

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire de Ain Témouchent
Institut des Sciences et de la Technologie
Département de Génie de l'Eau et de l'Environnement



Mémoire pour l'Obtention du Diplôme de Master

Filière : Hydraulique

Spécialité : Sciences de l'eau et l'environnement

Thème :

ANALYSE DES FACTEURS DE RISQUE DE L'EROSION HYDRIQUE
DANS LA REGION DE AIN TEMOUCHENT

Présenté en Juin 2015 par :

M^r MAZOUR Abdelkader Walid

Devant le Jury composé de :

M^r BelarbiLahcen Président

M^r Guemou

Examineur

M^rBaghli Nawal

Examineur

M^{me}Khouani Ahmed

Examineur

M^{me} Dr. Boughalem MostafiaEncadreur

M^rPr. Mazour Mohamed

Invité

Dédicaces

A

Mon père qui n'a ménagé aucun effort pour m'encourager, me soutenir et me guider tout au long de mes études et particulièrement lors des moments difficiles.

Ma mère pour sa tendresse, sa douceur et sa complicité.

Mes sœurs Sarah et Marwa pour leurs gentillesse et encouragements.

Mon adorable nièce Malak. Kaouter

Je dédie ce modeste travail

Remerciements

Je voudrais tout d'abord adresser ici tous mes remerciements aux enseignants du département de Génie de l'Eau et de l'Environnement et toutes les personnes qui ont de près ou de loin contribué à ma formation et à l'élaboration de ce mémoire de fin d'étude.

J'exprime particulièrement ma gratitude à monsieur Mazour Mohamed, professeur au Centre Universitaire de Ain Témouchent pour tous les sacrifices qu'il a consenties pour que je puisse arriver là où je suis aujourd'hui.

Tous mes remerciements à Madame Boughalem Mostafia pour m'avoir dirigé et patiemment orienté tout au long de ce travail.

Mes vifs remerciements au Professeur Belarbi Lahcen qui me fait l'honneur de présider le jury.

A Madame Baghli Nawel, Monsieur Guemou Benabdellah et Monsieur Khouani Ahmed, j'exprime tous mes remerciements pour l'effort qu'ils font d'examiner ce travail.

Je ne pourrais clore ces remerciements sans rappeler ma reconnaissance envers tous mes camarades pour leurs encouragements et l'ambiance agréable tout au long de notre formation.

Les idées n'appartiennent à personne. Elles sont le fruit des rencontres entre les hommes et les conditions écologiques et socio-économiques. Que tous ceux qui ont participé de près ou de loin, trouvent ici leur part de reconnaissance.

Résumé :

L'analyse des facteurs de risque de l'érosion en nappe et la conservation de l'eau et du sol sur les versants de la région d'Ain Témouchent permet de mieux lutter contre l'érosion hydrique et aussi mieux la prévenir. Le phénomène de l'érosion et de la dégradation des sols est assez important. Deux sites assez représentatif de l'ampleur de l'érosion ont été choisis pour tester l'infiltrabilité des sols en fonction de certains paramètres du milieu naturel ainsi que l'analyse des états de surface, et ce afin d'essayer de faire un premier diagnostic de l'état de la dégradation des sols et la dynamique de l'eau dans le sol. Les facteurs de risque de l'érosion sont connus (pluie, fragilité des sols, facteurs anthropiques, modes de gestion des terres, etc.), mais leur évaluation reste à faire et à analyser.

La détermination relative de la capacité d'infiltration des sols en fonction de différentes situations en zone cultivée et en zone de sol nu et dégradé ainsi que l'évaluation des états de surface au niveau des sites expérimentaux 1 et 2 constitue pour nous des éléments de première importance pour faire un diagnostic préliminaire de l'état de dégradation des sols et de la dynamique de l'eau dans le sol.

Il en ressort de l'analyse des résultats obtenus que les sols cultivés sont relativement mieux protégés que les sols nus (90% du sol couverte), mais il n'y a pas que les cultures qui protègent le sol; la pierrosité, la litière et autres débris végétaux peuvent jouer un rôle intéressant. L'infiltration est ainsi améliorée d'une manière significative (jusqu'à 965 mm/h).

Par contre, les sols nus tassés et dégradés (structure superficielle détruite) infiltrent peu (48 à 623%). Ceci favorisent beaucoup les ruissellements à l'origine d'un départ de sédiments assez important. Il s'ensuit une érosion accélérée qui provoque différentes formes d'érosion et une dégradation des sols dangereuse.

Mots clés: Erosion hydrique, Facteurs de risque, Infiltration, Etats de surface, Conservation des sols

1. Introduction

L'érosion hydrique est un phénomène très grave qui touche toutes les terres agricoles du Tell Algérien. Ce phénomène bien connu, prend de plus en plus de l'ampleur à la faveur de facteurs de risque où l'homme semble être bien impliqué. Il constitue aujourd'hui une préoccupation majeure du pays. La particularité du climat marquée par des averses brutales s'abattant le plus souvent sur des sols secs et dénudés et la persistance de la sécheresse ainsi que la pression exercée sur la couverture végétale (pratiques culturales inadaptées, surpâturage, incendies, etc.), le défrichement, la mise en culture des terres en forte pente et les séquelles de la colonisation constituent les principales causes

Un survol rapide du nord de l'Algérie, région la plus productive du pays mais aussi la plus fragile, nous montre des montagnes surpâturées et des garrigues brûlées, des collines dénudées, des sols squelettiques cultivés, décapés par l'érosion en rigoles et par le labour des versants et des plaines lacérées par les ravines et les oueds, des rivières torrentielles qui dévorent les basses terrasses et envasent les barrages en une trentaine d'années (Roose et *al*, 1996).

Ces zones de montagnes les plus touchées par ce phénomène érosif constituent un enjeu socio-économique important. Ainsi les équilibres entre la végétation, le sol et l'eau se trouvent perturbés (Benchetrit, 1972).

Les terres agricoles occupent environ 7 millions d'hectares soit près du quart de ce territoire qui couvre quelques 28 millions d'hectares. Les forêts très dégradées et livrées à la vaine pâture, occupent près de 2 millions d'hectares, les pâturages et les terrains de parcours, les maquis et les broussailles et les terrains définitivement improductifs occupent le reste du territoire (Ministère de l'Agriculture, 1992).

La région de Ain Témouchent, avec un potentiel de production agricole inestimable, a connu par le passé un essor et un développement agricole sans précédent: dans les années cinquante, la sous-préfecture de Ain Témouchent produisait le quart du vin algérien. C'était une région agricole des plus prospère d'Algérie, (Mazour, 2004). Depuis, plusieurs événements se sont succédés et plusieurs facteurs se sont conjugués pour faire aujourd'hui de cette région une des zones où l'érosion hydrique est la plus active et où les sols dégradés ont beaucoup perdus de leur fertilité et de leur potentiel de production.

En effet, depuis l'indépendance, les modes de gestion des terres ont connu des mutations importantes et parfois des bouleversements qui ont souvent engendré des utilisations des terres inadaptées et inappropriées à l'origine de chutes de rendement remarquables dans la production agricole. Des événements comme l'arrachage des vignobles et leur reconversion en céréaliculture ont fortement contribué à l'accélération de la dégradation des sols et leur assèchement, (Mazour, 2012).

Sur ces sols continuellement cultivés ou abandonnés, la pression s'accroît chaque jour et même si les marques de l'érosion ne sont pas toujours visibles, les rendements baissent d'une manière importante et continue à cause de la diminution de la fertilité. Les sols cultivés, juste après les récoltes, sont souvent livrés sans protection aux différents agents de dégradation : l'agressivité des

orages, le surpâturage et la dessiccation des sols. Les dégâts sont d'autant plus importants que les sols sont dénudés et en pente et les horizons de surface décapés. Ce n'est qu'à partir du mois de novembre que les sols sont labourés et seulement au mois de janvier que les cultures commencent à couvrir le sol et donc le protéger contre les différents facteurs d'érosion.

Du fait de l'absence d'un couvert végétal permanent, au lieu de stagner et de s'infiltrer, les eaux se sont mises à ruisseler et à entraîner avec elles la terre et ses fertilisants naturels, en particulier le limon, l'argile et les matières organiques qui également sont des liants des sols fragiles (Wicherek).

Environ 6 millions d'hectares sont exposés aujourd'hui à une érosion active et en moyenne 120 millions de tonnes de sédiments sont emportés annuellement par les eaux (Heddadj, 1997). Les pertes annuelles des eaux dans les barrages sont estimées à environ 20 millions de m³ dues à l'envasement (Remini, 2000).

Au vu de la complexité de l'érosion et ses conséquences dans la région de Ain Témouchent et la tendance actuelle à l'intensification de l'agriculture et l'amélioration des systèmes de production, nous avons voulu apporter cette contribution qui a pour objectif d'analyser les facteurs de risque de l'érosion en nappe et du ruissellement et d'évaluer l'influence de la dynamique de l'eau dans le sol ainsi que les états de surface sur les processus de l'érosion hydrique.

Les résultats ont été obtenus grâce à des observations et des mesures réalisées sur le terrain au niveau de deux sites expérimentaux dans la région de Ain Témouchent. Le premier site (site 1) est situé dans la région de Ain El Alem sur un versant pentu cultivé en céréaliculture, alors que le deuxième site (site 2) est un versant non cultivé assez nu, tassé et dégradé, situé à mi chemin entre Ain Tolba et Ain Kihal à peu près. Les mesures concernent des tests d'infiltration effectués sur terrain au niveau des deux versants pour chaque site, en haut, au milieu et en bas des versants. Les observations permettent tout d'abord de faire une évaluation des conditions expérimentales (facteurs du milieu naturel) et ensuite mesurer, évaluer et apprécier les états de surface (% du couvert végétal, % des débris végétaux, fissurations, pierrosité, etc.). La méthodologie est relativement simple, mais elle nous permet de faire un premier diagnostic de l'état de dégradation des sols dans cette région et peut être évalué aussi la dynamique de l'érosion par rapport aux différents facteurs du milieu naturel et particulièrement les modes d'utilisation des terres.

