conservation des sols. Voilà l'objet de cette brève note de synthèse ; qu'il ne me soit pas tenu rigueur s'il ne m'a pas été possible de citer tous les travaux publiés sur ce vaste sujet.

## LES ETUDES EN FRANCE

Depuis fort longtemps, on s'est préoccupé en France des problèmes d'érosion et d'aménagement des terres, comme en témoignent les paysages (rideaux, bocages, distribution spatiale des cultures) et les réglementations concernant l'exploitation des terrains qui remontent au moins jusqu'au XIV<sup>e</sup> siècle (HENIN, 1979). C'est en bordure de mer (fixation des dunes par BREMONTIER), en montagne et dans les vignobles que se sont d'abord révélés les problèmes les plus préoccupants ; dans les régions de grande culture, l'érosion est un phénomène récent en relation avec la mécanisation. Il faut aussi signaler des études générales entreprises par différents géographes mettant en lumière l'influence du climat et de la topographie (FOURNIER, 1910), de l'homme (NEBOIT, 1983) et de l'ensemble des facteurs de morphogénèse (GUENNELON, 1958 ; BIROT, 1981 ; TRICARD et CAILLEUX, 1953 à 1979).

### En montagne

Dès le début du XIX<sup>e</sup> siècle, un effort considérable s'est développé dans le domaine de la correction torrentielle et de la restauration des terres de montagne (DEMONTZEY et SURELL dans les Alpes, G. FABRE dans les Cévennes et L.A. FABRE et MARCHAND dans les Pyrénées). Actuellement, les recherches concernant le génie civil (ouvrages de régulation des débits liquides et solides) et le génie biologique (végétalisation des surfaces dénudées et des flancs de ravines) sont assurées par le CEMAGREF (1982-83), l'INRA et l'ONF (RTM).

Rares sont les études quantitatives du ruissellement et de l'érosion sur parcelles (CLAUZON et VAUDOUR près d'Aix-en-Provence, 1971) ou à l'aide de capteurs et de repères pour évaluer l'impact du défrichement et du pâturage sur fortes

pententes (KAIZER, 1981, sur le Galibier ; BILLARD, COSANDEY et MUXART dans les Cévennes).

A l'échelle des bassins, les études hydrologiques et géochimiques sont plus nombreuses, mais se heurtent à l'évaluation des transports solides, en particulier sur des sédiments de fond (pièges à sédiments ou barrages). Citons les programmes PIREN sur le Mont Lozère (Université d'Orléans, ENGREF) et le bassin de la Garonne (Université de Toulouse), le programme DRIX sur marnes noires par le CEMAGREF et le projet « PACA » (BRGM-ORSTOM).

Il est clair qu'en montagne, la cause principale de l'érosion est l'énergie du ruissellement qui provoque ravinements, creusements du lit et des berges des rivières, glissements de terrain, en particulier à la fonte des neiges. Cependant, la dégradation de la couverture végétale augmente le ruissellement immédiat, donc les débits de pointe, et diminue la résistance de la couverture pédologique et l'angle d'équilibre des versants (DUPRAZ, LELONG, TROY et DUMAZET, 1983).

Il serait souhaitable de préciser le rôle du couvert végétal, des litières et de l'épaisseur du sol sur la dynamique de l'eau (en particulier lors des événements rares), sur les débits de pointe (risques d'inondation et d'érosion) et sur l'origine des transports solides.

### Les vignes sur coteaux

Dès leur création, ces vignobles ont connu des problèmes d'érosion (décapage de l'horizon superficiel, ravinement, inondations et dépôts boueux en aval), car la vigne couvre mal le sol et craint la concurrence hydrique en été. Les vignerons ont accepté de remonter la terre au même titre que la lutte phytosanitaire, car c'est une culture de haut rapport. Les rares travaux de correction entrepris (fosses à sédiment, canaux d'évacuation du ruissellement, digues de diversion, etc.) visent à limiter les inconvénients dus au ruissellement sur le réseau routier et les habitations, mais n'améliorent guère l'infiltration au niveau du vignoble, c'est-à-dire des champs d'où provient le ruissellement.

Une étude récente par enquête, cartographie analytique, analyse statistique des relations entre l'état érodé de la surface des champs et les facteurs explicatifs et par mesurage sur parcelles a été entreprise par l'Université de Strasbourg et l'INRA de Colmar sur le vignoble alsacien. Elle a montré le poids économique de l'érosion sur co-

teaux : 2 000 FF/ha/an si érosion courante sur pente de 10°, 15 000 FF en cas d'érosion catastrophique arrivant quatre fois par siècle (ce qui représente < 10 % du revenu net). Beaucoup d'exploitants déplorent ces pertes, mais peu envisagent des solutions rationnelles ; la perte à long terme de potentialité des terres n'est pas prise en compte (SCHWING, 1979). Ces études, qualitatives pour la plupart, ont mis en évidence :

— l'influence primordiale sur l'érosion de la pente et des techniques culturales (labour ou non-labour + herbicide) ;

— l'importance moindre de la position topographique, de la texture de l'horizon superficiel, de la roche et de la compacité du sol (METTAUER, SABBA EL GHOSSEIN, VOGT, 1979). Plusieurs études statistiques soulignent la non-linéarité des relations entre l'érosion et les facteurs explicatifs, l'existence de seuils et d'interrelations entre facteurs (ex. pente  $\times$  matériau superficiel). Des études sur vergers de pêchers ont montré l'influence protectrice du taux de cailloux contre l'érosion (DEFFONTAINE, de MONTARD, 1968).

Plus récemment, des études du CEMAGREF à l'infiltromètre (type ORSTOM) dans le vignoble du Beaujolais ont montré l'influence majeure de la couverture du sol (paillage et compost non enfoui) sur le démarrage du ruissellement et sur le détachement des particules (GRIL, 1982). Sarmets broyés, labour avec ou sans enfouissement de compost ont donné des résultats immédiats décevants sur sol brun calcaire de 22 % de pente.

Il reste à adapter les techniques culturales aux conditions économiques actuelles (mécanisation poussée) et trouver le moyen de maintenir un fort taux d'infiltration au champ en protégeant la couche superficielle du sol du tassement par les tracteurs et de la battance des pluies (mulch de paille ou de pierre, compost, etc.). Une étude pédologique approfondie et des tests à l'infiltromètre devraient permettre d'aborder l'étude des processus en cause.

## Les terres de culture

Vu la faible agressivité des pluies et les pentes modérées sur lesquelles sont généralement pratiquées les grandes cultures en France, on pouvait s'attendre à ce que les problèmes d'érosion y soient relativement peu importants (PIHAN, 1979). Cependant, les sols limoneux sont particulièrement fragiles (BOLLINE, 1979), si bien que l'enquête menée en 1945 a déjà montré que 4,5 millions d'hectares (moins de 10 % du territoire national) étaient déjà sérieusement affectés par

l'érosion (GOBILLOT et HENIN, 1950). On est donc heureusement loin de la situation des USA (120 millions d'hectares de terres dégradées vers 1930) (NEBOIT, 1983).

Par ailleurs, il faut noter que la progression de l'érosion est discontinue dans le temps et dans l'espace. On connaît certaines phases de recrudescence de l'érosion au Moyen Age et durant la seconde moitié du XVIII<sup>e</sup> siècle, lors des grands défrichements (J. VOGT, 1957). On assiste actuellement à une montée des cris d'alarme qui témoignent de ce qu'un seuil de déséquilibre a été atteint : augmentation de la fréquence des inondations, déclassement des rivières, envasement des retenues, des ports, des canaux et des fossés. Dans les champs, les « cailloux poussent », les mouillères sont plus persistantes, car la structure se dégrade en surface (battance) et en profondeur (semelle de labour et horizon compact imperméable). En plusieurs points du pays (Nord-Pas-de-Calais (SIMON, 1979), Artois (SRAE), Bretagne (INRA), Bassin parisien (INA), Pays de Caux (OUVRY, 1981), Normandie, Lorigais, Lyonnais (CEMAGREF), etc., les exploitants, peu habitués à ce genre de problème, consultent les services de l'Agriculture, le SRAE, les Chambres d'Agriculture, les chercheurs spécialisés de l'INRA, du CEMAGREF et de l'ORSTOM. Sous l'autorité du Comité d'Action Régional du Val de Canche (Pas-de-Calais), une approche globale mais légère des problèmes liés à l'érosion et au ruissellement (enquêtes, tests au simulateur de pluies aux champs, démonstrations de matériels, tours de champs avec les exploitants et essais agronomiques simples) a été conçue pour que restent liés les aspects techniques, économiques et humains. Il en ressort que la dégradation des propriétés physiques du sol est en relation étroite :

- avec l'intensification de la mécanisation (pulvérisation en surface, compactage en profondeur) ;
- avec la baisse du taux de matières organiques (labour plus profond, brûlage des pailles, dissociation de l'élevage avec l'agriculture entraînant l'abandon des prés temporaires et la rareté du fumier) ;
- avec l'extension des cultures industrielles peu couvrantes et laissant peu de résidus organiques (maïs, betteraves) (BOLLINE, 1982) ;
- avec l'acidification du sol par les apports massifs de la plupart des engrais minéraux et l'abandon du marnage (ROOSE, MASSON, 1983).

