

Les travaux sur l'érosion

Frédéric Fournier

Inspecteur général de recherches de l'Orstom (Paris)

Quand, en 1934, A. Demolon a fondé, à Versailles, le Laboratoire des sols de l'Inra, c'était avec l'intention de créer un service où les chercheurs puissent se consacrer à leurs travaux sans avoir la charge de conseiller directement les agriculteurs. Il ne faut pas oublier que cette obligation était la raison même de l'existence des stations agronomiques.

A. Demolon ayant pris sa retraite en 1945, S. Hénin, après concours, fut nommé directeur de ce laboratoire. Sa tendance était tout naturellement de suivre les directives de son prédécesseur et maître. Il avait néanmoins conscience de la nécessité de conserver un contact avec les problèmes existant dans le milieu naturel, mais il fallait retenir un axe de travail pour éviter que, sur ce plan, les observations ne se dispersent. Or, vers cette époque, la lutte contre l'érosion – thème d'intérêt majeur aux États-Unis et développé en Europe sous l'impulsion de ce pays, avec le prosélytisme dont il fait preuve – était l'objet d'un intérêt général, les médias et le grand public paraissant spécialement attentifs, comme ils le sont aujourd'hui, aux problèmes de l'environnement.

Il faut dire que les travaux réalisés outre-Atlantique étaient impressionnants, non seulement du fait de la constatation des dangers, mais aussi à travers la création du « Soil Conservation Service », la promulgation du « Soil Conservation Act » et la mise en place de la « Tennessee Valley Authority », ainsi que les méthodes spectaculaires de conservation tels les contours cultureux.

Ce n'est cependant pas cet aspect qui a déterminé le choix du nouveau directeur du Laboratoire des sols, mais le fait que l'étude des mécanismes de l'érosion impliquait la prise en compte de propriétés comme la stabilité de la structure des sols, leur teneur en matière organique et les effets du gel, dont l'étude était poursuivie dans ce laboratoire depuis sa fondation.

Quatre démarches complémentaires, lancées et dirigées par S. Hénin, méritent d'être mentionnées ici :

- l'étude des risques d'ensablement du barrage de Serre-Ponçon ;
- les recherches sur la caractérisation de l'agressivité des climats ;
- l'étude de l'importance relative des divers processus d'érosion en France ;
- l'établissement d'une carte de risques d'érosion en France et la préparation d'une information à destination du public sur ce problème et ses conséquences.

L'étude du risque d'ensablement du barrage de Serre-Ponçon

Cette étude fut demandée en 1954 par A. Nizery qui était, à l'époque, conseiller scientifique à l'EDF et secrétaire général de l'Orstom. Les problèmes qui se posaient étaient les suivants : dans combien de temps le barrage risquait-il de passer de l'état de barrage-réservoir à celui de barrage au fil de l'eau ? Pouvait-on, par un aménagement adapté de l'impluvium, éviter ou retarder cette échéance ?

Il existait trois stations de mesure du débit solide réparties entre la Durance, la Severaisse et le Drac, à partir desquelles on pouvait faire des évaluations d'érosion et de sédimentation. Mais une des difficultés fondamentales à surmonter dans ce type d'étude concernait la prise en compte simultanée de débits solides, dont la granulométrie variait largement, de leurs relations variables avec les débits liquides et de la simultanéité de processus d'arrachement, de transfert et de dépôt. Le tableau I révèle cette situation.

Tableau I. Apports liquides et solides en suspension du Drac et de la Severaisse (d'après HÉNIN *et al.*, 1984).

	1 ^{er} mai au 31 déc. 1953		1 ^{er} semestre 1952		2 ^e semestre 1952		1 ^{er} semestre 1953		2 ^e semestre 1953	
	Liquide	Solide	Liquide	Solide	Liquide	Solide	Liquide	Solide	Liquide	Solide
Drac Pont de la Guinguette, bassin versant 511 km ²	610	650	345	60	210	84	195	16	160	66
Severaisse Le Séchier	295	150	130	25	125	55	95	5	110	16

Apports liquides en 10⁶ m³. Apports solides en 10³ t.

La procédure alors adoptée a consisté à faire une estimation de l'érosion par une approche cartographique et à la comparer aux mesures de débit solide effectuées aux trois stations.

Cette approche permettait de se référer à des échelles de temps et d'espace qui effacent l'effet de phénomènes élémentaires. Elle a conduit à établir une typologie des terrains en partant d'une analyse de photographies aériennes, typologie vérifiée par des examens de terrain, des enquêtes auprès des responsables locaux, des reconnaissances de la nature des formations géologiques et des études de comportement des matériaux au laboratoire. Le tableau II montre les six catégories de terrain établies.