Ce travail est structuré en trois chapitres; deux chapitres sont consacrés à une synthèse bibliographique:

- Le premier chapitre concerne la lutte antiérosive
- Le deuxième chapitre traite les facteurs de risque de l'érosion hydrique
- Le troisième chapitre est consacré à l'étude du cas de l'analyse des facteurs de risque de l'érosion hydrique dans la région de Ain Témouchent.

2. Problématique

La région de Ain Témouchent dispose d'un potentiel de production agricole parmi les plus importants du nord-ouest de l'Algérie, mais c'est aussi une zone très fragile, les sols sont peu profonds souvent pentus, les roches molles (marnes et schistes alternant avec des roches dures comme le calcaire et les grès). Le climat méditerranéen semi-aride offre des pluies fines, mais saturantes pendant l'hiver frais et des averses orageuses dangereuses durant les mois torrides de l'été.

Les sols (régosols, vertisols gris, sols bruns calcaires, sols rouges fersialitiques) sont souvent battants à la pluie, caillouteux, pauvres en matières organiques et carencés en phosphore et en azote.

Suite à des raisons historiques (colonisations successives, arrachage des vignes et reconversion des modes d'utilisation des terres, etc.) et la pression démographique, nous pouvons observer souvent des décapages assez sévères sur les champs cultivés, des signes de surpâturage sur des collines complètement dénudées. L'érosion en nappe et rigoles, en ravine et en masse, la divagation des oueds et la dégradation des berges, la destruction des routes et l'envasement accéléré des réservoirs sont les signes d'une dégradation poussée et généralisée des paysages de cette zone.

La région de Ain Témouchent est une zone à vocation agricole et particulièrement à vocation viticole et arboricole, mais aujourd'hui la céréaliculture domine et s'étend sur pratiquement la plupart des terres. Les rendements demeurent relativement bas et le parcours sur les chaumes d'été déstructure le sol, le pulvérise et le rend extrêmement fragile à l'érosion lors des premières pluies orageuses de l'automne. Les sols subissent donc une dégradation continue et dangereuse (décapage, érosion sélective, déstructuration, perte de fertilité, appauvrissement en matière organique, etc.).

Face à ces graves problèmes d'érosion, nous avons estimé qu'il y a urgence à faire un diagnostic de la situation, d'analyser les facteurs de risque, d'évaluer l'ampleur de la dégradation et rechercher les solutions.

L'objectif principal étant de ralentir la dégradation des sols, la perte de fertilité des sols, les pertes en terre, l'amélioration de l'infiltration et la réduction des ruissellements et des risques d'inondation de même que le ralentissement de l'envasement des barrages car le nombre de sites favorables à la construction de réservoirs d'eau est très limité dans la région de Ain Témouchent.

Il faut noter que plusieurs aménagements ont été réalisés dans la région et des moyens financiers et humains importants ont été mis en œuvre pour ces réalisations, mais la plupart de ces derniers mis en place surtout dans des zones marneuses n'ont pas réussi pour des raisons multiples dont principalement l'inadaptation des structures anti-érosives (par exemple seuils en gabion en terrain marneux : plus de 75 % d'échec, reboisement : plus de 90% d'échec, bourrelets et levées d'ados pratiquement effacés sur tous les terrains céréaliers traités), l'insuffisance technique, le manque d'entretien et la non implication des populations rurales.

Aujourd'hui, le gouvernement algérien propose le retour à la terre et l'intensification de l'agriculture, mais il espère que cela peut se faire sans accélérer la dégradation des terres agricoles et l'envasement des réservoirs d'eau si indispensables au développement de l'irrigation et au développement des communautés rurales.

Pour intéresser le paysan à préserver sa terre et la qualité des eaux de surface, il semble indispensable de répondre d'abord aux problèmes immédiats des paysans : comment améliorer leur revenus et leur sécurité en améliorant la gestion de l'eau et des nutriments sur les terres en production ?

A- SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

3. PREMIER CHAPITRE : La lutte antiérosive

3.1. L'ÉROSION : DEFINITIONS ET PROCESSUS

Les différents aspects de dégradation des sols, de l'eau et de l'environnement sont intimement liés au développement des hommes et des civilisations : ils concernent autant les agronomes et forestiers, les géographes, les hydrologues, les sédimentologues, que les socio économistes. Mais chacun dans sa discipline a développé un langage propre, si bien que les mêmes mots n'ont pas la même signification selon les disciplines.

Il faut donc préciser la portée et sens des mots par rapport aux divers spécialistes qui interviennent à différentes échelles de temps et d'espace.

3.1.1. L'érosion

Erosion vient de « ERODERE », verbe latin qui signifie « ronger ». L'érosion ronge la terre. D'où l'interprétation et la description de certains auteurs qui décrivent les paysages érodés comme squelettiques blanchis par l'effet de l'érosion. Les montagnes calcaires qui entourent la Méditerranée illustrent bien ce processus de décharnement des montagnes dès lors qu'on les défriche et que l'on brûle leur maigre végétation (Arabi et Roose, 1989 ; Roose, 1994 ; Roose et al, 1993)

En réalité, c'est un processus naturel qui certes, abaisse toutes les montagnes (d'où le terme de « dénudation rate », vitesse d'abaissement du sol des géographes anglophones) mais en même temps, l'érosion engraisse les vallées, forme les riches plaines qui nourrissent une bonne partie de l'humanité. Il n'est donc pas forcément souhaitable d'arrêter toute érosion, mais de la réduire à un niveau acceptable, tolérable.

3.1.2. Les seuils de tolérance de l'érosion hydrique

La tolérance a d'abord été définie comme étant la perte en terre tolérée, car elle est équilibrée avec la formation du sol par l'altération des roches. Elle varie de 1 à 12 t/ha/an en fonction du climat, du type de roche et de l'épaisseur des sols. Mais on s'est bien vite rendu compte que la productivité des horizons humifères, riches en éléments biogènes est bien supérieure à celle des altérites, roches pourries, quasiment stériles. De plus, cette approche nie l'importance de l'érosion sélective des nutriments et des colloïdes qui font la fertilité de sols (Stocking, 1978; Mannering, 1981).

On a donc tenté de définir la tolérance comme l'érosion qui ne provoquerait pas de baisse sensible de la productivité des terres. Mais là aussi, on a trouvé des obstacles majeurs. On connaît encore mal la perte de productivité des différents types de sols en fonction de l'érosion et, pour certains sols profonds sur loess, des pertes en terre élevées sur les versants n'entraînent que peu de baisse de la productivité du sol, mais par contre, provoquent des dégâts intolérables en aval par la pollution des eaux douces et l'envasement des barrages.

Il faut donc tenir compte à la fois de ces trois aspects : la vitesse de la restauration des sols, le maintien de la productivité des terres à un niveau d'intrant égal et enfin, le respect de l'environnement au niveau de la qualité des eaux, en particulier du ruissellement (stocking, 1978 ; Mannering, 1981).

3.1.3. La discontinuité de l'érosion dans le temps et l'espace

L'érosion résulte de nombreux processus qui jouent au niveau de trois phases : le détachement des particules, le transport solide et la sédimentation. Quel que soit l'échelle d'étude, du mètre carré au bassin versant de centaines de milliers de km², on retrouve partout ces trois phases de l'érosion mais avec des intensités différentes. D'où la diversité des acteurs de l'érosion en fonction des phases dominantes.

En montagne, lorsque la couverture végétale est détruite, le ravinement, les torrents et les glissements de terrain entraînent beaucoup de transferts solides qui causent d'énormes dégâts. Les populations rurales cherchent avant tout à gérer l'eau et les éléments fertilisants sur les prairies ou les terrasses irriguées plutôt qu'à lutter contre l'érosion.

Dans les piémonts, où les pentes sont encore fortes, les dégâts d'érosion proviennent du ravinement des torrents qui charrient une énorme charge solide et pour une moindre part, de la dégradation de la végétation par le surpâturage ou les feux et les cultures de « rapine ». Là encore, les forestiers tenteront de résoudre les problèmes d'envasement des barrages par les actions de la DRS.

Enfin, dans les plaines, les problèmes concernent le plus souvent l'alluvionnement dans les canaux, les rivières et les ports, l'inondation des lits majeurs des rivières, le colluvionnement boueux de quartiers résidentiels (mal placés sous des versants cultivés mécaniquement sans précaution) et enfin la pollution des eaux, (charge solide en suspension fine ou produits toxiques rejetés par l'agriculture ou l'industrie).

Sur les parcelles paysannes et sur les versants, les gestionnaires des terres, c'est à dire les paysans, les agronomes, les pédologues ou les géomorphologues, parlent d'érosion ou de pertes en terre (sédiment yield). Dans la rivière, les hydrologues ou sédimentologues parlent de transport solide (sédiment delivery), transport solide en suspension (argiles, limons et matières organiques, MES), et transport de fond (sables grossiers et galets en charriage). Entre l'érosion des versants et les transports solides dans la rivière, il peut y avoir de grandes différences provenant de ce que l'on appelle l'efficacité de l'érosion, "sédiment ratio"; (Roose, 1992).

Les transports solides spécifiques (t/km²/an) diminuent à mesure que le bassin versant grandit, (Bolline 1982)

On distingue généralement l'érosion normal ou géologique (morphogénèse) qui façonne lentement les versants (0,1 à 1 t/ha/an tout en permettant le développement d'une couverture pédologique issue de l'altération des roches en place et des apports alluviaux et colluviaux (pédogénèse). On dit que les paysages sont stables quand il y a équilibre entre la pédogénèse (vitesse d'altération des roches) et la morphogénèse (érosion, dénudation).

Cependant, l'érosion géologique n'est pas toujours lente! Le géologue Flotte (1984) a décrit la lave torrentielle de **Mechtras en Grande Kabylie (Algérie)**, d'environ 150 millions de m³, qui s'étend sur 18 km², 7 km de long, sur une pente de 6,8%. Ces mouvements catastrophiques où

les volumes de matériaux non triés sont importants, qui s'étendent sur plusieurs kilomètres et se sont mis en place à grande vitesse, demandent souvent des conditions climatiques différentes de celles que nous connaissons aujourd'hui. Cependant, ces masses sont toujours susceptibles de se remettre en mouvement en cas de conjonction de conditions climatiques favorables (pluies exceptionnelles après gelées du sol ou émission de vapeur des volcans, ou secousses sismiques), ou suite à des aménagements maladroits, déséquilibrant les versants.