Les remèdes proposés respectent à la fois la rentabilité des exploitations à court terme (re-

nus annuels) et à long terme (conservation de l'eau et des potentialités des terres) :

- en réduisant le travail du sol (préparation moins fine du lit de semence, labour à profondeur moindre et variable d'une année à l'autre ;
- en couvrant le sol (réintroduction des engrais verts, plantes de couvertures hivernales, etc.) ;
- en révisant progressivement les rotations (limitation des cultures peu couvrantes, production fourragère de qualité pour les élevages intensifs) ;
- en favorisant le chaulage et les fumures organiques.

Les aménagements antiérosifs sont réduits au minimum : amélioration du drainage et du réseau routier, respect ou réorganisation des rideaux d'arbres et des prairies temporaires.

Les travaux de réorganisation du parcellaire lors des remembrements ont souvent entraîné la recrudescence des phénomènes d'érosion et la modification du régime hydrique, que ce soit en Artois (SRAE), dans la Somme (ROUX, 1981), en Bretagne (PIHAN, 1976 ; LARNET et al, 1979) ou en Lorraine (F. GRAS, 1979). Depuis 1975, la loi française oblige à procéder à une étude d'impact. Les recherches ont montré l'importance de respecter certaines haies pour réduire la vitesse du vent et celle du ruissellement, d'adapter les techniques culturales pour protéger la surface du sol de la battance et d'éviter la formation d'horizons compacts en profondeur.

Dans la région Centre, des études au simulateur de pluie (type ORSTOM) (collaboration Université d'Orléans, ORSTOM, INRA, SRAE et Chambre d'Agriculture) ont montré des différences du taux de ruissellement et de charge solide plus grandes en fonction des techniques culturales (préparation du lit de semence, drainage) et du couvert végétal (sol nu, maïs, blé d'hiver, prairie, forêt) sur un même type de sol (limon battant) qu'entre différents types de sols (sols bruns lessivés dégradés, sol brun calcaire, sol brun acide) (RAFIRINGA, 1983 ; thèse TREVISAN en cours ; DEA de KAPER, MOURIER, RAHELIARISOA, 1983). Les études en cours soulignent l'importance déterminante de l'état de la surface du sol (organisations pelliculaires, fentes de dessiccation, trous de vers de terre, rugosité suite au travail du sol) et de son humidité avant la pluie ; l'influence de la semelle de labour et d'un horizon compact vers 30-40 cm de profondeur sur le ruissellement et la détachabilité ne semble déterminante qu'à la fin de l'hiver sur les terres détrempees.

*En conclusion*, la recrudescence des phénomènes d'érosion entraîne un regain d'intérêt pour des recherches légères dans ce domaine. Il s'agit plus d'enquêtes, d'appuis au développement, de cartographie, de tests de terrain ou de laboratoire et d'analyses statistiques de données qualitatives plutôt que de recherches fondamentales ou de mesures sur parcelles ou bassins représentatifs qui demandent la maîtrise du terrain (difficile en milieu privatisé) et des investissements sur de longues années. Récemment introduits en France, les « mini-simulateurs de pluies » ouvrent la voie à une meilleure compréhension de la dynamique de l'eau à la surface du sol, ainsi que de la détachabilité des particules soumises à la battance des pluies. Ces infiltromètres relativement légers ne permettent malheureusement pas d'aborder les processus de transport et d'arrachement par l'énergie du ruissellement cumulée le long des versants ; il faut alors faire appel à des simulateurs complexes (type rampes d'irrigation) ou à des études sur bassins versants (beaucoup plus coûteuses).

## LES RECHERCHES OUTRE-MER

Dès 1941, SACCARDY et MONJAUZE développèrent en Afrique du Nord des méthodes mécaniques de lutte antiérosive (banquettes et terrains), mais ces projets de Défense et Restauration des Sols (DRS) ne furent point accompagnés de recherches.

Dans les années 1945-50, nombreux furent les scientifiques qui dénoncèrent les méfaits de certaines exploitations coloniales et de la mécanisation de l'agriculture en région tropicale. On trouve déjà des observations sur les principaux stades de la dégradation des terres dans le livre « Afrique, terre qui meurt », publié par HARROY en 1944 :

- dégradation de la végétation suite au surpâturage, aux feux de brousse, aux défrichements en vue de la culture mécanisée, réduction du temps de jachère, augmentation de la population ;
- dégradation rapide des propriétés biologiques, physiques (infiltration) et chimiques (acidification, perte en nutriments, par érosion sélective et lixiviation) du fait d'un climat très agressif ;
- dessèchement des terres, évolution du régime hydrique et érosion décapante.

Si ces phénomènes sont beaucoup plus rapides qu'en régions tempérées, ils sont cependant réversibles, au moins dans certaines limites, si bien

que les craintes de voir l'Afrique complètement stérilisée et latéritisée sont moins grandes aujourd'hui qu'on a observé la reconstitution également très rapide des horizons humifères et du couvert végétal (de 4 à 50 ans selon les régimes hydriques et la richesse de la roche-mère (ROOSE, 1973-1980). Les expérimentations de longue durée sur le terrain ont été très nombreuses et la connaissance des causes et des facteurs de l'érosion (surtout en nappe) est bien plus avancée en Afrique qu'en Europe.

Sans vouloir être exhaustif, il faut citer ici quelques études générales sur les problèmes de conservation des sols en régions tropicales (GUENNELON, 1956 ; AUBERT et FOURNIER, 1958 ; FOURNIER, 1962 ; GOUJON et al., 1968) sur les LAVAKA (RIQUIER, 1954 ; HEUSCH, 1981 ; ROUGERIE, 1958) et sur la géomorphogenèse (BIROT, 1981 ; DRESCH, 1966 ; ROUGERIE, 1960, TRICART, etc.).

### Etudes sur parcelles d'érosion

Sous l'impulsion du professeur F. FOURNIER, et pour répondre aux problèmes posés par le développement de ces immenses territoires aux conditions écologiques variées, tout un réseau de parcelles a été mis en place par l'ORSTOM et le GERDAT dès 1953 en Afrique et à Madagascar pour quantifier les risques d'érosion et le ruissellement (FAUCK, 1954). La synthèse des premiers résultats insistait déjà sur l'importance de la couverture végétale pour absorber l'énergie des pluies (= méthode biologique de lutte), sur la nécessité d'adapter les techniques culturales aux conditions écologiques, sur l'érodibilité des sols ferrugineux tropicaux dont la structure est peu stable (CHARREAU, 1972 ; COINTEPAS, 1956 ; COMBEAU, QUANTIN, 1964 ; CTFT, 1979 ; FAUCK, 1956-59 ; FOURNIER, 1967 ; ROOSE, 1967 ; GOUJON et al., 1968 ; DABIN, LENEUF, 1958).

De 1967 à 1980, l'effort a porté sur l'analyse systématique des causes et des facteurs de l'érosion (équation de WISCHMEIER et SMITH, 1960-1978) sur la standardisation des dispositifs et sur l'introduction de la parcelle nue de référence, permettant de départager la résistance propre aux sols des effets des autres facteurs. Des essais parallèles furent développés par ROOSE en Côte-d'Ivoire et Haute-Volta, par le CTFT à Madagascar, au Niger et en Haute-Volta, par OSTER au Panama, HUDSON et ses collègues en Rhodésie, LAL au Nigéria, BERTONI et d'autres au Brésil, HEUSCH au Maroc (1970). Les synthèses (HUDSON, 1971 ; ROOSE, 1973-77-80 ; DELWAULLE, 1973 ; CFTC,

1975 ; LAL, 1975 ; OSTER, 1981 ; LEPRUN, 1981 ; HEUSCH, 1970-1981) montrent :

— que l'érosivité des pluies est très élevée en région tropicale (10 à 100 fois plus forte qu'en région tempérée) ;

— que le couvert végétal, le paillage et les techniques culturales peuvent réduire l'érosion à 1/100 voire 1/1 000 de ce qu'elle est sur sol nu ;

— que l'inclinaison de la pente est le second facteur le plus important (facteur SL = 0,1 à 5 ou 20 selon les régions), mais que le rôle de la longueur de la pente est complexe et dépend de la forme de la pente et de l'état de la surface du sol ;

— que les techniques antiérosives peuvent réduire l'érosion de 1 à 1/10.