Il fallait ensuite trouver une base de comparaison entre des estimations de l'érosion faites pour les bassins versants et les mesures de débit solide effectuées aux trois stations.

Pour ce faire, on a établi de la manière suivante un coefficient E d'érosion pour chaque bassin. On a affecté un coefficient e d'érodibilité à chacune des six catégories de terrain distinguées, en fonction de leur sensibilité à l'érosion puis, connaissant la surface S occupée dans chaque bassin par chaque catégorie de terrain, E a été évalué par la formule :

$$E = e_1 S_1 + e_2 S_2 + e_3 S_3 + e_6 S_6$$

Tableau II. Etude de l'érosion des bassins de Serre-Ponçon et du Sautet.
Répartition des terrains par catégorie.

Nature de l'érosion	Description	Exemples
1 - Erosion très forte	Cirque de gypse à cargneulles (avec prépondérance de gypse) Marnes noires affouillées par gros torrent Berge glaciaire affouillée par gros torrent	Bragousse (cirque) Boscodon, partie inférieure du Riou Bourdou Berges du Chateauroux
2 - Erosion forte	Marnes noires sur versants dénudés (dos d'éléphant) Berge glaciaire dénudée Berge affectée de glissements	Berges du Reallon ou des ravines de Puy Sanières Torrent de Vachères, Rabioux de Chateauroux (partie moyenne) Drac vers Chauffayer-St-Eusebe
3 - Erosion moyenne	Glaciaire supérieur affecté de ruissellements Gypse à cargneulles (avec prépondérance de cargneulles) Berge affouillée, mais de faible dénivellation	Partie supérieure de Riou Bourdou Ste-Elisabeth de St-Chaffrey, Rivet d'Arvieux, Mallefosse de Briançon Torrent d'Ancele
4 - Erosion faible	Ravinements peu importants dans les hautes vallées Ravinements peu importants dans les calcaires liasiques	Guisane, Bachelard, etc. Basse Ubaye, torrent de Trente Pas
5 - Eboulis	Terrains à clappes, éboulis de pieds de falaises rocheuses	
6 - Terrains couverts de végétation	Différence entre le bassin versant total et les terrains appartenant aux catégories précédentes	
Rochers	On distingue, dans l'ensemble de la dernière catégorie, les surfaces occupées par du rocher nu	Severaisse (granite), Drac d'Orcières (flysch) Clarée (houilles)

Trois hypothèses ont été faites quant aux valeurs à attribuer aux différents e (valeurs variant de 300 à 1), et les estimations obtenues pour E ont été comparées aux mesures de débit solide. Le tableau III montre l'accord existant entre estimations et mesures.

Tableau III. Comparaison des divers coefficients d'érosion et des débits solides pour les trois bassins.

	Archidiacre	Drac	Severaisse
Débit solide moyen des trois années (t)	$18 \cdot 10^3$	$2,9 \cdot 10^3$	$0,85 \cdot 10^3$
Coefficient d'érosion E			
Hypothèse A	$12 \cdot 10^3$	$1,37 \cdot 10^3$	$0,9 \cdot 10^3$
Hypothèse B	$9,64 \cdot 10^3$	$0,88 \cdot 10^3$	$0,36 \cdot 10^3$
Hypothèse C	$7,26 \cdot 10^3$	$0,72 \cdot 10^3$	$0,36 \cdot 10^3$

Ce sont les coefficients attribués dans le cas de l'hypothèse A qui ont généré le meilleur résultat. La formule correspond à :

$$E = 300 \cdot S1 + 200 \cdot S2 + 80 \cdot S3 + 40 \cdot S4 + 20 \cdot S5 + 1 \cdot S6$$

La valeur réelle de l'unité du coefficient d'érodibilité, établie en calculant le rapport « débit solide mesuré/E », est égale à 1,5 tonne par hectare. En d'autres termes, le coefficient 300 représente une quantité arrachée de l'ordre de 450 tonnes par hectare.