En novembre 2001, des pluies diluviennes, des glissements de terrain et des torrents de boue ont submergé le **quartier de Bab El Oued à Alger** emportant tout sur leur passage. Les oueds qui drainaient les eaux vers la mer ont disparu suite à l'anarchie urbaine de la dernière décennie. La terre n'a pu absorber les fortes précipitations (160 mm en deux heures, soit autant qu'en un mois de novembre normal) et les crues engendrées ont emporté la vie de plus de 600 personnes.

Contre ces deux types d'érosion géologique il est très difficile de lutter : les moyens nécessaires sont coûteux et pas toujours efficaces.

L'érosion accélérée par l'homme, suite à une exploitation imprudente du milieu, est 10 à 1000 fois plus rapide que l'érosion normale, (Roose, 1973)

Il reste encore à définir la charge solide (c'est le poids de particules en suspension dans les eaux), la capacité d'un fluide (c'est la masse de particules que le fluide est capable de transporter), et la compétence d'un fluide (c'est le diamètre maximal des particules transportées en fonction de sa vitesse).

3.1.4. La dégradation des sols

La dégradation des sols peut aussi avoir diverses origines : salinisation, engorgement, compaction par la motorisation, minéralisation des matières organiques et squelettisation par érosion sélective. L'érosion comprend généralement trois phases (arrachement, transport et sédimentation). La dégradation des terres cultivées ne concerne parfois, sous certaines conditions particulières, que la déstabilisation de la structure et de la macroporosité du sol sans transport de particules à longue distance. Elle provient alors, essentiellement, de deux processus :

La minéralisation des matières organiques du sol (d'autant plus active que le climat est chaud et humide) et l'exportation minérale par les cultures (non compensée par des apports de fumure) qui va entraîner la baisse de l'activité de la microfaune et de la mésofaune, responsables de la macroporosité.

La squelettisation ou l'enrichissement en sable des horizons de surface par érosion sélective des particules fines, des matières organiques ou des nutriments, suite à la battance des pluies qui tasse le sol, casse les mottes, arrache au passage des particules qui vont former à leur tour des pellicules de battance et des croûtes de sédimentation favorisant le ruissellement.

Sous culture, comment évolue la situation après défrichement de la forêt ?

Au niveau du couvert végétal, on observe une simplification de l'écosystème (plusieurs dizaines d'espèces d'arbres vivent à l'hectare sous forêt et 2 à 4 plantes en cultures associées dans le meilleur des cas). La biomasse (1 à 8 t/ha) diminue ainsi que l'enracinement, souvent gêné par les techniques culturales (croûtes de battance et fond de labour). La couverture du sol est réduite dans le temps (cycle de 4 à 6 mois) et protège mal la surface du sol contre les rayons du soleil (les températures extrêmes augmentent) et contre la battance des pluies (formation de croûtes de battance et d'un fort ruissellement).

Au niveau du sol, le climat est plus chaud, plus sec sous culture, et l'énergie est moins bien amortie que sous forêt :

La litière est très réduite, sauf en cas de plantes de couverture,

Le taux de matières organiques et l'activité de quelques années, la capacité d'infiltration diminue,

La macroporosité s'effondre au bout de quelques années, la capacité d'infiltration diminue,

Le sol devient plus compact et accuse les discontinuités spatiales : pellicule de battance et fond de labour.

On comprend dès lors que la mise en culture de friches soit une véritable catastrophe que remet en cause l'équilibre du système sol. Les fuites d'éléments nutritifs s'accroissent, les apports compensatoires diminuent, la fertilité physique et chimique de la terre s'effondre après quelques années de culture intensive.

3.1.5. Les termes du bilan hydrique

La pluie et les autres apports d'eau (rosée, brume, quelques dizaines à 150 mm par an) sont très variables dans l'espace en fonction de l'altitude, de la distance à la mer, de l'orientation des versants par rapport aux vents humides qui apportent la pluie.

Il faut enfin définir les différents termes du bilan hydrique :

$$\text{Pluie} = \text{Ruiss.} + \text{Drainage} + \text{ETR} = \text{Var. stock eau du sol}$$

Le ruissellement superficiel est l'excès de pluie qui n'arrive pas à s'infiltrer dans le sol, coule à sa surface, s'organise en filets et rejoint rapidement la rivière où il provoque des débits de crue élevés après des temps de réponse relativement courts (de l'ordre d'une demi-heure pour des bassins d'un km²).

Le ruissellement hypodermique (interflow) est déjà plus lent car il chemine dans les horizons superficiels du sol souvent beaucoup plus que les horizons minéraux profonds (temps de réponse de quelques heures sur un bassin de 1 km²).

Enfin, **les nappes temporaires et les nappes phréatiques** (pérennes) entretiennent le débit de base des rivières grâce à un écoulement beaucoup plus lent : temps de réponse de plusieurs jours (sur un bassin de plusieurs km²), voire quelques mois sur les plus grands bassins.

En conclusion, l'érosion est un ensemble de processus variables dans le temps et dans l'espace, en fonction des conditions écologiques et des mauvaises conditions de gestion de la terre par l'homme. La lutte antiérosive intéresse divers acteurs dont les intérêts ne sont pas forcément compatibles. Il va donc falloir définir clairement les objectifs prioritaires des projets de lutte antiérosive et choisir pour chaque situation, les méthodes les plus efficaces, soit pour conserver ou pour restaurer la fertilité et la production des terres paysannes, soit pour gérer les sédiments et améliorer la qualité des eaux qui intéressent particulièrement les citoyens, les industriels et les sociétés d'irrigation.

3.2. LES STRATEGIES DE LUTTE ANTIEROSIVES : HISTORIQUE ET EVOLUTION

L'érosion est un vieux problème et l'homme s'est donc entraîné à en réduire les effets néfastes depuis longtemps.

Le développement de la production agricole entraîne une augmentation des risques de dégradation des terres :

Soit par **l'extension des surfaces** à des terres neuves qui s'avèrent fragiles et s'épuisent au bout de quelques années de culture par minéralisation des matières organiques et exportation des nutriments sans restitution suffisante.

Soit par **l'intensification** et un usage inapproprié des intrants :

- la fertilisation minérale intensive peut entraîner l'acidification des sols et la pollution des eaux (surtout si les apports sont déséquilibrés par rapport aux besoins des cultures et à la capacité de stockage par le sol),
- l'irrigation diminue la stabilité de la structure des sols ou entraîne leur salinisation (en milieu aride),
- la mécanisation, et surtout la motorisation, accélèrent la minéralisation des matières organiques du sol, la dégradation de la structure, la compaction des horizons profonds et l'accentuation des discontinuités hydrauliques (chute brutale de la capacité d'infiltration au fond du labour, même en l'absence de semelle).

La dégradation des sols par érosion, acidification ou salinisation est probablement l'une des multiples causes qui ont entraîné la décadence de civilisations anciennes dès que la concentration des populations dans les campagnes et dans les villes entraîne une pression économique trop forte sur la production des campagnes (ex. France du XIIe siècle, l'Egypte actuelle). La jachère disparaît, les sols se dégradent à plus ou moins court terme, car rien ne compense les exportations par les récoltes et les pertes par érosion ou drainage.

Déjà en 1944, le géographe Harroy avait bien compris pourquoi « l'Afrique est une terre qui meurt ». Elle meurt sous l'influence des méthodes déséquilibrantes des systèmes coloniaux qui intensifient l'exploitation des sols, accélèrent l'exportation des nutriments assimilables et la minéralisation des matières organiques, et repousse les indigènes sur les terres les moins riches et les plus fragiles, réduisant la durée de la jachère. Il proposait une politique en trois points :

- la protection intégrale des parcs nationaux pour protéger les écosystèmes naturels,
- les travaux antiérosifs du type « terrasses », banquettes ou fossés aveugles,
- des recherches sur les techniques culturales et les systèmes de production équilibrés associant l'élevage, la forêt, l'agriculture et l'agroforesterie.

3.2.1. L'érosion des sols et la pression démographique

L'érosion accélérée et le ruissellement excessif conjugués à un certain mode de développement déséquilibrant le paysage : défrichement de zones fragiles, dénudation et tassement par le surpâturage, épuisement du sol par les cultures intensives non compensé par les apports de matières organiques et de nutriments. Si c'est bien l'homme qui augmente les risques d'érosion par des techniques d'exploitation maladroites, alors on peut espérer renverser le sens actuel de l'évolution : améliorer l'infiltration pour produire plus de biomasse, augmenter la couverture végétale du sol pour restituer plus de résidus organiques au sol et par là, réduire le ruissellement, l'érosion et le drainage qui amènent rapidement les sols à l'épuisement. Dans ce contexte, la conservation des sols n'est plus le principal objectif brandi par les aménagistes, mais seulement un volet du « paquet technologique » permettant l'intensification de la production agricole indispensable pour faire face au principal défi de ce siècle : doubler la production tous les dix ans pour rattraper le rythme de la croissance démographique.

Certains auteurs prétendent que l'érosion augmente en fonction de la densité de la population. Il est vrai que dans un système agraire donné, si la population dépasse certains seuils, les terres viennent à manquer et les mécanismes de restauration des sols se grippent (Pieri, 1989)

On peut donc penser que le milieu se dégrade avec la densité de population jusqu'à atteindre certains seuils au-delà desquels les paysans sont contraints de changer de système de production, (Roose et Rodriguez, 1990 ; Roose, Durgué et Rodriguez, 1992).

3.2.2. Les stratégies traditionnelles de lutte antiérosive

Depuis 7000 ans, l'homme a accumulé les traces de sa lutte contre l'érosion, la dégradation des sols et le ruissellement, en vue d'améliorer la gestion de l'eau et la fragilité des sols (Lowdermilk, 1953). On constate que les méthodes traditionnelles sont strictement liées aux conditions socio-économiques.