Quant à l'érodibilité des sols tropicaux (réputés très fragiles), elle est très variable (K varie de 0,4 à 0,01) selon les types génétiques, mais surtout en fonction du taux de cailloux, du taux de matières organiques, de la texture de l'horizon superficiel (les limons et sables fins augmentent la sensibilité). Souvent faible les deux premières années après défrichement progressif, l'érodibilité des sols augmente après 3-4 années de culture (sols ferrugineux tropicaux > sols ferrallitiques), à moins que les éléments grossiers s'accumulent en surface et forment un mulch protecteur (ROOSE, 1980).

### Etudes sous pluies simulées

Dès 1963, CORMARY et MASSON construisirent un simulateur de pluie à gicleurs alternatifs pour évaluer l'érodibilité des différents types de sols en Tunisie (var. 1 à 12). En analysant l'horizon superficiel de ces sols, DUMAS (1965) mit en évidence des relations curvilinéaires entre les transports solides sur parcelle et les taux de cailloux, de matières organiques, ainsi que la capacité de rétention en eau de l'horizon labouré. Cependant, l'énergie des pluies simulées était beaucoup plus élevée que celle des pluies naturelles.

En 1968-70, KALMAN (1970) mit au point un simulateur de pluie à rampes oscillantes (trop sensible au vent) pour comparer le ruissellement et les pertes en terre sur vertisols et sols sableux. Il trouve que l'infiltration croît avec la pente du sol et que l'érosion varie linéairement avec le ruissellement pour une averse donnée, mais que le coefficient de proportionnalité croît avec la pente (et aussi avec l'intensité de la pluie sur sols sableux)

$$E = 25 Q.e^{0.05 S}$$

où E = érosion (g/m<sup>2</sup>), S = pente en %,  
Q = ruissellement (mm/h), e = base log népérien.

Depuis 1975, une équipe multidisciplinaire de l'ORSTOM utilise deux simulateurs de pluie, l'un de grande taille arrose 200 m<sup>2</sup> (SWANSON, 1965) et autorise des observations sur l'érosion en nappe et rigole, tandis que l'infiltromètre à aspiration (ASSELIN et VALENTIN, 1978) n'a qu'un gicleur oscillant sur une parcelle de 1 m<sup>2</sup>, mais permet une analyse plus fine de l'hétérogénéité de l'infiltration et de la détachabilité de la surface d'un sol soumis à l'énergie des gouttes. Ils servent non seulement à comparer différents facteurs de l'érosion, mais aussi à analyser plus finement les processus liés au démarrage du ruissellement et de l'érosion en nappe sur différents sols, depuis la zone forestière subéquatoriale jusqu'aux confins du désert (LAFFORGUE, NAAH, 1975 ; ROOSE, ASSELIN, 1976 ; COLLINET, VALENTIN, 1981-83 ; VALENTIN, 1981). Il ressort de ces nombreuses études que le rôle de l'état de la surface du sol (rugosité, couvert végétal vivant ou mort, pierrosité, organisations pelliculaires superficielles, humidité préalable, stabilité structurale, fissuration ou activité de la mésofaune) est généralement plus important que le type génétique du sol. Les hydrologues ont d'ailleurs réussi pour la première fois à intégrer le rôle du sol dans des essais de simulation des crues décennales sur petits bassins versants (1-10 km<sup>2</sup>), depuis la zone forestière jusqu'aux steppes sahéliennes, en s'appuyant sur des cartes des états de surface et des tets au « mini-simulateur » (CASENAVE, CHEVALLIER, GUGEN, SIMON, 1982).

### Etudes intégrées dans l'espace

Les processus d'érosion et le bilan hydrique varient considérablement avec l'échelle d'observation ; pour étudier ces processus en vraie grandeur, les chercheurs ont été amenés à focaliser leurs observations sur des surfaces de plus en plus étroites pendant des laps de temps de plus en plus courts.

#### Au Maroc

HEUSCH, KALMAN et ROBERT (1970) ont dégagé un certain nombre de lois quantitatives liant l'érosion au ruissellement et finalement à la pluie. Dans le Rif, montagnes à fortes pentes, climat méditerranéen, sols riches en argiles gonflantes, l'énergie du ruissellement (plus efficace que celle des pluies) s'accroît avec la surface du bassin et entraîne une érosion linéaire bien plus efficace

que l'érosion en nappe sur les versants. L'équation de WISCHMEIER n'y est pas applicable. Par contre, suite à des études en Iran (1977) et en Algérie, HEUSCH développe une méthode de prévision de sédiments disponibles (sediment delivery) à partir de l'analyse des surfaces où se développent les différentes formes d'érosion (E = 1 t/ha/an si nappe ; 10 si rigoles ; 100 si ravines ; 1 000 si glissements de terrain).

#### En Tunisie

Une équipe multidisciplinaire de l'ORSTOM a étudié les bilans hydriques et les transports solubles et solides à différentes échelles dans le nord, le centre et le sud du pays. Au nord, les transports solides sont limités tant que la végétation (forêt ou maquis) est suffisante. L'introduction d'eucalyptus risque de supprimer tout écoulement, tant l'augmentation de l'ETR est importante (DELHUMEAU, 1981). Dans le sud semi-aride, les averses rares tombant sur des sols dénudés et généralement encroûtés entraînent des ruissellements violents et des transports solides importants qui marquent définitivement le paysage (BOURGES *et al.*, 1979 ; PONTANIER, FLORET, 1982). Dans la région centre, l'érosion des versants est plus forte sur les colluvions des piedmonts cultivés que sur les djebels relativement couverts par le maquis (DELHOUME, 1981). La vie des retenues artificielles est souvent très courte (moins de 30 ans) dans ces zones où la végétation couvre peu le sol, où les pentes sont fortes et les matériaux meubles. Le vent a un rôle important en mobilisant les fines poussières et en tractant les grains de sable : ces derniers peuvent faire des voiles qui augmentent considérablement l'infiltration des pluies.

#### En Côte-d'Ivoire

Dans la région forestière de Taï, les effets du défrichement et de la culture traditionnelle sur l'évolution du milieu physique (dynamique de l'eau, érosion, dégradation des matières organiques, etc.) et du milieu vivant furent étudiés sur parcelles (1-200 m<sup>2</sup>) et sur bassins (2 ha à 10 km<sup>2</sup>) COLLINET, 1983). Des études multidisciplinaires semblables ont été menées sous savanes guinéenne dans le centre (Sakassou : LAFFORGUE, 1982) et sous savane soudanienne dans le nord de la Côte-d'Ivoire (Korhogo : CAMUS *et al.*, 1976 ; ROOSE, 1980).

#### Madagascar

De nombreuses parcelles d'érosion, ainsi que

des bassins comparatifs ou expérimentaux ont été installés depuis 1960 par le CTFT, en collaboration avec l'IRA et l'ORSTOM, pour comparer le bilan hydrique et l'érosion sous divers couverts forestiers, diverses prairies naturelles et cultures. L'influence de la forêt sur le régime d'écoulement et sur l'augmentation de l'ETR, ainsi que l'effet d'échelle ont été clairement mis en évidence. Certains modèles de développement agricole ont été testés sur bassins versants de 4 à 30 ha (CTFT, 1974 ; GOUJON *et al.*, 1968).

### **Guyane (ECEREX)**

Des chercheurs de diverses disciplines et instituts étudient depuis 1977 le milieu forestier équatorial et sa transformation après défrichement et mise en culture. L'hydraulicité des bassins semble étroitement liée aux surfaces de sol dont la dynamique de l'eau est verticale et profonde ou oblique et superficielle (ROCHE, 1982). Le ruissellement superficiel et hypodermique y sont beaucoup plus importants sous forêt qu'en Afrique ; par contre, l'érosion sous milieu naturel est faible ( $E = 0,2$  à  $1$  t/ha/an). Après défrichement, les mouvements de particules sont importants à l'échelle de la parcelle (jusqu'à  $45$  t/ha/an), mais ils sont  $1000$  fois plus faibles à l'échelle du bassin ( $1,5$  ha) (BOULET, BRUGIERE et HUMBEL, 1979 ; ROCHE, 1982 ; FRITSCH, 1982 ; SARRAILH, 1980-82).