Si ces évaluations sont entachées d'une certaine imprécision, il était cependant important d'obtenir à l'époque des ordres de grandeur. Ces travaux ont eu l'avantage de fournir des bases quantitatives et qualitatives concernant les phénomènes d'érosion. Cette documentation a été largement complétée par celle rassemblée par F. Fournier pour étayer les raisonnements de sa thèse. A propos de Serre-Ponçon, deux conclusions ont été tirées : « *L'une est que la sédimentation n'affectera le barrage que dans deux siècles ; l'autre est que 30 % des apports proviennent de 2 000 ha.* »

Les recherches sur la caractérisation de l'agressivité des climats

Pour coordonner l'ensemble des travaux effectués sur l'érosion, deux séries d'informations sont nécessaires sur les antagonistes en présence, climat et sol, les unes caractérisant le climat et son agressivité, les autres caractérisant le comportement des sols, tant en ce qui concerne leur texture que leur structure et leur répartition dans le paysage.

Le rôle du climat est évidemment nettement plus facile à envisager que celui, beaucoup plus diversifié, des facteurs dépendant du milieu tellurique. Il a été étudié par FOURNIER (1960), dont la première idée fut de chercher s'il existait une relation entre l'érosion du sol, représentée par les débits solides annuels des cours d'eau, et la pluviosité annuelle tombant sur les bassins de ces cours d'eau. La pluviosité annuelle étant en ordonnée et l'érosion en abscisse, la courbe empirique traduisant cette relation a la forme d'une parabole à axe horizontal, le minimum d'érosion se situant vers 850 mm de pluviosité annuelle (fig. 1). Ce fait signifie que les faibles et les fortes précipitations entraînent plus de terre que les précipitations moyennes. Les régions à faibles précipitations annuelles étant caractérisées par une distribution très inégale de pluies violentes dans l'année, le résultat obtenu implique que les pluies agissent autant par leur intensité que par leur quantité (hauteur).

C'est le choix d'une expression de la forme p^2/P , où p représente la hauteur des précipitations du mois le plus pluvieux de l'année et P la hauteur des précipitations annuelles, qui a permis d'établir des relations linéaires entre l'érosion, représentée par la dégradation spécifique des bassins versants – c'est-à-dire leur débit solide annuel exprimé par unité de surface de bassin –, et le climat, représenté par la hauteur des pluies annuelles, P , et leur inégalité de distribution dans l'année, $\frac{p}{P}$, en tant que manière d'exprimer leur intensité.

Le coefficient climatique p^2/P a permis une évaluation des risques d'érosion non seulement en France, mais aussi dans les différentes régions du monde. ARNOLDUS (1977) a eu l'idée de calculer un indice p^2/P pour chaque mois, et d'utiliser la moyenne des douze valeurs obtenues comme coefficient climatique. Ces études ont été utilisées par la FAO pour l'évaluation de l'agressivité climatique lors de la mise

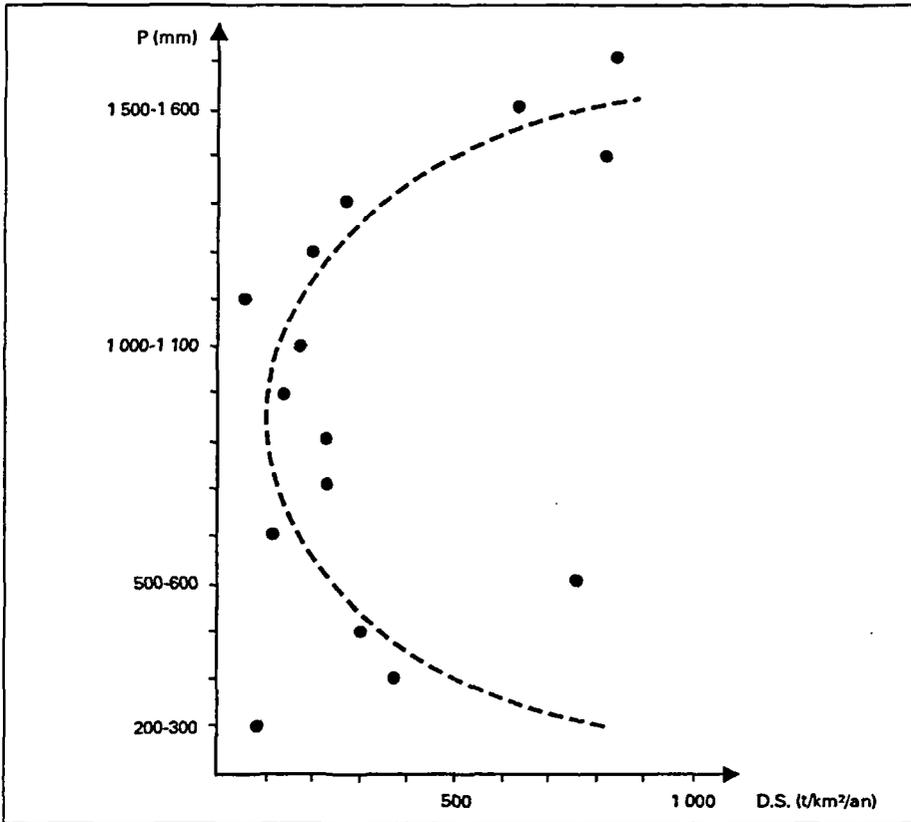


Figure 1. Analyse graphique de la relation entre la pluviométrie annuelle (P) et le débit solide (D.S.).