Photo 1. Les stratégies traditionnelles de lutte antiérosive (RooseE., 2002)

La culture itinérante (shiftingcultivation) est la plus ancienne stratégie utilisée sur tous les continents à une époque où la population est peu dense (20 à 40 habitants/km² en fonction de la

richesse du sol et de l'humidité du climat). Après défrichage, on cultive sur les cendres et on abandonne la terre dès qu'elle ne rend plus assez pour le travail fourni (envahissement des adventices et perte des nutriments les plus assimilables). Pour que le système reste équilibré il faut une réserve de terre considérée (environ 20 fois la surface cultivée).

A l'opposé, les gradins en courbe de niveaux (besh terracing) ou les terrasses méditerranéennes irriguées apparaissent dès lors que la population est dense, que la surface cultivable est rare (hormis en montagne) et que le travail manuel est bon marché.

Ces stratégies, qui demandent 600 à 1200 jours de travail par hectare pour construire et entretenir ces structures, puis un immense effort pour restaurer la fertilité des sols, ne sont acceptées par les paysans que dans les cas où ils n'ont pas d'autre choix pour subsister, ou produire des cultures rentables.

On trouve quelques vestiges de ces structures datant de plusieurs siècles dans les montagnes Telliennes algériennes particulièrement dans monts de Tlemcen et les Traras (Khemis, Zoualef,...). Ce sont des murets en pierres sèches construites selon les courbes de niveau à L'amont desquels des terrasses restaurées permettent des cultures en irriguées. (Mazour., Roose., 2002., Mazour.,2004.)



Photo 2. Les banquettes (MazourM., 2004)

Les billons, les cultures associées et l'agroforesterie (Photo 3). Dans les zones forestières humides on peut réussir un équilibre raisonnable du milieu malgré les fortes densités de population en combinant les cultures associées couvrant toute l'année de gros billons, à divers systèmes agroforestiers.



Photo 3. Les billons (MazourM., 2004)

Les alignements de pierres et les murettes à l'entretien de la fertilité par la fumure organique. An Maghreb et en Afrique, les communautés rurales retranchées dans les montagnes pour résister aux multiples invasions et pour garantir un minimum de production agricole pour survivre, ont dû développer toute une série de méthodes conservatoires :

- Petits champs entourés de cordons de pierres piégeant les sédiments et le sable en saison sèche et le ruissellement lors des pluies,
- Murettes de pierres (Photo 4) et remontée de terre sableuse créant des terrasses servant d'impluvium,...
- Le bocage ou l'association étroite entre les cultures, l'élevage et l'arboriculture.



Photo 4. Murettes de pierres (MazourM., 2002)

Actuellement, la mécanisation et l'industrialisation de l'agriculture, la crise économique et la désintégration des sociétés traditionnelles entraînent l'abandon de ces méthodes décrites avec admiration par des géographes et des ethnologues, mais méprisées par les experts « modernes » en conservation des sols qui les considèrent comme insuffisantes pour résoudre les problèmes d'aménagement des grands bassins versants (Critchley, Reij et Seznec, 1992)

Il faudrait, sans doute, reconsidérer ces positions et, sans vouloir idéaliser les stratégies traditionnelles, analyser leur aire de répartition, les conditions de leur fonctionnement, leur efficacité, leur coût, leur dynamisme actuel, et surtout développer les possibilités de leur amélioration.

3.2.3. Les stratégies modernes de lutte antiérosive

Il s'est développé récemment diverses stratégies modernes de lutte antiérosive orientées essentiellement vers l'amélioration foncière, les terrassements et l'équipement hydraulique agricole. La priorité a été accordée à la réalisation de dispositifs mécaniques de gestion des eaux.

La restauration des terrains en montagne (RTM) s'est développée en France à partir de 1850, puis dans les montagnes d'Europe où, pour protéger les plaines fertiles et les voies de communication des dégâts des torrents, les services forestiers ont racheté les terres dégradées en montagne, reconstitué la couverture végétale et corrigé les torrents par des techniques de génie civil et biologique (Lilin, 1986)

La conservation de l'eau et des sols (CES) cultivés a été organisée aux Etats Unis d'Amérique depuis 1930 par des agronomes. L'extension rapide des cultures industrielles peu couvrantes comme le coton, l'arachide, le tabac ou le maïs dans la Grande Plaine, a déclenché une érosion catastrophique par le vent (dustbowl=ciel noir en plein jour) et par l'eau. En 1930, en pleine crise économique, 20% des terres cultivables étaient dégradées par l'érosion. Sous la pression de l'opinion publique, l'Etat a dû réagir. Sous l'impulsion de Bennet (1939) s'est constitué un service de conservation de l'eau et des sols, présent dans chaque canton, pour aménager leurs terres ; les services centraux (agronomes et hydrologues) effectuent les études et les projets.

Sur le plan de l'approche du problème de la lutte antiérosive, deux écoles s'affrontent encore aujourd'hui :

- L'une, à la suite des travaux de Bennet, observe que c'est le ravinement qui provoque les transports solides les plus spectaculaires : or, le ravinement provient de l'énergie du ruissellement qui est fonction de sa masse et de sa vitesse au carré ($E_{\text{Ruiss.}} = \frac{1}{2} MV^2$). La lutte antiérosive s'organise donc autour des moyens mécaniques de réduction de la seule vitesse du ruissellement et de sa force érosive (banquette de diversion, seuils et exutoires enherbés) sans réduire la masse de ruissellement aux champs.

- L'autre école, à la suite des travaux d'Ellison (1944) sur les processus de battance des gouttes de pluie et des équipes de Wischmeier (1960), rappelle que le ruissellement se développe après la dégradation de la structure de la surface du sol par l'énergie des gouttes de pluie. La lutte antiérosive s'organise cette fois sur les champs autour du couvert végétal, des techniques culturales et d'un minimum de structures dans le paysage.

A partir d'une analyse de fonctionnement de l'érosion et du ruissellement (causés par la saturation du milieu ou par l'état de surface battant), on arrive à évaluer le poids relatif des érosions aréolaires

et linéaires et d'en déterminer les conséquences en terme de stratégie de lutte antiérosive (communication de Lilin, 1991).

La défense et restauration des sols (DRS) s'est développée en Algérie, puis autour du bassin méditerranéen vers les années 1940-60, pour faire face à de graves problèmes de sédimentation dans les retenues artificielles et de dégradation des routes et des terres. Il s'agissait avant tout de mettre en défense les terres dégradées par le surpâturage et le défrichement, et de restaurer leur potentiel d'infiltration par l'arbre, considérée comme le moyen le plus sûr d'améliorer le sol. D'énormes moyens mécaniques et une main-d'œuvre locale abondante ont été mis en œuvre pour capter le ruissellement en nappe dans les terres cultivées (diverses banquettes, levées de Monjauze, etc...) pour reforester les terres dégradées et pour structurer des zones d'agriculture intensive (Plantié, 1961; Putod, 1960 Putod R. 1956; Monjauze, 1964.).

La préoccupation des forestiers était d'abord, de régénérer l'agriculture, et cela s'est fait dans le cadre de la « Rénovation Rurale » (Monjauze, 1964). Pour les forestiers, le concept DRS, de conservation ou de restauration des sols, était plus important que dans le cadre de la RTM.

Mais cette opération s'est déroulée dans un contexte politique autoritaire (guerre d'Algérie) et la finalité sociale de lutte contre le chômage est devenue rapidement prioritaire (creusement de fossés) pendant que les autres moyens étaient bloqués par la situation politique (communication de Mura, 1991).

Toutes ces démarches n'ont pas été totalement inutiles, car sans elles, la dégradation des paysages serait sans doute pire encore.

Cependant, le chercheur s'est mis à douter sérieusement du bien de la démarche de CES lorsqu'une enquête américaine a révélé que, finalement, l'érosion n'avait guère modifié la productivité des terres profondes. Dans bien des cas, les sols étaient une ressource renouvelable, mais que leur restauration a un prix souvent incompatible avec la pression économique.



Photo 5. Stratégies modernes antiérosive (www.physio-geo.revues.org)

3.2.4. La gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols

A la fin des années 80, de nombreuses critiques de chercheurs, de socio-économistes et d'agronomes se sont élevées pour constater l'échec fréquent des démarches d'aménagement hydraulique menées trop rapidement sans tenir compte de l'avis des populations (Lovejoy J.B. et Napier T. 1986.).

Aux Etats Unis, malgré 50 ans de travaux remarquables des services de CES et des millions de dollars investis chaque année, 25% des terres cultivées perdent encore plus de 12 t/ha/an, limite de tolérance sur les sols profonds. Si on n'a plus enregistré de vent de sable aussi catastrophique que dans les années 30, la pollution et l'envasement des barrages continuent de poser de graves problèmes. Pour améliorer l'efficacité de la démarche purement volontaire des paysans souhaitant protéger la productivité de leurs terres, l'Etat a promulgué des lois (sur la mise en culture des prairies, des marais et des terres fragiles), contraignant l'agriculteur à respecter des règles d'aménagements conservatoires, faute de quoi, il perd ses droits à tous les encouragements financiers destinés à soutenir l'agriculture américaine.(Roose 1987)

Au Maghreb et en Afrique de l'Ouest, les paysans préfèrent souvent abandonner les terres aménagées par l'Etat plutôt que d'entretenir des moyens de protection dont ils ignorent l'objectif et la propriété (Heusch B. 1986.).

Les raisons évoquées de ces échecs partiels sont multiples (Marchal, 1979 ; Lefay, 1986) :

- Choix de techniques peu adaptées au sol, au climat et à la pente ;
- Mauvaise planification ou réalisation peu soignée ou absence de suivi et d'entretien ;
- Absence de préparation des bénéficiaires et rejet du projet à cause d'une perte de surface non compensée par l'augmentation des rendements ;
- Désorganisation des unités de production (parcelles morcelées et isolées).