### **Conclusions**

Les problèmes de ressources en eau, de dégradation des sols et d'érosion deviennent chaque jour plus importants dans les pays en voie de développement, car la pression démographique oblige ces pays à développer la production agricole, ce qui peut se faire par deux voies qui entraînent toutes deux des problèmes. Soit on intensifie l'exploitation des surfaces cultivées par des apports massifs d'engrais minéraux et/ou par l'irrigation et l'on assiste à une acidification chimique et à une dégradation des propriétés physiques de l'horizon superficiel, soit on augmente les surfaces cultivées et l'extension à des terres neuves de plus en plus fragiles entraîne les problèmes de dégradation des terres liées au défrichement et à la mécanisation. De plus, les propriétés structurales des sols étant étroitement liées à l'évolution des matières organiques, évolution très rapide dans les pyas chauds et humides, les problèmes de dégradation des sols, de ruissellement et d'érosion se manifestent très vite dans ces pays dès que l'on change les équilibres écologiques.

Pour répondre aux besoins de « modèles de développement non dégradants », il a fallu mettre en place des études approfondies sur les causes, les facteurs et les processus de l'infiltration et de l'érosion. Bien que les recherches quantitatives dans ce domaine soient bien plus nombreuses outre-mer qu'en France (pour des raisons d'urgence du problème, mais aussi de maîtrise du terrain et de disponibilité de main-d'œuvre), il manque encore des études sur l'efficacité des méthodes conservatrices envisageables (méthodes biologiques ou mécaniques ?) sur le coût économique de l'érosion, des aménagements antiérosifs et sur les bénéfices à tirer de chaque type d'aménagement, sur le comportement du milieu humain (motivations et possibilités d'innovation des sociétés locales) (ROOSE et PIOT, 1984).

### **DISCUSSION**

Les processus mis en cause par le ruissellement, et à plus forte raison par l'érosion, sont bien plus complexes que ceux qui ont été perçus il y a 50 ans.

#### **Le ruissellement**

Il peut s'expliquer selon trois modèles observés dans la nature.

#### **Le ruissellement superficiel généralisé**

Le ruissellement superficiel généralisé (HORTON, 1945) sur l'ensemble d'un bassin se développe dès que l'intensité de la pluie dépasse la capacité d'infiltration des terrains. Ce cas est très fréquent sur les terres cultivées et les bassins sous steppes semi-arides ou savanes tropicales (ROCHE, 1963) et continue aujourd'hui à faire l'objet de modélisation (CAMUS *et al.*, 1976 ; GIRARD, 1980). L'état de la surface du sol (couvert végétal, rugosité, tassement, structure de l'horizon superficiel et humidité préalable, etc.) est le facteur explicatif le plus important (avec l'intensité de la pluie), que l'on peut modifier efficacement pour réduire le ruissellement et l'érosion sur les versants (méthodes biologiques très efficaces). Cependant, il est apparu dans divers bassins que les relations entre la crue et l'intensité des pluies est très lâche et que le ruissellement n'apparaît pas toujours sur les versants (CAMUS, 1960).

#### **Le ruissellement localisé**

Le ruissellement localisé (théorie « Partial Con-

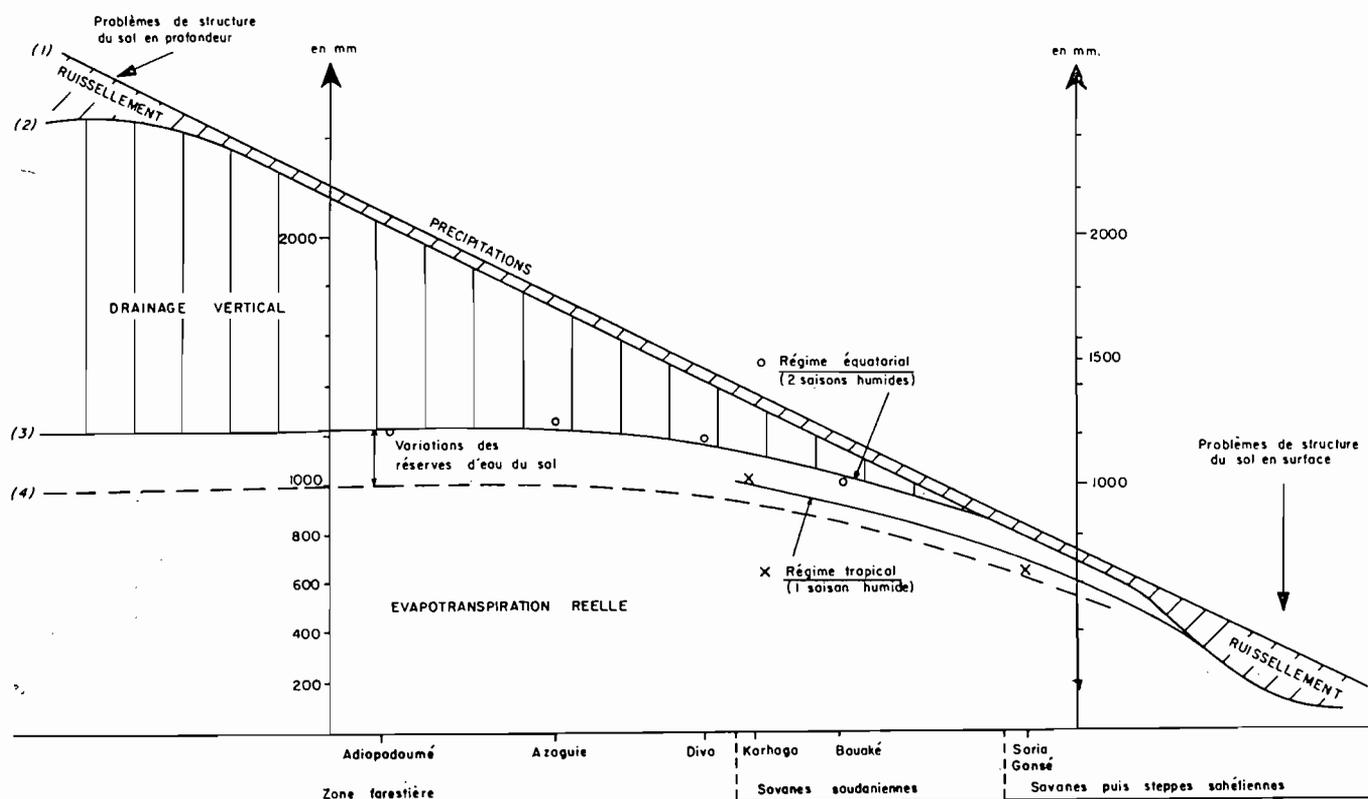
tributing area » des anglophones) sur les aires saturées du talweg (KÖHLER, 1963, puis KIRKBY, 1967 ; DUNNE, 1975 ; YAIR et LAVÉE, 1974) répond à ces observations et s'applique à des bassins dont la capacité d'infiltration sur les versants est toujours supérieure à l'intensité des pluies : c'est le cas des regs des régions arides (YAIR, LAVÉE, 1974) et de certains bassins forestiers sur sols non dégradés (COSANDEY, 1983). Mais, par l'analyse des eaux de crue, certains auteurs ont montré qu'il s'agissait d'eau de la nappe des bas-fonds chassée par la pluie sur la zone saturée (HEWLETT et HIBBERT, 1965 ; NORTCLIFF, 1979 ; MEROT, 1981) ou chassée par « effet de piston » par l'eau d'infiltration sur l'ensemble du bassin (BIROT, 1981). Seul l'aménagement des bas-fonds peut être efficace.

### Le ruissellement hypodermique rapide

Il fait intervenir une combinaison d'un ruissellement superficiel localisé sur certaines portions des versants et dans le bas-fond par saturation, et d'un ruissellement hypodermique rapide dans les sols où l'infiltration verticale est freinée ou bloquée par la présence d'horizons compacts à

structure dégradée. C'est le cas sur certains bassins versants de Guyane (BLANCANEUX, 1979 ; BOULET, FRITSCH, HUMBEL, 1979 ; ROCHE, 1982, etc.) ou sous culture mécanisée ayant provoqué la formation de semelles de labour et d'horizons compactés épais dans les sols. Le rôle de l'organisation structurale de la couverture pédologique se surimpose à celui de l'état de la surface du sol, tout au moins lorsque le sol est proche de la saturation. L'aménagement agricole devra prendre en compte la répartition spatiale de ces horizons dégradés pour répartir dans le paysage les différentes productions.