au point de la méthodologie établie par cette organisation pour l'évaluation de la dégradation des sols (FAO, 1977).

Les résultats de l'étude de l'agressivité climatique ont été ensuite transférés par F. Fournier sur un plan plus général, par une approche qui s'apparente à celle suivie par R. Gras pour établir la relation entre évaporation et précipitation. Dans sa recherche de la meilleure corrélation entre les caractères des pluies et l'érosion représentée par la dégradation spécifique des bassins versants, F. Fournier a en effet constaté qu'il fallait aussi prendre en compte l'effet du relief, afin d'expliquer pourquoi différentes relations linéaires étaient obtenues. Il a introduit alors dans les relations un coefficient orographique $\bar{H} \cdot \text{tg } \alpha$, combinant un coefficient de massivité $\text{tg } \alpha$, correspondant à la tangente de la pente moyenne α du bassin, et la hauteur moyenne \bar{H} du bassin. En faisant intervenir au sein d'une corrélation double les deux facteurs climat et relief révélés par l'analyse, un instrument de calcul de l'érosion a été finalement établi. Il se traduit par l'équation :

$$E = 2,65 \log p^2/P + 0,46 \log \bar{H} \cdot \text{tg } \alpha - 1,56$$

Ce travail, qui s'applique avant tout à d'assez grandes surfaces, constitue une suite aux premiers travaux réalisés à l'échelle de la France.

Les résultats obtenus lors de l'étude du barrage de Serre-Ponçon avaient aussi mis en évidence un décalage dans le temps, au cours de l'année, entre les maximums de débit liquide et de débit solide. Il était tentant d'essayer de préciser ce phénomène en cherchant quelles relations pouvaient exister, à l'échelle de temps du mois, entre ces deux types de débit (1975).

Les premiers résultats ont montré que l'emploi de données brutes mensuelles pour établir des corrélations donnait une répartition très désordonnée des points.

En revanche, l'emploi de valeurs relatives, « débit solide mensuel/débit solide annuel » et « écoulement mensuel ($q \text{ m}^3/\text{s}$)/écoulement annuel ($Q \text{ m}^3/\text{s}$) », engendrait une répartition des points autour de courbes d'allure parabolique ou de boucles voisines d'une ellipse dont le grand axe serait recourbé en forme de parabole. Ces dernières montrent un phénomène d'hystérésis plus ou moins marqué.

L'allure générale des courbes paraboliques correspond à une équation de type :

$$y = ax^b$$

y étant le débit liquide relatif et x le débit solide relatif, avec $b > 1$ (fig. 2).

Les courbes de forme ovoïde peuvent se présenter à l'aide des équations :

$$x = a \left[1 + \sin \frac{2\pi t}{12} \right]^\alpha \text{ et } y = b \left[1 + \sin \frac{2\pi t}{12} - \varphi \right]$$

où a, b et α sont des coefficients et exposants empiriques, t le quantième du mois où les débits ont été mesurés, y le débit liquide relatif, x le débit solide relatif ; φ permet d'exprimer en termes de temps le déphasage entre débit solide et débit liquide.

La valeur de φ peut être négative ou positive, ce qui correspond à des courbes dextrogyres ou senestogyres, le maximum de débit solide pouvant précéder ou suivre celui du débit liquide. Les courbes dextrogyres semblent caractériser des