UNE STRATEGIE FONDEE SUR LE DEVELOPPEMENT AGRICOLE

Devant ces échecs, il fallait développer une nouvelle stratégie qui prenne mieux en compte les besoins des gestionnaires des terres, tant paysans qu'éleveurs, en proposant des méthodes qui améliorent à la fois la capacité d'infiltration du sol, sa fertilisation et les rendements, ou mieux, la marge bénéficiaire des paysans (Roose E. 1987.). Cette méthode a été appelée « Land Husbandry » par Shaxson, Hudson, Sanders, Roose et Moldenhauer en 1988, et « La gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols » par Roose en 1987.

La GCES prend pour point de départ, la façon dont les paysans ressentent les problèmes de dégradation des sols et comporte trois phases :

1. Des dialogues préparatoires entre paysans, chercheurs et services techniques. L'enquête porte aussi sur les contraintes socio-économiques et l'évaluation doit être faite conjointement par les paysans et les techniciens.
2. Des expérimentations sur les champs sont mises en place chez les paysans pour quantifier et comparer les risques de ruissellement ou d'érosion et les gains de rendement sous différents types de mise en valeur ou de techniques culturale améliorée. Il s'agit d'établir un référentiel

et de vérifier la faisabilité, la rentabilité et l'efficacité des méthodes antiérosives préconisées : l'évaluation doit être faite conjointement par les paysans et les techniciens.

3. Enfin, un plan d'aménagement global doit être défini après 1 à 5 ans de dialogue pour intensifier rationnellement l'exploitation des terres productives, pour structurer le paysage et pour fixer les ravines, stabiliser les terres en privilégiant les méthodes biologiques simples et maîtrisables par les paysans eux-mêmes. Rien ne peut se faire sans l'accord préalable des paysans amenés à gérer l'ensemble de leur terroir.

En fonction des conditions socio-économiques locales (gros propriétaires à la pointe du progrès ou petits paysans luttant pour leur survie), les solutions seront différentes, même si le milieu physique est le même. Là, se trouve une différence majeure des approches développées jusqu'ici : la diversité des solutions en fonction des conditions humaines.

-de la conservation des sols à la gestion de la biomasse et de la fertilité des sols

Dans le cadre de la GCES, il semble plus efficace et plus rentable pour les paysans de s'attacher à l'aménagement des bonnes terres en production avant qu'elles ne se dégradent, car on obtient une augmentation des rendements plus nette sur les terres profondes que sur les terres caillouteuses épuisées. « Mieux vaut prévenir que guérir ! ». Cependant, il existe quelques cas où la restauration des terres dégradées est prioritaire pour les populations.

- la restauration de la productivité des terres agricoles

Lorsqu'il s'agit de sols profonds et sains, mais qui ont été décapés par l'érosion ou dégradés par des cultures n'équilibrant pas le bilan des matières organiques ni des nutriments, il est rare que l'application d'une seule approche, biologique, physique ou chimique, donne satisfaction. Par contre, dans les zones tropicales semi-arides et surtout semi-humides et humides, la restauration de la productivité des sols peut être très rapide (1 à 4 ans) à condition de bien respecter les six règles suivantes (Rooseet *al*, 1992) :

- six règles à respecter pour la restauration des sols

1° Si le sol est décapé par l'érosion, il faut avant tout se rendre maître du ruissellement (cordon de pierres, haies vives, etc...).

2° Si le sol est compact, il faut réaliser un travail profond pour restaurer la macroporosité de la couverture pédologique.

3° La structure étant généralement instable, il faut en même temps enfouir un stabilisant (de la matière organique bien décomposée, du gypse, de la chaux) et semer une végétation produisant un enracinement profond et une biomasse exubérante capable de stabiliser les macropores du profil (ex. sorgho, *Stylosanthes*, *Pennisetum*, maïs, etc...).

4° Si l'horizon superficiel a été appauvri ou décapé, il faut réintroduire une microflore et une mésofaune susceptible de remettre en route l'évolution positive de la structure et l'assimilabilité des nutriments minéraux (fumier ou compost bien décomposés).

5° Si le sol est acide, il faut amender le sol jusqu'à ce que le pH dépasse 5 et que la toxicité aluminique et manganique soit écartée.

6° Enfin, corriger progressivement les carences minérales du sol en alimentant les plantes cultivées à leur rythme et en emballant le complément minéral (N et P) dans la fumure organique pour éviter sa lixiviation par le drainage ou son immobilisation par le fer ou l'alumine libre.

CONCLUSIONS

Le développement des sociétés humaines pose forcément des problèmes de dégradation des ressources naturelles. Pour faire face à ce défi, les sociétés rurales ont mis au point des stratégies traditionnelles de gestion de l'eau et de la fertilité des sols en équilibre avec le milieu physique et socio-économique de leur époque. Actuellement en déclin, ces méthodes traditionnelles ont été trop souvent ignorées, voire méprisées par les experts en CES. Mais il serait utile d'étudier leur fonctionnement et leur dynamique car elles peuvent servir de point de départ au dialogue avec les paysans pour une amélioration durable de leur environnement.

Face aux énormes problèmes de protection du patrimoine foncier, des ouvrages d'art et de qualité des eaux indispensables au développement des villes et des périmètres irrigués, les ingénieurs ont développé préférentiellement les approches mécaniques qui s'avèrent finalement coûteuses et relativement peu efficaces. On constate aujourd'hui que la protection des terres est l'affaire de ceux qui la gèrent : paysans et éleveurs. Pour obtenir leur participation, il paraît nécessaire de changer de stratégie, de répondre d'abord à leurs problèmes urgents (la sécurité alimentaire, l'amélioration de leur niveau de vie, etc...). La conservation du sol reste indispensable, mais elle est insuffisante pour assurer un développement réel et durable : les terres sont déjà trop pauvres et trop dégradées. La GCES tente d'y parvenir en améliorant à la fois la gestion de l'eau et des nutriments pour augmenter nettement la protection de biomasse.

L'aménagement du territoire reste le domaine de l'Etat, qui est le seul à disposer des ingénieurs compétents et des moyens suffisants pour résoudre des problèmes tels que la reforestation des montagnes, la correction torrentielle, l'aménagement des rivières, la stabilisation du réseau routier et des zones de glissement de terrain. La RTM et la CES restent donc des stratégies valables aujourd'hui, mais elles doivent être associées à des approches tenant mieux compte des intérêts des paysans.

3.3. LES ASPECTS SOCIO-ECONOMIQUES DE L'EROSION

L'érosion n'est pas seulement un problème technique. Si la lutte antiérosive a connu jusqu'ici des succès plutôt défavorables, ce n'est pas seulement parce qu'on n'a pas bien résolu tous les aspects techniques du problème, mais aussi, parce qu'on n'a pas suffisamment étudié les racines socio-économiques des crises d'érosion.

3.3.1. L'importance des averses exceptionnelles

Bien souvent, l'homme n'est pas le responsable direct de ces catastrophes naturelles, mais ce sont des forces naturelles qui en sont à l'origine, forces qu'il ne maîtrise pas. Par exemple: des éruptions volcaniques, des secousses sismiques ou encore, des pluies torrentielles tombant sur des sols gelés.

La question est de savoir si l'essentiel des dégâts causés par l'érosion provient de ces catastrophes qui sont provoqués par la somme de l'énergie des pluies tombant sur les sols cultivés susceptibles d'être aménagés.

Il est bien connu que les pluies exceptionnelles entraînent généralement de gros dégâts, l'importance relative de celles-ci est variable selon les milieux. En milieu tempéré, d'après Wischmeier, c'est la somme de l'érosivité de toutes les pluies significatives (supérieures à 12,5 mm) qui détermine le niveau annuel de l'érosion à l'échelle des versants. Dans les zones semi-arides, sahélo-saharienne ou méditerranéennes, il peut ne rien se passer pendant des années puis brutalement, à l'occasion d'une averse ou d'une série d'averses exceptionnelles, l'allure du paysage est modifiée en quelques heures pour des années, voire des siècles: ravines profondes, glissements de terrain, sapements de berges des oueds, sédimentations imposantes dans les plaines inondées. C'est ainsi qu'il n'est pas toujours facile de distinguer les ravines actuellement fonctionnelles, des formes héritées de l'histoire. Il n'y a donc pas toujours de lien direct entre les formes de l'érosion et le système d'exploitation du terrain qui l'entoure.

3.3.2. L'impact de l'érosion dans différentes régions

L'érosion est un problème dont la gravité varie beaucoup d'un site à un autre.

Aux Etats-Unis, vers 1930, 20 % des terres cultivables ont été gravement endommagées par l'érosion suite à la mise en culture inconsidérée des prairies de la Grande Plaine par les colons européens, peu habitués à ces conditions semi-arides. C'est l'époque sombre des "dustbowl", nuages de poussières qui obscurcissaient complètement l'air dans la Grande Plaine. Ces phénomènes, impressionnant l'opinion publique, ont déterminé le Gouvernement américain à former un grand service de conservation de l'eau et des sols mettant à la disposition des agriculteurs volontaires un appui technique et financier dans chaque canton. Parallèlement, un réseau de stations de recherches a été mis en place, qui, trente ans plus tard, aboutit à la formulation de l'équation universelle de perte en terre, connue sous le nom de USLE (Wischmeier et Smith, 1960; 1978). En 1986, Lovejoy et Napier remarquent qu'après cinquante ans d'investissement massif en hommes et en moyens, encore 25 % des terres cultivées perdent plus de 12 t/ha/an, limite reconnue tolérable. Le problème reste donc à l'ordre du jour, même si aujourd'hui on s'intéresse plus à la pollution et à la qualité des eaux qu'à la conservation des sols.

En France, Gobillot et Hénin (1956) lancèrent une enquête qui permit d'estimer que 4 millions d'hectares de terres cultivées étaient dégradées par l'érosion hydrique ou éolienne. Le danger étant considéré comme limité, les crédits de recherche dans ce domaine furent peu importants. Aussi, la France ne dispose toujours pas de référentiel de lutte antiérosive, ce qui pose bien des problèmes dans le cas des études d'impact.