A la figure 1, qui présente le bilan hydrique sous végétation naturelle en région chaude, le ruissellement généralisé se manifeste depuis la zone des steppes semi-arides jusqu'aux savanes, le ruissellement localisé apparaît surtout dans les zones forestières et le ruissellement superficiel et hypodermique rapide se développe dans les régions forestières équatoriales hyperhumides. Mais dès que la végétation naturelle est dégradée (feu, surpâturage) et le sol découvert (cultures), le ruissellement a tendance à se généraliser et à s'intensifier (ROOSE, 1980).



E.J. ROOSE 1980

Fig. 1. — Evolution du bilan hydrique sous végétation naturelle en fonction du climat en milieu tropical

## L'érosion

C'est un phénomène complexe résultant de divers processus (arrachement, transport, sédimentation) ayant pour cause différentes sources d'énergie (vent, pluie, gel, ruissellement, gravité) et dont l'expression est modifiée par la résistance du milieu (sol, couvert végétal, techniques culturales) et par la topographie. Sur de vastes étendues, peu ou moyennement pentues, dominent les érosions en nappe et rigole beaucoup plus sensibles à l'état de la surface du sol (rugosité, voile sableux, organisations pelliculaires superficielles, couvert végétal, cailloutis, stabilité structurale, humidité, etc.) qu'au type de sol pédogénétique (cas des sols arides, sols ferrugineux tropicaux et ferrallitiques à dominance d'argile kaolinique et de sables grossiers).

Sur sols riches en argiles gonflantes (bruns eutrophes, vertisols, sols salsodiques, certains sols hydromorphes), une fois le profil saturé et les fentes refermées, le ruissellement devient très abondant et s'organise en nappes ravinantes, même sur des pentes très faibles. La conservation

de ces sols passe par l'amélioration de structure (aménagement des résidus organiques et labour en sec), le ralentissement du ruissellement (planches en pentes faibles) et l'augmentation de l'ETR (ICRISAT, KAMPEN *et al.*, 1974). Sous climat per-humide et sur les sols à horizons dégradés peu profonds (planosols), les dangers d'érosion proviennent non seulement de l'état de la surface du sol, mais aussi de l'engorgement du profil : en plus des aménagements classiques, il faut prévoir le drainage à la surface du sol et en profondeur.

## Erosion et pédogenèse

L'érosion peut entraîner deux types d'évolution bien distincts des profils pédologiques : l'appauvrissement des horizons superficiels en particules fines (argile et limons) par érosion en nappe sélective (et par lessivage) se développe sur pentes modérées bien couvertes (ROOSE, 1980). Ce processus s'arrêterait rapidement de lui-même, suite au développement d'un mulch protecteur d'éléments grossiers (visible sur les champs après une averse), s'il n'était continuellement alimenté par

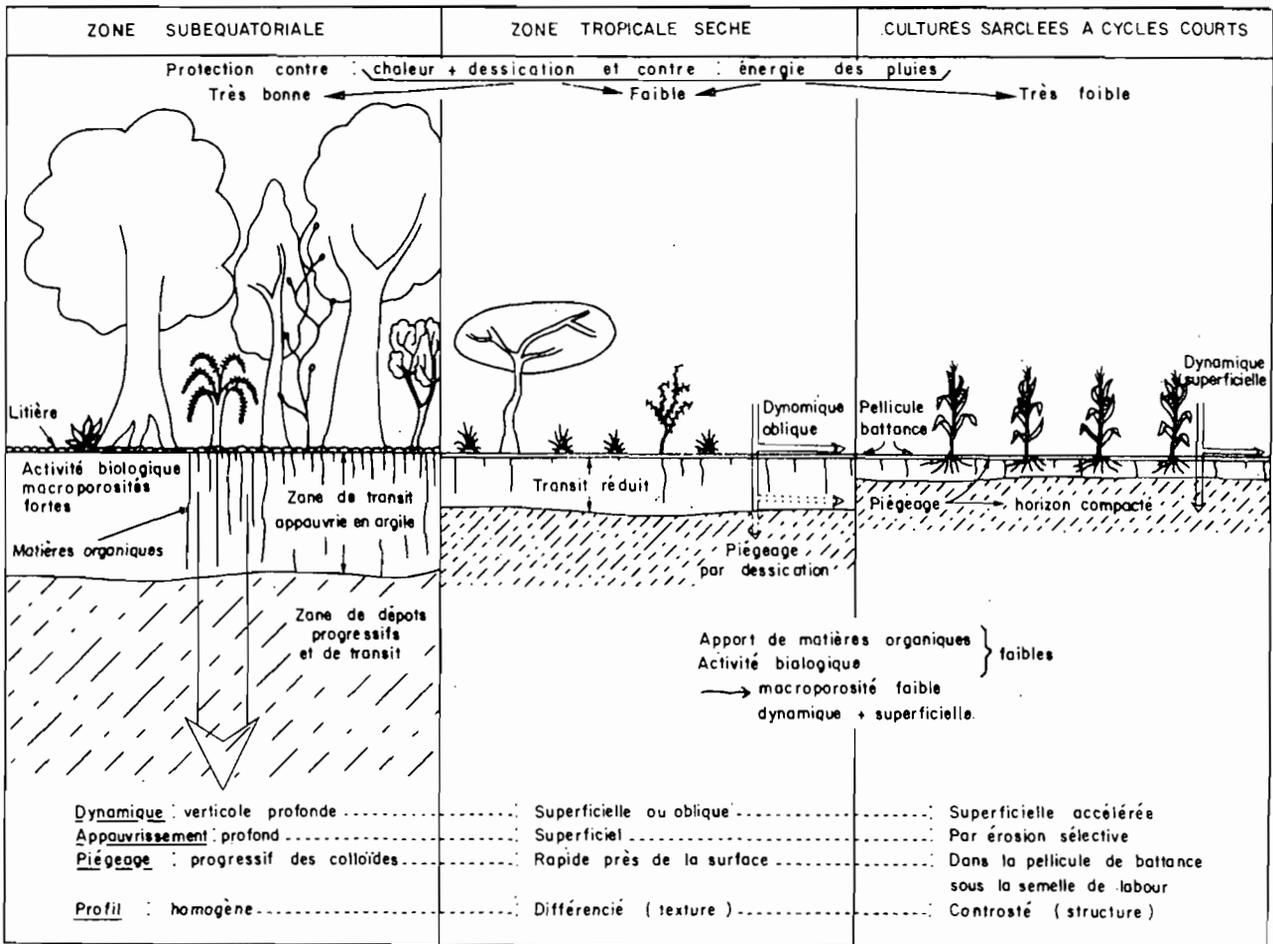


Fig. 2. — Influence biologique et climatique sur l'évolution du profil pédologique d'une couverture kaolinique en milieu tropical

les remontées de terre fine que la mésofaune prélève à grande profondeur ou à la limite de l'horizon B. Sous culture, c'est le labour qui, associé à l'érosion en nappe, fait « pousser les cailloux ».

*Le rajeunissement des profils* a lieu lorsque l'érosion en nappe et rigole s'accélère au point de dépasser la vitesse de formation des horizons humifères (et non l'altération des roches profondes). Si les travaux agricoles effacent les rigoles, l'épaisseur de la couche arable diminue et la couleur des matériaux de surface change progressivement. Si l'énergie du ruissellement s'accroît, la rigole peut évoluer en ravine, puis en badland, achevant la disparition des horizons meubles superficiels : le décapage ne s'arrête que sur un horizon résistant (l'horizon B textural ou la roche).

On peut voir à la figure 2 (ROOSE, 1980) comment le climat, la couverture végétale et le travail du sol modifient la dynamique de l'eau et les transports solides sur une séquence bioclimatique d'Afrique occidentale. L'action de l'homme accélère considérablement la vitesse de ces deux phénomènes d'appauvrissement et de décapage des horizons superficiels.

## CONCLUSIONS

L'homme a marché sur la Lune : sera-t-il capable de cultiver la terre sans la dégrader ? Devant l'urgence du développement et la pression démographique, saura-t-il protéger son environnement ? Jusqu'ici, il s'est contenté de limiter les inconvénients de la dégradation du milieu physique en freinant la vitesse du ruissellement (méthodes mécaniques, terrassements). Un grand progrès a été réalisé au plan de la science depuis qu'il a découvert l'importance de l'énergie des gouttes de pluie et de l'aménagement de la surface du sol pour la conservation de la fertilité des champs (méthodes biologiques). Mais il n'a pas encore tiré toutes les conséquences de l'importance relative de l'état de la surface du sol et de la struc-

ture interne de la couverture pédologique (horizons compacts) sur l'aménagement des bassins versants.