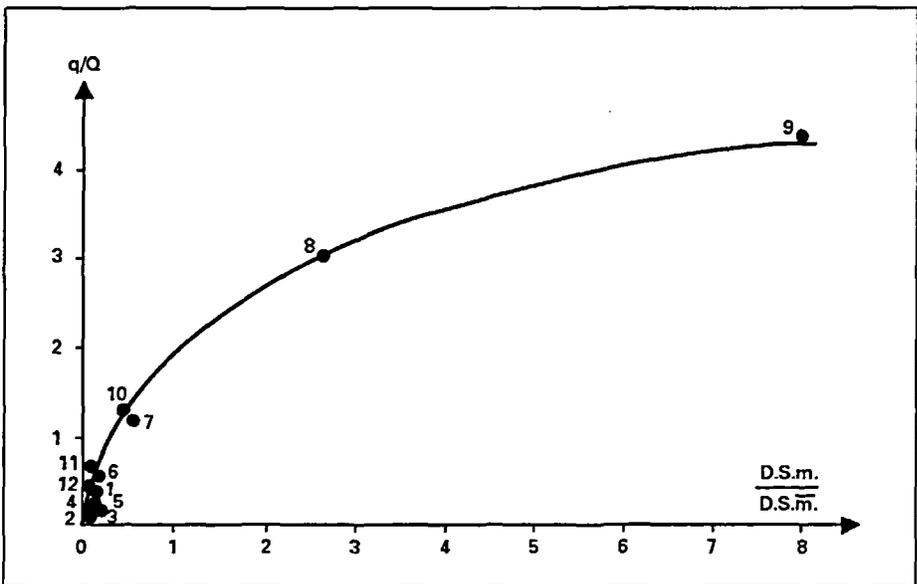


Figure 2. Relation entre les débits relatifs d'écoulement (q/Q) et les débits solides relatifs (D.S.m./D.S.m.). Cas de la Me Nan à Tha Pla (Thaïlande).

bassins versants de relativement petite taille, et les courbes senestrogres des bassins de plus grande dimension (fig. 3, 4).

Plusieurs hypothèses pourraient être formulées pour expliquer ces différences, les circonstances n'ont pas encore permis de les vérifier.

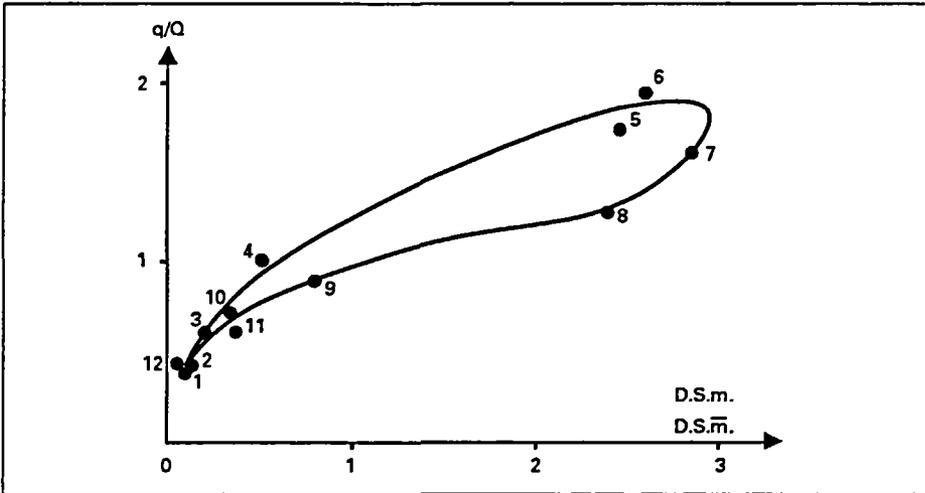


Figure 3. Relation entre les débits relatifs d'écoulement (q/Q) et les débits solides relatifs ($D.S.m./D.S.m̄$). Cas du Lech à Füssen (Allemagne).