Pour l'ensemble de la Communauté Economique Européenne (CEE), De Ploey (1990) estime que 25 millions d'hectares ont été gravement affectés par l'érosion. La France totaliserait 5 millions d'hectares et le coût des nuisances occasionnées par l'érosion s'élèverait à 10 milliards de FF., sans compter la valeur intrinsèque des sols perdus, difficilement chiffrables.

Des chiffres bien plus dramatiques donnèrent l'alarme dans les pays tropicaux. Combeau, en 1977, rapporte que 4/5 des terres de Madagascar sont soumises à l'érosion accélérée; 45 % de la surface de l'Algérie est affectée par l'érosion, soit 100 ha de terre arable perdus par jour de pluie !

En Tunisie, Hamza (1992) a évalué les transports solides moyens évacués chaque année par les différents bassins versants. En tenant compte d'une profondeur moyenne des sols de 50 centimètres, ce seraient 15000 ha de terres qui se perdent en mer par érosion hydrique chaque année.

3.3.3. Les conséquences de l'érosion en aval : les nuisances

A l'amont, l'érosion touche des individus: elle est souvent perçue comme une fatalité. A l'aval, les nuisances dérangent des collectivités.

L'érosion a des influences négatives très variables sur les rendements (nulles à fortes) et sur le potentiel de production des terres. Mais le coût des nuisances à l'aval des champs érodés est généralement bien plus élevé, les effets sont bien plus spectaculaires, et justifient la plupart des interventions importantes dans le domaine de la lutte antiérosive.

C'est le cas de la DRS dont l'objectif est de protéger les terres, mais surtout d'éviter l'envasement trop rapide des barrages, la destruction d'ouvrages d'art, des routes et des villages.

Les nuisances à l'aval, c'est d'abord la baisse de la qualité des eaux des rivières par les matières en suspension (MES) qui accompagnent les crues formées en majorité par le ruissellement. Avec la charge en suspension, circulent les charges organiques (danger pour l'oxygène nécessaire à la faune) liées par exemple à l'élevage intensif (lisier). Les apports d'azote et de phosphore (engrais minéraux utilisés par des paysans) qui vont entraîner l'eutrophisation des étangs (envahissement par les algues, qui à leur tour, vont asphyxier les poissons). Si le ruissellement abondant à certaines périodes de l'année entraîne l'augmentation des débits de pointe dans les exutoires, il aboutit également à réduire l'alimentation des nappes et les débits d'étiage. D'une part, il provoque dans la vallée la reprise de matériaux sédimentés sur le fond et les berges: cette reprise d'érosion au niveau des petites rivières s'observe très souvent en Afrique. D'autre part, en saison sèche, le faible débit d'étiage n'arrive plus à évacuer les polluants secrétés par les industries, les villes et les cultures intensives: d'où l'eutrophisation des rivières et la mort de dizaines de tonnes de poissons chaque année. Les nuisances proviennent aussi des transports solides liés aux grandes crues qui laissent des torrents de boue au bas des champs, dans les fossés, sur les routes, dans les caves. Une fois le débit de pointe passé, des masses considérables de sédiments se déposent dans les lacs, les fleuves, les canaux et les ports.

C'est ainsi que la durée de vie des barrages, élément essentiel de leur rentabilité économique, varie considérablement d'une région à une autre, et dans une même région, en fonction des dimensions respectives du réservoir et du bassin, mais aussi du climat et de la couverture végétale, de l'aménagement des versants, des ravines et des berges des rivières.

En Algérie, un effort louable a été entrepris depuis les années 1945 pour reforester les têtes de vallées (50.000 ha), les "badlands", fixer les ravines et corriger les oueds, aménager 300.000 ha de terres cultivées en banquettes d'absorption ou de diversion (construites par les services de DRS puis

par la Direction Nationale des Forêts). Depuis 1978, la construction de banquettes a été suspendue, suite aux critiques des chercheurs, au rejet des paysans, et surtout, aux difficultés économiques. La lutte antiérosive a été restreinte à la protection des ouvrages d'art, à la reforestation, à la végétalisation des ravines et à la construction des grands barrages: il ne reste que la RTM en faveur de la qualité des eaux, des périmètres irrigués et des besoins des citadins des grandes villes. Pour les paysans, les seules actions de l'Etat concernent aujourd'hui l'amélioration foncière (c'est-à-dire, sous-solage des sols à croûte calcaire, qui augmente la productivité des céréales) et la création de petites retenues collinaires, fournissant de l'eau en tête de vallée pour le bétail, l'habitat et quelques hectares d'irrigation. Même cette politique est remise en cause par des hydrologues qui font remarquer que l'envasement des barrages n'a pas diminué depuis l'effort consenti par l'aménagement des hautes vallées. Les travaux de Heusch (1970 et 1982) et Demmak (1982) montrent que la majorité des sédiments piégés dans les réservoirs proviennent du ravinement, des glissements de terrain, des éboulements des berges et de la divagation des oueds. En fonction de la part des objectifs des projets de lutte antiérosive en vue de réduire les nuisances à l'aval ou de préserver le capital foncier des versants, on cherchera un compromis permettant d'intervenir dans les vallées pour piéger les sédiments et stabiliser les berges tout en aménageant les versants pour réduire et retarder le ruissellement (améliorations foncières, talus enherbés, techniques culturales pour couvrir le sol en hiver et revégétaliser les zones sur pâturées).

3.3.4. Les critères de succès des projets de conservation des sols

Au Séminaire de Porto-Rico en 1987, l'ensemble des 136 participants, chercheurs et développeurs ayant tous une expérience de conservation des sols en région tropicale à pente forte, ont discuté longuement des raisons de succès des projets de conservation des sols (Sanders, 1988; Hudson, 1991) et ils ont conclu :

- Pas de recette universelle. Si les règles de conservation de l'eau et de la fertilité des sols sont valables partout, les conditions écologiques combinées aux conditions socio-économiques sont si variables qu'il faut bien se garder de proposer des recettes universelles. Il convient d'une part, d'étudier l'efficacité, le coût et les limites de chaque technique, ensuite de définir pour chaque pays des régions où les conditions écologiques sont globalement homogènes, et enfin, de proposer une palette de solutions en fonction des conditions locales de pente, de régime foncier, de possibilités économiques, de formation des chefs d'exploitation, de disponibilité en main-d'œuvre et en matériaux.

- Tenir compte des priorités immédiates des paysans: augmenter la production, la sécurité, les revenus et le niveau de vie, valoriser le travail. Si la conservation des sols n'est conçue qu'en fonction des problèmes posés par les dégâts causés par les sédiments ou les inondations à l'aval, le paysan des hautes vallées ne se sentira pas concerné: l'Etat devra intervenir et prendre en charge l'équipement hydraulique rural. La conservation des eaux et des sols exige un rude effort pour structurer le paysage, gérer les eaux de ruissellement, modifier les techniques culturales et entretenir au fil des années les aménagements. Si les paysans remarquent que les terres continuent à se dégrader (par minéralisation des matières organiques et battance des pluies) et les rendements des cultures à décroître, ils vont vite renoncer à étendre, voire même à entretenir, les dispositifs antiérosifs qui exigent tant d'effort sans rien rapporter. Il est donc nécessaire de proposer des systèmes peu coûteux, efficaces pour gérer l'eau, mais aussi associés à un ensemble de techniques

capables d'améliorer les récoltes et les revenus nets des paysans, de réduire les risques ou de simplifier le travail (nouvelles cultures plus rentables, marché où vendre à des prix intéressants, graines sélectionnées, engrais, herbicides, pesticides).

- S'appuyer sur les méthodes traditionnelles: Trop souvent méprisées, il faut les étudier, évaluer leur variabilité d'un paysan à un autre, leurs limites, leurs potentialités économiques, les améliorations. On peut même en tirer des conclusions sur le milieu écologique, le bilan hydrique, les risques majeurs (en année très sèche ou en cas d'averses diluviennes). En effet, le paysan traditionnel ne peut se permettre le luxe de rater complètement une récolte: il intègre donc le fonctionnement du paysage en période exceptionnelle (Roose, 1990).

- Des programmes à long terme avec une grande flexibilité. Comme il s'agit de faire naître un changement profond de comportement (l'érosion n'est pas une fatalité, mais le résultat d'une gestion imprudente), il faut du temps pour convaincre, du temps pour mettre au point les techniques, du temps pour former les futurs responsables des communautés rurales.

- Des projets modestes s'étendant progressivement(reproductibilité). Comme il est indispensable que la communauté rurale prenne en charge son environnement, il est plus sage de commencer modestement par des actions simples d'intensification de la production et de progresser en fonction de la participation paysanne à tous les stades de la mise au point de techniques, à leur réalisation, à leur évaluation, leur entretien et leur généralisation sur un versant, un terroir, une colline ou un petit bassin versant.

- La nécessité d'une sécurité foncière: un paysan qui loue sa terre n'est pas sûr de la garder, une fois aménagée ! Craignant une tentative d'appropriation, son propriétaire peut la lui reprendre, quitte à la louer plus cher à un concurrent. C'est un des graves problèmes posé par le développement des pratiques agroforestières.

- S'appuyer sur les structures existantes. Créer une nouvelle structure entraîne le risque de ne pas écouter suffisamment les populations locales, méconnaître les coutumes et voir les dispositifs antiérosifs abandonnés à la fin du projet.

- Tenir compte des systèmes de production locaux et des contraintes familiales. Il s'agit souvent, dans un premier temps, de comprendre l'organisation économique, sociale et politique d'un groupement paysan (village, quartier, etc...) d'en saisir les contraintes (disponibilité en travail, en énergie, en fumier, en intrants, possibilité de vendre les excès de production sur le marché ou de les transformer: élevage, artisanat, commerce).

Les femmes constituant plus de 50 % des actifs sur les chantiers de CES, il faut donc prévoir leur formation dans des groupements féminins. Il faut analyser les stratégies traditionnelles de gestion de l'eau, de la fertilité des terres, de la protection contre l'érosion ou l'acidification, choisir des représentants des groupes de paysans pour transmettre les messages, former les communautés, les entraîner progressivement à introduire des innovations techniques sans créer de tension entre des paysans.