A l'avenir, les recherches sur les processus d'infiltration, d'érosion et sur la couverture des sols devraient s'organiser à l'échelle des grandes régions écologiques à l'intérieur d'équipes multidisciplinaires capables d'intégrer la connaissance du milieu physique, biologique et humain. Pour l'étude des processus, se développent des méthodes de simulation de pluie et de modélisation mathématiques nécessitant une démarche itérative entre le laboratoire et la nature. Après l'érosion en nappe, il serait peut-être souhaitable d'acquérir une meilleure connaissance de l'érosion linéaire (rigole, ravine, rivières) et de l'érosion en masse (creeping, coulées boueuses, glissements), en particulier sur les fortes pentes de plus en plus cultivées dans les pays en développement.

La réussite d'un aménagement conservatoire ne nécessite pas seulement une bonne connaissance des techniques, du milieu physique et biologique, mais aussi de la société destinée à le réaliser et de l'impact économique de cet aménagement. C'est là, actuellement, l'un des thèmes majeurs que de chiffrer le coût de l'érosion (chute du potentiel de production en même temps que source de nuisances à l'aval), et de comparer l'efficacité économique des différents aménagements possibles.

Enfin, si les enquêtes et les tests au simulateur de pluie font progresser rapidement la compréhension des problèmes de dégradation des sols, il faut cependant souligner l'intérêt des expérimentations de longue durée, au champ ou sur petits bassins comparatifs, des méthodes d'aménagement, et en particulier des techniques culturales et des agrosystèmes. On pourrait d'ailleurs commencer par l'analyse des agrosystèmes traditionnels et des raisons des échecs et des réussites des aménagements déjà réalisés depuis 10 à 20 ans.

## BIBLIOGRAPHIE

- ASSELIN (J.), VALENTIN (C.) - 1978 - Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., 15, 4 : 321-349.
- AUBERT (G.), FOURNIER (F.) - 1958 - Les cartes d'utilisation des terres. Sols Africains, 3, 1 : 1-15.
- BENNET (H.H.), BELL (F.G.), ROBINSON (B.D.) - 1951 - Rain-drops and erosion. Circular 895, USDA.
- BIROT (P.) - 1981 - Les processus d'érosion à la surface des continents. Masson, Paris, 605 p.
- BLANCANEUX (Ph.) - 1979 - Dynamique de sols ferrallitiques sur granitogneiss en Guyane française. Relation avec l'érosion, le ruissellement et le lessivage oblique. Rapport ORSTOM, 162 p.
- BOLLINE (A.) - 1979 - L'érosion en région limoneuse : ses causes, ses conséquences. Colloque « Erosion agricole en milieu tempéré ». Strasbourg, 9-1978 : 95-100.
- BOLLINE (A.) - 1982 - Etude et prévision de l'érosion des sols limoneux en moyenne Belgique. Thèse Doct., Liège, 356 p.
- BONVALLOT (J.) - 1980 - Comportement des ouvrages de petite hydraulique dans la région de Médinine (Tunisie du Sud) au cours des pluies exceptionnelles de mars 1979. Cah. ORSTOM, sér. Sci. Hum., 16, 3 : 233-249.
- BOULET (R.), BRUGIERE (J.M.), HUMBEL (F.X.) - 1979 - Relations entre l'organisation des sols et la dynamique de l'eau en Guyane française. Conséquences agronomiques d'une évolution déterminée par un déséquilibre d'origine tectonique. Sci. Sol., 1 : 3-17.
- BOURGES (J.), FLORET (C.), GIRARD (C.), PONTANIER (R.) - 1979 - Etude d'un milieu représentatif du Sud tunisien : la citerne Telman. Synthèse 1972-77. Minist. Agric. Tunisie. ORSTOM, 87 p.
- CAMUS (H.), CHAPERON (P.), GIRARD (G.), MOLINIER (M.) - 1976 - Analyse et modélisation de l'écoulement superficiel d'un bassin tropical. Influence de la mise en culture (Korhogo, 1962-72). Trav. et doc. ORSTOM, Paris, n° 52, 81 p.
- CAPPUS (P.) - 1960 - Etude des lois de l'écoulement. Application au calcul et à la prévision des débits. Bassin versant expérimental d'Alrance. La Houille Blanche, 4 : 493-520.
- CARNET (C.), MEROT (P.), RUELLAN (A.) - 1979 - Approche du rôle des talus dans la distribution des sols et dans le fonctionnement hydrique et hydrologique d'un bassin versant bocager en région granitique de Bretagne. Sc. du Sol, 4 : 377-397.
- CASENAVE (A.), CHEVALLIER (P.), GUIGUEN (N.), SIMON (J.M.) - 1982 - Simulation de pluies sur bassins versants représentatifs. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., 19, 4 : 207-297.
- CEMAGREF - 1982 - Erosion et transport solide dans le bassin du Haut Drac (France). CEMAGREF, étude n° 186, 105 p.
- CEMAGREF - 1983 - Protection des voies de communication contre les risques naturels en Maurienne. Etude n° 191, 160 p.
- CEMAGREF - 1983 - Revégétalisation des pistes de ski. Etude n° 190, 93 p.
- CEMAGREF - 1983 - Prise en compte des risques naturels en forêt de montagne. Mémoire, 127 p.
- CHARREAU (C.) - 1972 - Problèmes posés par l'utilisation agricole des sols tropicaux par des cultures annuelles. Séminaire sur les sols tropicaux. IITA Ibadan, 4 : 207-297.
- CLAUZON (G.), VAUDOUR (J.) - 1971 - Ruissellement, transports solides et en solution sur un versant des environs d'Aix-en-Provence. Rev. Géogr. phys. Géol. dyn., 2, 13 : 489-504.
- COINTEPAS (J.P.) - 1956 - Premiers résultats des mesures de l'érosion en Moyenne Casamance. C.R. VI<sup>e</sup> Congrès AISS, Paris, tome D : 569-576.
- COLLINET (J.), VALENTIN (C.) - 1979 - Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Applications agronomiques. ORSTOM, Abidjan, 40 p.
- COLLINET (J.) - 1983 - Hydrodynamique superficielle et érosion comparées de sols représentatifs des sites forestiers et cultivés de la station de Taï (S.-O. ivoirien). 1<sup>er</sup> bilan : ORSTOM, Abidjan, 15 p.
- COLLINET (J.), VALENTIN (C.) - 1984 - Evaluation of erosion factors in Western Africa using rainfall simulation. Intern. Sympos. in African Hydrology : Harare, Zimbabwe, 23-27 July 1984.
- COMBEAU (A.), QUANTIN (P.) - 1964 - Observations sur les relations entre stabilité structurale et matières organiques dans quelques sols d'Afrique centrale. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 11, 1 : 3-11.
- Comité d'Aménagement Rural de la Canche et de l'Authie - 1979 - Etude sur l'érosion des terres agricoles dans le Val de Canche. 4 volumes. SRAE Nord Pas-de-Calais, Atelier Amén. Rural, INRA Paris : 16 + 36 + 28 + 49 p.
- COSANDEY (C.) - 1983 - Recherches sur les bilans de l'eau dans l'ouest du massif armoricain. Thèse Doct. Etat, Paris Sorbonne, 515 p.
- CTFT - 1974 - Etude de l'influence du couvert naturel en de ses modifications à Madagascar. Expérimentation en bassins versants. Cah. Scientifique n° 4, 114 p.
- CTFT - 1979 - Conservation des sols au sud du Sahara. CTFT/Min. Coopération, Paris, 296 p.
- DABIN (B.), LENEUF (N.) - 1958 - Etude de l'érosion et du ruissellement en basse Côte-d'Ivoire. ORSTOM, Abidjan, 20 p.
- DEFFONTAINES (J.P.), MONTARD (F. de) - 1968 - Essai d'appréciation du danger d'érosion dans les vergers de fortes pentes en Moyen Vivarais. Ann. Agron. 19, 3 : 349-364.
- DELHOUME (J.P.) - 1981 - Etude en milieu méditerranéen semi-aride. Ruissellement et érosion en zone montagnaise de Tunisie centrale. Djebel Semmama : 1975-79. ORSTOM, Tunis, 188 p.
- DELHUMEAU (M.) - 1981 - Etude sur la dynamique de l'eau sur parcelles du bassin versant de l'oued Sidi Ben Naceur, Nord Tunisie. ORSTOM, Tunis, n° ES 185, 80 p + annexes.
- DELWAULLE (J.C.) - 1973 - Résultats de six années d'observations sur l'érosion au Niger. Bois et Forêts, 150 : 15-37.
- DRESCH (J.) - 1966 - Les paysages tropicaux humides, in « Géographie générale », Encyclopédie La Pléiade, Paris : 609-711.
- DUMAS (J.) - 1965 - Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 3, 4 : 307-333.
- DUNNE (T.) - 1979 - Sediment yield and land use in tropical catchments. Journal of Hydrology 42 : 280-300.
- DUPRAZ (C.), LELONG (F.), TROY (J.P.), DUMAZET (B.) - 1983 - Comparative study of the effects of vegetation on the hydrological and hydrochemical fluxes in three minor catchments of Mont Lozère (France). Intern. Sympos. on Hydrological research Basins : Bern, 21-23-9-82 : 671-681.
- ELLISON (W.D.) - 1944 - Studies of raindrop erosion. Ag. Eng., 25 : 131-181.
- ELLISON (W.D.) - 1952 - Raindrop energy and soil erosion. Emp. J. Exp. Agric., 20 : 81-86.
- ERHART (H.) - 1956 - Biostasie et rhexistasie. C.R. Acad. Sci. Paris, 241 : 1218-1220.
- FAUCK (R.) - 1954 - Les facteurs et les intensités de l'érosion en Moyenne Casamance. C.R. V<sup>e</sup> Congrès AISS, Léopoldville, 3 : 376-379.
- FAUCK (R.) - 1956 - Erosion et mécanisation agricole. Bureau des Sols AOF, 24 p.