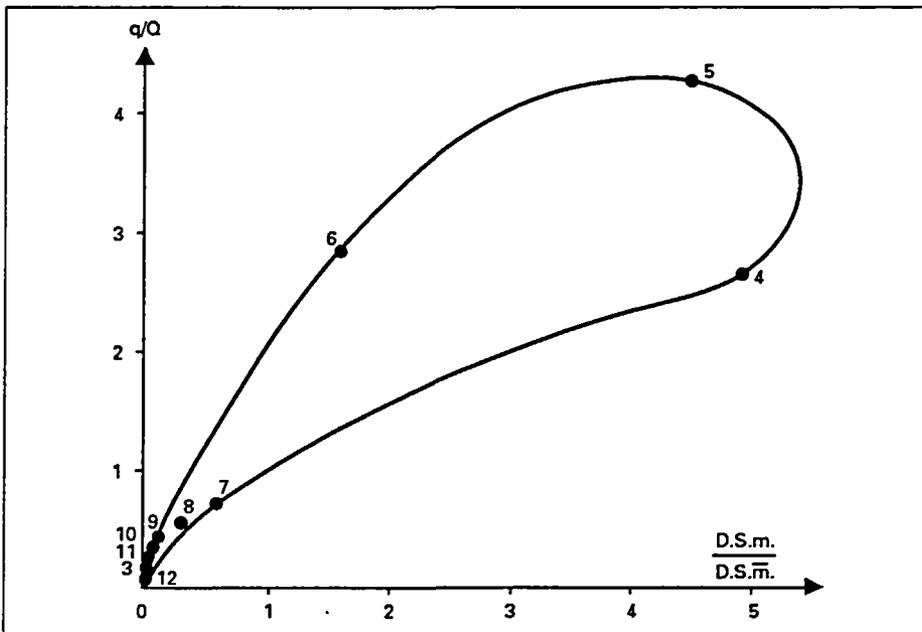


Figure 4. Relation entre les débits relatifs d'écoulement (q/Q) et les débits solides relatifs ($D.S.m./D.S.m̄$). Cas de l'Assiniboine à Headingley (Canada).

Les recherches sur la sensibilité des sols à l'érosion

De très nombreux travaux avaient été effectués à l'étranger sur ce thème quand le Laboratoire des sols du CNRA l'a introduit dans son programme. Certes, les indications sur le comportement des terres avaient été obtenues grâce à l'étude de l'alluvionnement de Serre-Ponçon, mais le test employé pour étudier la stabilité structurale (test d'agitation des agrégats du sol à l'eau) était assez sommaire. Un nouveau test (Is), mis au point ultérieurement (1958), a permis d'établir les relations suivantes à partir des données obtenues en parcelles expérimentales :

$$- \text{érosion (t/ha)} = 4,9 \log 10 I_s - 0,5 \quad (R = 0,902) ;$$

$$- \text{charge solide du ruissellement (g/l)} = 2,47 I_s - 0,1 \quad (R = 0,904).$$

Plus récemment, BOFFIN (1984) a mis en évidence une relation entre la stabilité de la structure des sols et leur résistance au détachement.

A l'époque où ces travaux ont été lancés, la situation française quant à l'érosion se résumait ainsi. Deux œuvres magistrales, l'une de Surrel sur les torrents des Alpes, l'autre de Brémontier sur la fixation des dunes des Landes, présentaient des techniques de protection sans les justifier autrement que par l'expérimentation. Celle-ci fut néanmoins si concluante que l'application de ces techniques a été organisée par une législation, l'exécution en étant confiée au corps des Eaux et Forêts. Peu d'informations concernaient le reste du territoire.

Cependant, les observations montraient que des travaux de défens avaient été entrepris dans de nombreuses régions, se manifestant par l'établissement de rideaux d'arbres, de terrasses, de fossés d'écoulement d'eau. L'examen des vignobles, où les pieds de vigne étaient presque déchaussés en haut des pentes alors qu'en bas le niveau du sol atteignait les premiers rameaux implantés sur les ceps, constituait une confirmation évidente de l'existence du phénomène d'érosion.

Enfin, des descriptions de paysages telles qu'on en trouve dans la « Géologie agricole » de E. Risler et quelques remarques sur le passé historique venaient compléter ces observations. Elles faisaient apparaître que, depuis le XIII^e siècle au moins, il a existé en France des règlements tendant à protéger les sols.

Ces exemples, appuyés par une iconographie abondante rassemblée par S. Hénin, ont conduit le ministère de l'Agriculture à diffuser une circulaire en date du 8 avril 1949, demandant aux services départementaux de fournir un état de l'érosion dans les territoires de leur ressort. Il est apparu globalement que 4 millions d'hectares étaient touchés par l'érosion hydrique et 500 000 par l'érosion éolienne. Ces données sont probablement sous-évaluées si l'on considère le risque lui-même, les aménagements existants masquant le potentiel de risque.

Le regroupement par zones des régions concernées a permis d'établir, en 1960, une carte (fig. 5) qui correspond sensiblement à ce que l'on pouvait prévoir à partir d'une carte des risques d'érosion établie à l'aide de l'indice climatique Fournier. Il existe d'ailleurs une certaine analogie entre ce document et la carte de fréquence des orages de grêle établie par J.R. Plumandou vers 1900 à partir des dommages évalués par les compagnies d'assurances.