- Intervenir à la fois sur l'agriculture, l'élevage et la production d'arbres. En général, les paysans s'intéressent d'abord à la production de plantes vivrières (pour assurer leur sécurité alimentaire), ensuite à l'élevage (c'est leur caisse d'épargne, leur réserve de liquidité en cas de besoin). A part les arbres fruitiers, les arbres ne sont pas cultivés: ils sont considérés en milieu traditionnel, comme un don de la nature que l'on exploite à mesure des besoins. La propriété de la terre, du bois, des arbres et des fruits des arbres n'est pas forcément liée à la même personne. Il y'a des pays où le service des Eaux et Forêts délivre des permis d'exploitation aux seuls bûcherons reconnus qui exploitent les arbres en fonction du marché de l'énergie (bois de feu) ou de la construction (perches ou poutres) de la ville proche sans tenir compte du propriétaire de la terre. On comprend alors que les propriétaires soient réticents à planter des arbres s'ils ne sont pas sûrs de pouvoir les exploiter. Si "seul le bois coupé en fagots a un propriétaire", on comprend mieux la dégradation du couvert arboré en Afrique de l'Ouest, puisque n'importe qui peut couper la cime pour donner du fourrage à son troupeau !

- Les subsides, l'aide alimentaire, les salaires. Il est maintenant admis que les incitations, les dons de nourriture, d'outils, de salaire, etc... Toute gratification en échange d'une participation à un projet d'aménagement soit limitée car ils entraînent souvent le désintérêt des participants dès que l'aide disparaît. En tous cas, sur les terres privées qui bénéficient de l'aménagement, l'aide doit être réduite au minimum (des engrais, des arbres et graines sélectionnées) et supprimée dès que les partenaires sont convaincus de leur efficacité. Cependant, il est des milieux très ingrats (Sahel), des familles nombreuses dépourvues de terres, des jeunes à la recherche de travail, pour lesquels le paiement d'une forme de salaire est indispensable si l'on a besoin de mobiliser une abondante main-d'œuvre durant la saison sèche: sans cet apport indispensable à la survie du groupe, les adultes les plus capables émigrent à l'étranger pour valoriser au mieux leur travail - même dans ce cas, la gratification doit être réduite pour permettre aux participants de développer un sentiment de propriété vis-à-vis des aménagements au point qu'ils se sentent responsables de leur entretien, de leur respect. Par contre, il est bon de faciliter la tâche des paysans en fournissant à des prix subventionnés, des équipements leur permettant d'étendre plus vite les actions d'aménagement (pics, pelles, pioches, faucilles, engrais, brouettes, charrettes pour transporter les pierres).

- La formation des paysans et paysannes à des méthodes simples. Si on veut que les aménagements continuent à s'étendre une fois le projet terminé, il faut apporter un soin particulier au choix de méthodes simples, accessibles à tous les villageois après formation d'un de leurs délégués. Il faut que chacun puisse travailler sur sa terre à son rythme, quand il le veut.

Les projets introduisant du matériel lourd offrent la meilleure garantie d'un développement rapide des structures de DRS sur le terrain et d'un échec dès que le projet se termine (pas d'entretien par les paysans). En effet, cette approche court-circuite la phase de dialogue et les tests préliminaires d'évaluation de la faisabilité, de l'efficacité et de la rentabilité des méthodes chez le paysan.

- La conception des projets. Pour la préparation d'un projet, il passe actuellement deux à trois missions - trop pressées sur le terrain pour discuter avec les paysans de leurs problèmes et de leurs méthodes traditionnelles. Chaque mission rédige un rapport sans trop se préoccuper d'accumuler les informations récoltées par les précédents. Certains préconisent aujourd'hui de condenser les trois phases en une, de façon à ce que la même équipe ait le temps de bien s'insérer dans le pays et de récolter des informations de première main, directement sur le terrain.

- La recherche et le suivi-évaluation des projets. Il reste encore bien des points techniques à préciser dans le domaine de la lutte antiérosive, mais l'étude des interférences entre le milieu humain et les connaissances techniques (en particulier le coût économique de l'érosion) s'avère nécessaire. Les chercheurs ont malheureusement rarement les moyens de mettre en place des aménagements antiérosifs particuliers. Par contre, l'analyse d'aménagements plus ou moins anciens, le suivi et l'évaluation fréquente de nouveaux programmes peuvent cependant permettre de bien comprendre les contraintes techniques et humaines.

4. DEUXIEME CHAPITRE : LES FACTEURS DE RISQUE DE L'EROSION

4.1. L'EROSION SECHE

4.1.1. Définition et processus

L'érosion sèche est un processus d'arrachement, de transport et de dépôt de sédiments sans intervention de l'eau, qui par gravité et par simple poussée des instruments aratoires, décape les horizons superficiels des hauts de pente et des ruptures de pente, puis pousse ces masses de terre vers le bas où elles s'accumulent soit en talus, en bordure de parcelles, soit en colluvions concaves de texture peu différente des horizons d'origine.

Chaque labour entraîne une tranche de terre (environ 10 t/ha si la parcelle fait 100 m de large x 100 m de haut) et chaque sarclage déplace quelques mottes de terre vers le bas (environ 1 t/ha). Au bout du compte, on arrive à devoir monter une murette de 1,30 mètre en 24 mois (soit environ 40 t/ha/an) et on construit des talus de 1 m en 4 à 5 ans, soit un rehaussement de 20 cm par an (Côte d'Ivoire, au Rwanda et au Burundi-Roose et Bertrand, 1971 et Roose *et al.*, 1990).

En Algérie, sur un versant de 35 % de pente sur sol fersialitique rouge, un verger fut planté vers 1960 près d'Ouzera. Trente ans plus tard, les arbres sont juchés sur un piédestal: 30 cm de terre ont été décapés entre les arbres ! Même si on cumulait pendant 30 ans l'érosion mesurée à la parcelle nue (15 t/ha/an = 1 mm), l'érosion ne dépasserait pas 3 cm, tandis que la reptation de la couverture pédologique par le travail du sol atteindrait 27 cm, soit 135 t/ha/an (Roose, 1991) pour deux labours croisés (à l'automne et au printemps) pour maintenir le sol nu et motteux.

4.1.2. Les facteurs

L'intensité du déplacement de terre dépend:

- du type d'outil:

La charrue à soc déplace plus de terre que le chiesel (Revel, 1989), et plus que les charrues à disques, que la houe et que la herse.

- de la fréquence des passages:

En zone humide, à deux saisons des pluies, il y a deux labours plus quatre sarclages. En zone tropicale humide à une saison, il y a un labour plus deux sarclages. En zone méditerranéenne semi humide, il y a souvent deux labours grossiers et deux sarclages. En zone semi-aride il y a un labour plus un sarclage et en zone tempérée, il y a un labour et deux ou trois hersages.

- de l'orientation du travail:

Le travail du sol peut être effectué en courbes de niveau et le versoir orienté vers l'aval ou bien vers l'amont. Le travail peut s'effectuer du haut de la colline vers le bas (c'est le cas général pour les tracteurs lorsqu'ils cultivent en zone de pentes supérieures à 15 %). Et enfin, le travail peut s'effectuer du bas vers le haut de la parcelle: c'est le cas général des travaux manuels dans les pays

en développement. Il est très rare que la terre soit remontée par les outils. Par contre, il arrive qu'en montagne et dans les zones où la terre est rare, que l'on récupère mécaniquement ou dans des petits paniers de la terre dans la plaine pour la remonter dans la montagne. On remarque que l'aller et le retour des outils peuvent réduire considérablement la vitesse du décapage par l'érosion mécanique sèche (Revel *et al.*, 1989).

- de la pente.

Plus la pente est forte et plus les mottes détachées par la houe roulent bas. En zone de montagne, les hauts de pente et sommets des collines sont souvent décapés, ce qui montre une érosion en nappe qui n'est pas compensée mais surtout une érosion mécanique sèche importante.

Les ruptures de pente sont aussi altérées, la surface du sol y est plus claire et les horizons humifères moins épais: il doit donc y avoir accélération du décapage lorsque la pente est forte et ralentissement ou colluvionnement sur les pentes plus faibles, en particulier sur les talus ou les bas de pente. On a souvent confondu les deux processus: érosion en nappe et érosion mécanique sèche et on a expliqué les taches blanches en haut de pente et en rupture de pente comme étant la preuve d'une érosion en nappe alors que l'érosion mécanique sèche par les outils est probablement deux à dix fois plus efficace que l'érosion en nappe (Wassmer, 1981; Nyamulinda, 1989).

4.1.3. La lutte antiérosive

On a souvent confondu la lutte contre l'érosion en nappe avec la lutte contre l'érosion mécanique sèche, car les facteurs et les méthodes de lutte se recoupent.

- Réduire le nombre de passages des outils et l'importance du travail du sol.

On tend vers le travail réduit au minimum (minimum tillage) lorsque les résidus de culture sont abandonnés à la surface du sol et que l'on ne cultive plus au printemps que des raies qui couvrent 10 % de la surface du sol. C'est la méthode la plus efficace (S.O. France: Roose et Cavalié, 1986).

- Il faut réduire l'énergie dépensée pour le travail du sol.

Lapréparation du sol ne nécessite pas de retourner ce dernier avec une charrue. Un simple éclatement par les dents de chiesel ou d'un cultivateur aère en profondeur, augmente la macroporosité, la capacité de stockage de l'eau, l'enracinement et maintient en surface la matière organique et les résidus de culture.

- L'orientation du travail.

Si la pente est inférieure à 14 %, il est possible de travailler mécaniquement le sol, alternativement dans un sens et dans l'autre, d'où des compensations ou ralentissement des transports solides (Revel, 1989). Si par contre la pente est supérieure à 14 %, les tracteurs risquent de verser: il faut donc, ou bien cloisonner le paysage en bandes cultivées entre des talus et réduire suffisamment la pente, ou bien développer des cultures pérennes sans travail du sol avec des plantes de couverture ou avec paillage, ou bien labourer et sarcler dans le sens de la plus grande pente mais semer

perpendiculairement à la pente et prévoir des barrages, des petites diguettes, tous les 10 m ou des cultures manuelles localisées espacées le plus possible dans la saison.