- FAUCK (R.), DUGAIN (F.) - 1959 - Mesures d'érosion et de ruissellement en Moyenne Guinée. Relations avec certaines cultures. C.R. II<sup>e</sup> Conf. Interafricaine des sols : Dalaba.
- FAUCK (R.) - 1977 - Soil erosion in the Sahelian zone of Africa: its control and its effect on agricultural production. In Proc. Intern. Symposium on rainfed agriculture in semi-arid region. Riverside, California: 371-397.
- FOURNIER (F.) - 1960 - Climat et érosion. Presses Univ. France, Paris, 201 p.
- FOURNIER (F.) - 1962 - Carte du danger d'érosion en Afrique au sud du Sahara. CEE-CCTA, Paris, 11 p.
- FOURNIER (F.) - 1967 - La recherche en érosion et conservation des sols sur le continent africain. Sols Africains, 12, 1: 5-53.
- FOURNIER (F.) - 1972 - Les aspects de la conservation des sols dans les différentes régions climatiques et pédologiques de l'Europe. Conseil de l'Europe, Paris, 206 p.
- FRITSCH (J.M.) - 1982 - Evolution des écoulements, des transports solides à l'exutoire et de l'érosion sur les versants d'un petit bassin après défrichement mécanisé de la forêt tropicale humide. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., 26 p., sous presse.
- GABERT (P.) - 1965 - Recherches sur l'érosion dans deux bassins expérimentaux sous climat méditerranéen, région d'Aix-en-Provence. Publ. AISH n° 66: 380-387.
- GABERT (P.), MARRE (A.), RISER (J.) - 1981 - Processus d'érosion avec intervention du gel sur des versants témoins en Basse Provence-Méridionale. 1: 13-20.
- GEZE (B.) - 1956 - L'érosion et la conservation des sols dans les régions méditerranéennes. Ann. INA 42: 347-374.
- GIRARD (G.) - 1980 - Application d'un modèle simplifié aux zones du Sahel. La Houille Blanche, 4/5: 305-314.
- GOUJON (P.), BAILLY (C.), VERGNETTE (de), BENOIT de COIGNAC (G.), ROCHE (P.), VELLY (M.) et CELTON (C.) - 1968 - Conservation des sols en Afrique et à Madagascar. Bois et Forêts n° 118, 119, 120, 121: 3-17, 3-12, 3-14, 19-34.
- GRAS (F.) - 1979 - L'érosion des sols lessivés de Lorraine et son incidence sur les projets de remembrement rural. Coll. Erosion agricole en milieu tempéré. Strasbourg, pp. 89-94.
- GRIL (J.) - 1982 - L'érosion dans le vignoble du Beaujolais. Etude comparée des techniques culturales pratiquées dans la commune de Pommiers. CEMAGREF, Paris, 28 p. + Ann.
- GUENNELON (R.) - 1955 - Conservation des sols et lutte contre l'érosion à la Réunion. Ann. Agron., 3: 423-497.
- GUENNELON (R.) - 1958 - Contribution à l'étude de l'érosion des sols du Bas Rhône. II. Sols sur sables Miocènes et Pliocènes dans le Vaucluse. Ann. Agron., 4: 453-480.
- HARROY (J.P.) - 1944 - Afrique, terre qui meurt. La dégradation des sols africains sous l'influence de la colonisation. Hayez, Bruxelles, 557 p.
- HENIN (S.), GOBILLOT (T.) - 1950 - L'érosion en France. Bull. Techn. Min. Agric., Paris, 50-51: 9-11.
- HENIN (S.) - 1979 - L'érosion liée à l'activité agricole en France. Coll. Erosion agricole en milieu tempéré. Strasbourg, sept. 1981, pp. 9-12.
- HEUSCH (B.), KALMAN (R.), ROBERT (P.) - 1970 - Etudes sur l'érosion au Maroc. Ann. Rech. Forest. Maroc, n° 12: 9-176.
- HEUSCH (B.) - 1977 - Quantification des processus érosifs à partir d'une analyse cartographique du bassin du Sefid Roud (Iran). Colloque « Télédétection en Pédologie », Rome: 149-156.
- HEUSCH (B.) - 1981 - Les Lavaka du lac Alaotra (Madagascar). Sémin. « La gestion régionale des sédiments », Propriano, s.p.
- HEUSCH (B.) - 1983 - Bilan des connaissances et synthèse bibliographique sur l'Afrique du Nord. SOGREA, 83 p. multigr.
- HEWLETT (J.D.), HIBBERT (A.R.) - 1965 - Factor affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. Int. Symp. on forest hydrology. Pergamon Press Pennsylvanie, 275 p.
- HORTON (R.E.) - 1945 - Erosional development of streams and their drainage basin. Geol. Soc. Amer. Bull., 56: 275-370.
- HUDSON (N.W.) - 1971 - Soil Conservation. Betsford Ltd. London.
- KAISER (B.) - 1981 - Observations et mesures morphodynamiques sur un versant d'alpage: la Tête Noire du Galibier: 1976-79, in Recherches en Briançonnais. CEMAGREF DGRST, Grenoble, 5, 1: 17-63.
- KALMS (J.M.) - 1975 - Influence des techniques culturales sur l'érosion et le ruissellement en région Centre Côte-d'Ivoire. Coll. Conservation et aménagement des sols tropicaux: Ibadan.
- KAMPEN (J.), KRANTZ (B.A.) - 1974 - Soil and water management in the semi-arid zone of India. ICRISAT, 33 p.
- KAPFER (A.) - 1983 - Contribution à l'étude de l'influence des techniques culturales sur le ruissellement et l'érosion dans le Faux Perche au moyen de la simulation des pluies. DEA, Orsay-Orléans, 68 p.
- KIRKBY (M.J.), CHORLEY (R.J.) - 1967 - Throughflow, overland flow and erosion. AISS 12, 3, p. 5.
- KOHLER (M.A.) - 1963 - Rainfall-Runoff. Symp. « Eaux de surface » à Berkeley. Public. N° 63 AISH: 479-491.
- LAFFORGUE (A.), NAAH (E.) - 1976 - Exemple d'analyse expérimentale des facteurs de ruissellement sous pluies simulées. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., 13, 3: 195-237.
- LAFFORGUE (A.) - 1977 - Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement sur parcelles. Exploitation méthodologique des données obtenues sous pluies simulées. Cah. ORSTOM Hydrol., 14, 4: 299-344.
- LAFFORGUE (A.) - 1982 - Etude hydrologique des bassins versants de Sakassou (Côte-d'Ivoire), 1972-1977. TED, ORSTOM, Paris, n° 149.
- LAL (R.) - 1976 - Soil erosion problems on an alfisol in Western Nigeria and their control. IITA, Monograph. 1, Ibadan, 126 p.
- LAWS (J.O.) - 1940 - Recent studies in raindrops and erosion. Agric. Eng. 21: 431-433.
- LENEUF (N.) - 1959 - L'altération des granites calco-alcalins et des granodiorites en Côte-d'Ivoire forestière et les sols qui en sont dérivés. Thèse Fac. Sci. Paris, 210 p.
- LEPRUN (J.C.) - 1981 - L'érosion, la conservation et l'aménagement des sols du Nord-Est brésilien. Diagnostic et lignes nouvelles de recherches. SUDENE-ORTOM, Récife, Brésil, 107 p.
- MASSON (J.M.), KALMS (J.M.) - 1971 - Analyse et synthèse des facteurs de l'érosion sur le bassin versant de la Tet à Vinca. Note 14/71 EDF/Univ. Montpellier, 90 p.
- MEROT (Ph.) - 1981 - Le traçage naturel de l'eau par les isotopes du milieu appliqué au transfert de l'eau dans les sols; mise en évidence du transfert latéral. Bull. GFHN: 26-36.
- METTAUER (H.), SABA-EL-GHOSSAIN (T.), VOGT (H.) - 1979 - Méthodologie d'approche de l'érosion basée sur des méthodes statistiques, in Coll. Erosion agricole en milieu tempéré: Strasbourg, sept. 1978, pp. 203-210.
- NEBOIT (R.) - 1983 - L'homme et l'érosion. Publ. n° 17. Fac. Lettres Clermont, 183 p.
- NORTCLIFF (S.), THORNES (J.B.), WAYLEN (M.J.) - 1979 - Tropical forest systems: an hydrological approach. Amazoniana, 4, 4: 557-568.
- OSTER (R.) - 1981 - Conservacion de suelos en las tierras altas de Chiriqui (Panama). Min. Desarrollo Agropecuario, Mission française, 45 p.