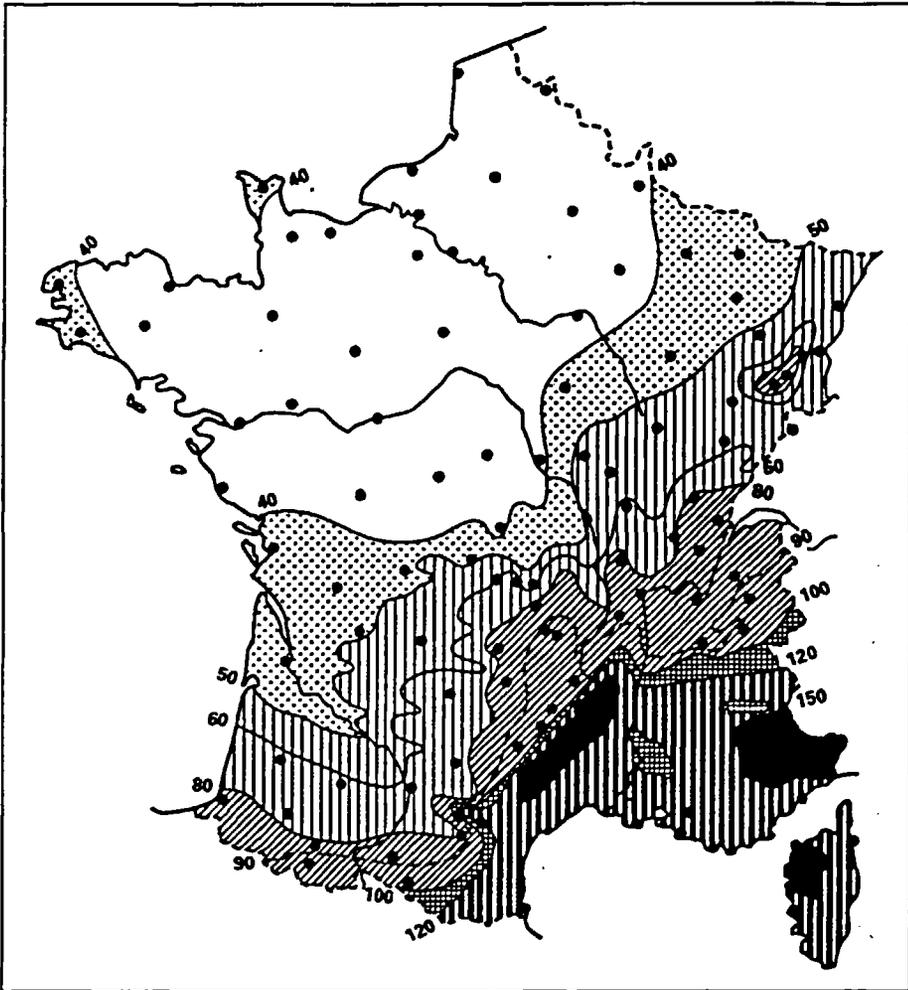


Figure 5. Carte de la fréquence de l'érosion hydrique en France.

Tous ces problèmes ont été abordés dans un numéro spécial du Bulletin technique d'information des ingénieurs et des services agricoles (1950), dans la Revue des chambres d'agriculture (1953-1954) et les Comptes rendus de l'Académie des sciences (1951).

Par ailleurs, des informations ont été publiées, mettant en évidence des effets liés à des négligences humaines (HÉNIN *et al.*, 1952 ; LEFÈVRE, 1958) ou dépendant de circonstances particulières, telles des pluies tombant sur un sol gelé : l'eau ne peut s'infiltrer et entraîne facilement les particules libérées des mottes disloquées par le gel. La parcelle dite des Grands Closeaux, Domaine de l'Inra à Versailles, presque horizontale, a permis l'observation de ce phénomène sur près de deux hectares. Un phénomène analogue a été signalé par HÉNIN et ROBICHET (1951) à propos de l'érosion éolienne, le vent entraînant, en période de sécheresse et après la fonte, les particules de terre libérées des mottes disloquées par le gel. Des faits de cette nature avaient été signalés par E. Risler.

Malgré toutes ces preuves, du fait que les phénomènes érosifs sont variables dans le temps et l'espace (ils sont souvent localisés et ne prennent une valeur critique qu'à une périodicité de plusieurs années), les agriculteurs réagissaient peu. Quelques-uns seulement ont apporté, dans leur exploitation, des aménagements nécessaires : enherbement de certaines zones, fossés d'écoulement des eaux, etc. Le territoire restait donc fragile.