- OUVRY (J.P.) - Localisation et description des sites d'érosion des sols agricoles du bassin inférieur de l'Yeres (Seine-Maritime). DAA ENSA Rennes/INRA Rouen, 71 + 29 p.
- PIHAN (J.) - 1976 - Bocage et érosion hydrique des sols en Bretagne. C.R. Colloque CNRS « Ecosystèmes bocagers », Rennes : 185-208.
- PIHAN (J.) - 1979 - Risques climatiques d'érosion hydrique des sols en France, in Coll. Erosion agricole des sols en milieu tempéré. Strasbourg, sept. 1978 : 13-18.
- PONTANIER (R.), FLORET (C.) - 1982 - L'aridité en Tunisie présaharienne. Climat, sol, végétation, aménagement. Trav. Doc. ORSTOM n° 150, 544 p.
- RAFIRINGA (A.) - 1983 - Recherche des causes des différences d'écoulement entre deux bassins versants contigus et semblables (Puisseaux à Saint-Hilaire et Vernisson à Nogent). Aspects hydrogéologiques et agro-pédologiques. Thèse 3<sup>e</sup> cycle, Orléans.
- RAHELIARISOA (M.A.) - 193 - Influence de l'utilisation des sols sur le ruissellement et l'érosion en nappe. Cas d'un sol limoneux du Faux Perche. DEA Univ. Orléans, 74 p.
- RIQUIER (J.) - 1954 - Etude des Lavaka. Mém. 15 M, sér. D, 6 : 169-189.
- RIQUIER (J.) - 1980 - Méthode provisoire pour l'évaluation de la dégradation des sols. FAO, Rome, 88 p.
- ROCHE (M.) - 1963 - Hydrologie de surface. Gauthier-Villars/ORSTOM Paris.
- ROCHE (M.A.) - 1982 - Comportements hydrologiques comparés et érosion de l'écosystème forestier amazonien à Ecerex en Guyane. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., 19, 2 : 81-114.
- ROOSE (E.) - 1967 - Dix années de mesures de l'érosion et du ruissellement au Sénégal. Agron. Trop., 22, 2 : 123-152.
- ROOSE (E.) - 1973 - Contribution à l'étude de l'érosion hydrique en milieu tropical. Thèse Doc. Ing. Fac. Sciences Abidjan, n° 20, ORSTOM Abidjan, 125 p.
- ROOSE (E.) - 1976 - Use of the universal Soil loss equation to predict erosion in West Africa. In SSSA Special Publication n° 21 : 60-74.
- ROOSE (E.) - 1977 - Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesures en parcelle expérimentale. Trav. et Doc. ORSTOM n° 78, 108 p.
- ROOSE (E.), ASSELINE (J.) - 1978 - Mesure des phénomènes d'érosion sous pluies simulées à Adiopodoumé. II. Les charges solubles et solides des eaux de ruissellement sur sol nu et diverses cultures d'ananas. Cah. ORSTOM Pédol. 16, 1 : 43-72.
- ROOSE (E.) - 1980 - Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Trav. et Doc. ORSTOM Paris, n° 130, 567 p.
- ROOSE (E.), MASSON (F.K.) - 1983 - Consequences of heavy mechanization and new rotation on runoff and loessial soils degradation in the North of France. Paper 92, session I. Colloque « Preserve the land », Honolulu, 1-1983.
- ROOSE (E.), PIOT (J.) - 1984 - Runoff, erosion and soil fertility restoration on the Mossi Plateau (Central zone of Upper-Volta). Symp. « Challenges in African hydrology and water resources », HARARE, July 1984 n, 13 p.
- ROUGERIE (G.) - 1960 - Le façonnement actuel des modelés en Côte-d'Ivoire forestière. Mém. IFAN n° 58, 542 p.
- ROUX (N.) - 1981 - Ruissellement et remembrement. Commune de Nampont-Saint-Martin (Somme). DAA INA Paris.
- RUIZ FIGUEROA (J.F.), VALENTIN (C.) - 1983 - Effects of various types of cover on soil detachment by rainfall. III. Coll. Benelux sur les processus géomorphologiques. Liège, sept. 1983.
- SACCARDY (L.) - 1950 - Note sur le calcul des banquettes de restauration des sols. Terres et Eaux, Alger.
- SARRAILH (J.M.) - 1980 - L'écosystème forestier guyanais. Etude écologique de son évolution. Bois et Forêts Trop., 189 : 31-36.
- SARRAILH (J.M.) - 1982 - Les parcelles d'étude du ruissellement et de l'érosion. ECEREX, synthèse de quatre années, in C.R. « Journées de Cayenne », 4-8 mars 1982, 8 p.
- SIMON (M.) - 1979 - Erosion et machinisme agricole dans le Val de Canche, DAA INA Paris. CAR. Val de Canche, Hesdin.
- SCHWING (J.F.) - 1979 - Evaluation du poids économique de l'érosion dans le vignoble alsacien, in Coll. Erosion agricole en milieu tempéré : Strasbourg, sept. 1978 : 175-182.
- SURELL (A.) - 1871 - Les torrents des Hautes Alpes. Dunod, Paris, 2 vol.
- STALLINGS (J.H.) - 1957 - Soil Conservation. Prentice Hall, N.Y., 575 p.
- SWANSON (N.P.) - 1965 - Rotating boom rainfall simulator. Trans. ASAE, 8 : 71-72.
- TRICART (J.) - 1953 - Erosion naturelle et érosion anthropogène à Madagascar. Rev. Géol. Dyn., Paris, 5 : 225-230.
- TRICART (J.) - 1962 - Les discontinuités dans les phénomènes d'érosion. AISH n° 59 : 233-243.
- TRICART (J.), CAILLEUX (A.) - 1965-70 - Traité de géomorphologie : modelé des régions chaudes, forêts et savanes ; modelé des régions sèches. SEDES, Paris, 322 et 473 p.
- VALENTIN (C.) - 1981 - Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de régions subdésertiques (AGADES, Niger). Dynamique de formation et conséquences sur l'économie en eau. Thèse Doct. 3<sup>e</sup> cycle, Paris VII.
- VOGT (J.) - 1957 - La dégradation des terrains lorrains au milieu du 18<sup>e</sup> siècle. Bull. Sect. Géogr. CTHS, 70 : 111-116.
- VOGT (H.), VOGT (T.) - 1979 - Compte rendu du colloque sur l'érosion agricole des sols en milieu tempéré non méditerranéen. Strasbourg-Colmar, 20-23/9/1978, 263 p.
- WISCHMEIER (W.H.), SMITH (D.D.) - 1960 - A universal soil-loss estimating equation to guide conservation farm planning. 7<sup>e</sup> Congrès AISS 1 : 418-425.
- WISCHMEIER (W.H.), SMITH (D.D.) - 1978 - Predicting rainfall erosion losses a guide.
- YAIR (A.), LAVÉE (H.) - 1974 - Areal contribution to runoff on scree slopes in an extreme arid environment. A simulated rainstorm experiment. 2. Geomorph., suppl. 21 : 102-121.

Association Française pour l'Etude du Sol

# LIVRE JUBILAIRE DU CINQUANTENAIRE

**1934**



**1984**

PUBLIÉ AVEC LE CONCOURS

- DU CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE,
- DE L'INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE,
- DE L'INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DEVELOPPEMENT EN COOPERATION (O.R.S.T.O.M.), et
- DE LA MISSION INTERMINISTERIELLE DE L'INFORMATION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE (MIDIST).