Or, depuis cette époque, les techniques se sont modifiées. La mécanisation a conduit à accroître la dimension des champs. Des engins plus lourds ont entraîné la formation d'ornières qui collectent les eaux de ruissellement et sont susceptibles d'être à l'origine d'un ravinement (MONNIER et FIES, 1982). On a pris conscience également de ce que, en plus des dommages causés aux champs et des dégradations de pâturages souillés par des déjections, il existait aussi des entraînements de pesticides et d'éléments fertilisants, sources de dégradation de la qualité des eaux et de leur eutrophication (JUSTE *et al.*, 1982). Le défrichement des zones boisées dans les Landes a laissé place à l'érosion éolienne.

Un regain d'intérêt s'est en conséquence manifesté à propos des phénomènes d'érosion. Un colloque s'est tenu à Strasbourg (1983), où des spécialistes dépendant des universités et de divers services et institutions ont apporté leur témoignage. Un service spécial a été créé au ministère de l'Environnement, et à l'Inra une partie de l'activité de la Station agronomique de Laon est consacrée à l'étude de l'érosion ; celle-ci se réalise d'ailleurs dans le cadre d'une large collaboration avec les ingénieurs des services locaux et avec des agriculteurs.

Aujourd'hui, pour évaluer l'aggravation des dommages, on part souvent de l'état des lieux établi au début des années 50 sous l'impulsion de S. Hénin ; et c'est aussi dans la lignée des apports fondamentaux de S. Hénin, tant en physique des sols que dans l'étude des processus d'érosion par l'eau et le vent, que se poursuivent les recherches actuelles. Élargissement des travaux dans la continuité, tel est le mot d'ordre des études relatives à l'érosion des sols.

Bibliographie

- ARNOLDUS (H.M.J.), 1977. « Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco ». In *Assessing soil degradation*. Rome, FAO (FAO Soils Bulletin, 34).
- BOIFFIN (J.), 1984. *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. Thèse, sciences agronomiques, INA-PG, 320 p.
- FAO, 1977. *Assessing soil degradation*. Rome, FAO (FAO Soils Bulletin, 34).
- FOURNIER (F.), 1960. *Climat et érosion*. Paris, PUF, 201 p.
- HÉNIN (S.), 1950. « L'érosion et son importance. L'érosion en France (avec J. Gobillot). Le mécanisme de l'érosion par l'eau ». In *La conservation du sol, le problème français*. Bull. Tech. Inf. Ing. Serv. Agric., 51, 62 p.
- HÉNIN (S.), 1953. Mécanisme et caractère de l'érosion par l'eau. *Rev. Chambres Agric.*, suppl. 31 : 1-10.
- HÉNIN (S.), 1954. L'action du vent sur les sols : érosion éolienne. *Rev. Chambres Agric.*, 25, 62 : 3-11.
- HÉNIN (S.), 1960. Problème de l'érosion en France, érosion par le vent et l'eau. *Techniques Agricoles*, 1, 1380, 7 p.

HÉNIN (S.), MICHEL (A.), RIVOIRE (A.), 1952. Sur quelques cas d'érosion dans les vignobles du Maconnais et du Beaujolais. *Ann. Agron.*, 3 (2) : 207-220.

HÉNIN (S.), MICHON (X.), GOBILLOT (T.), 1984. « Étude de l'érosion des vallées de Haute Durance et du Haut Drac ». In Assemblée générale de l'Association internationale d'hydrologie scientifique, Rome, t 1, p. 158-171.

HÉNIN (S.), MONNIER (G.), COMBEAU (A.), 1958. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. Agron.*, 9 (1) : 73-92.

HÉNIN (S.), ROBICHET (O.), 1951. Mécanismes du soulèvement du sol sous l'influence du gel. *C.R. Acad. Sci.*, 232, 25 : 2358-2360.

JUSTE (C.) *et al.*, 1982. « Exportation par le drainage des éléments fertilisants dans les sols sableux des Landes ». In *La transformation des terres. Bases méthodologiques. Exemples français*. Paris, Ministère de l'Environnement et Comité français du Scope (numéro spécial Recherche Environnement).

LEFEVRE (P.), 1958. Quelques phénomènes d'érosion en Picardie. *Ann. Agron.*, 9 (1) : 91-129.

MONNIER (G.), FIES (J.C.), 1982. « Dégâts occasionnés aux terres agricoles lors de l'implantation des piliers porteurs de lignes électriques de transport ». In *La transformation des terres. Bases méthodologiques. Exemples français*. Paris, Ministère de l'Environnement et Comité français du Scope (numéro spécial Recherche Environnement).

RISLER (E.), 1984. Géologie agricole. Tomes I à IV. Paris, Berger-Levrault.