4.2. L'ÉROSION EN NAPPE OU LE STADE INITIAL DE L'ÉROSION HYDRIQUE

On parle d'érosion en nappe ou aréolaire (sheeterosion) parce que l'énergie des gouttes de pluie s'applique à toute la surface du sol et le transport des matériaux détachés s'effectue par le ruissellement en nappe. C'est le stade initial de la dégradation des sols par érosion

4.2.1. Les formes et les symptômes de l'érosion en nappe

L'érosion en nappe entraîne la dégradation du sol sur l'ensemble de sa surface, elle est peu visible d'une année à l'autre puisqu'une érosion importante de 15 à 30 t/ha/an correspond à une perte de hauteur de 1 à 2 mm. Cependant, combinée à l'érosion mécanique sèche (et à la dégradation de la macroporosité suite à la minéralisation accélérée des matières organiques, ou par simple tassement par les outils), l'érosion en nappe peut entraîner un **décapage de la majorité de l'horizon humifère** en quelques dizaines d'années. Le signe le plus connu de l'érosion en nappe est donc la présence de **plages de couleur claire** aux endroits les plus décapés, les plus agressés des champs (haut de collines, et rupture de pentes).

Le deuxième symptôme est **la remontée des cailloux** en surface par les outils de travail du sol. Un travail profond du sol remonte en surface les cailloux. Après quelques pluies, les terres fines sont entraînées par les pluies soit par drainage en profondeur, soit par érosion sélective, tandis que les cailloux trop lourds pour être emportés s'accumulent à la surface du sol (Roose, 1973 et Poesen, 1989).

Les conséquences de l'érosion en nappe sont:

- **Le nivellement de la surface du sol** par dégradation des mottes et remplissage des creux. Il s'ensuit des croûtes diverses, lisses et blanchies
- **La squelettisation des horizons superficiels** par perte sélective des matières organiques et des argiles, laissant en place une couche de sable et de gravier, plus claire que l'horizon humifère sous-jacent.
- **Le décapage de l'horizon humifère** laissant des plages de couleur claire: l'horizon minéral sous-jacent apparaît à l'air libre.

4.2.2. La cause et les processus d'érosion en nappe

La cause de l'érosion en nappe est l'énergie de la battance des pluies sur les sols dénudés (Ellison, 1944). L'arrachement des particules de terre vient de l'énergie des gouttes de pluie, lesquelles sont caractérisées par une vitesse de chute (fonction de leur hauteur de chute et de la vitesse du vent) et par un certain poids, fonction de leurs diamètres. Au bout de 10 m de chute, la vitesse des gouttes de pluie atteint 90 % de la vitesse finale, déterminée par l'équilibre entre l'attraction universelle et la résistance à l'air de la surface portante de la goutte (Lawson, 1984). Le vent peut augmenter l'énergie des gouttes de pluie de 20 à 50 %. Sous la cime des grands arbres, l'énergie des gouttes de

pluie est souvent plus forte que dans la parcelle cultivée car les gouttes se réunissent sur les ligules des feuilles, formant des gouttes plus grosses (Valentin, 1982).

Cette énergie de battance est dissipée par quatre actions:

- **tassement du sol** sous l'impact des pluies après humectation rapide de la surface du sol,
- **écrasement et force tangentielle d'arrachement** (shearing stress): séparation des particules agrégées,
- **projection des particules** élémentaires selon une couronne sur sol plat et transport dans toutes les directions mais plus efficacement vers l'aval sur les pentes,
- **bruit du choc des gouttes** sur les matériaux résistants.

A cette énergie des pluies est opposée la cohésion ou la **résistance d'un matériau terreux**. Celui-ci peut être déjà plus ou moins dégradé:

- par **éclatement** au contact des gouttes sur les mottes desséchées,
- par **humectation** suivie de dessiccation qui donne des petites mottes fissurées,
- par **tassement** par les pneus ou par les rouleaux qui donnent des petites mottes éclatées,
- par **dispersion des colloïdes**, soit par humectation prolongée, soit par salinisation ou par la présence de sodium échangeable.

Le matériau sol peut être plus ou moins résistant du fait de la présence de cailloux ou bien en fonction du pourcentage de limon et sable fin (10 à 100 microns), de matières organiques et d'argile, de la présence de gypse ou de calcaire, d'hydroxydes de fer et d'alumine libre, en fonction également de la stabilité structurale et de la perméabilité du profil .

Le déplacement des particules se fait d'abord par effet "splash" à courte distance et ensuite par le ruissellement en nappe. La battance des gouttes de pluie envoie des gouttelettes et des particules dans toutes les directions mais, sur les pentes, la distance parcourue vers l'amont est inférieure à la distance parcourue vers l'aval. Ce n'est qu'après formation des flaques et débordement de l'eau non infiltrée d'une flaque à l'autre, que naît le ruissellement en nappe. Celui-ci s'étalant à la surface du sol gardera une faible vitesse même sur des pentes de 5 à 10, % à cause de la rugosité du sol (mottes, herbes, feuilles, racines, cailloux, etc...) qui l'empêchent de dépasser la vitesse limite de 25 cm/seconde.

Sédimentation: c'est au cours de la battance des pluies que des particules ou même des agrégats vont quitter les mottes pour sédimenter dans les creux et y former des croûtes de sédimentation à très faible capacité d'infiltration

L'érosion en nappe observée sur parcelle d'érosion dépend à la fois :

- de l'intensité maximale des pluies qui déclenchent le ruissellement ,
- de l'énergie des pluies qui détachent les particules susceptibles de migrer,
- de la durée des pluies et/ou de l'humidité avant les pluies.

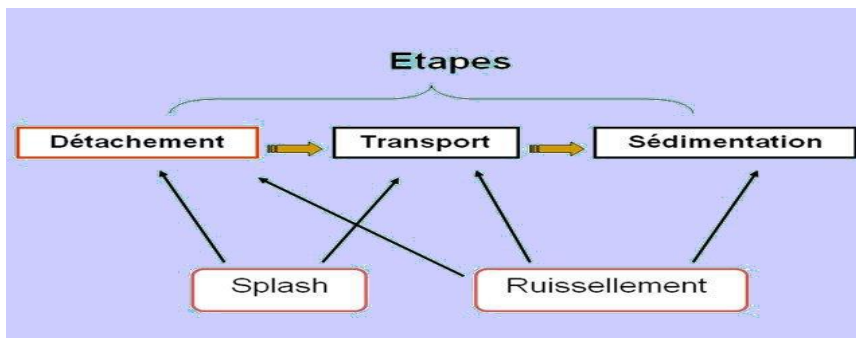


Figure 1. Étapes de l'érosion hydrique (Mazour M., 2004)

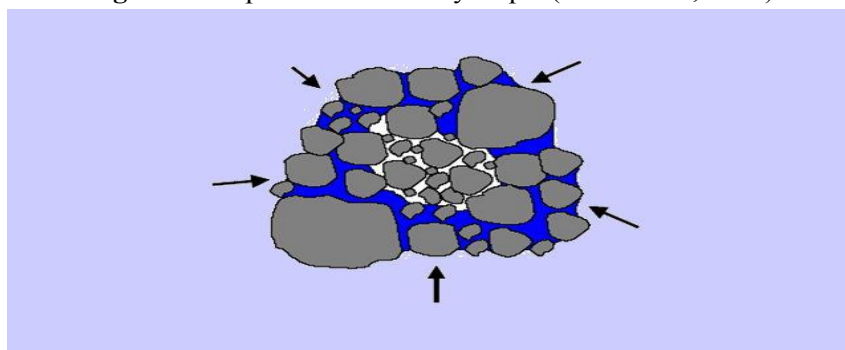


Figure 2. Processus de l'éclatement et de désagrégation des particules de sol (Mazour M., 2004)

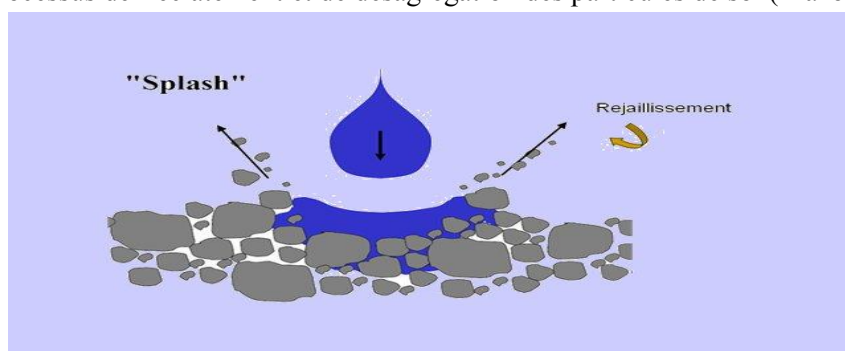


Figure 3. L'effet splash (Mazour M., 2004)

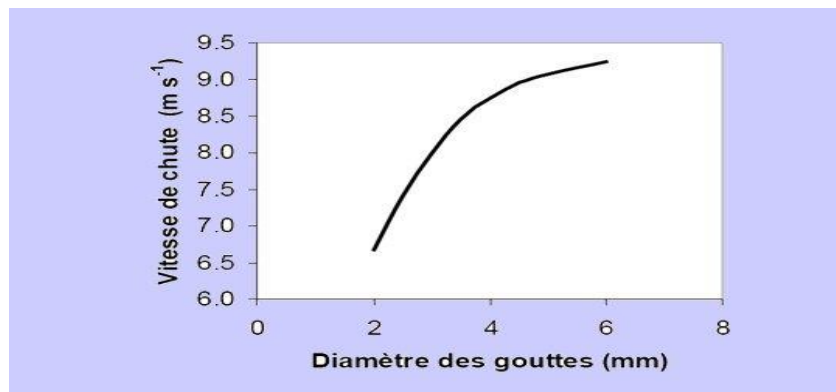


Figure 4. Courbe de la vitesse de chute des gouttes de pluie en fonction de leur diamètre (Valentin, 1982)

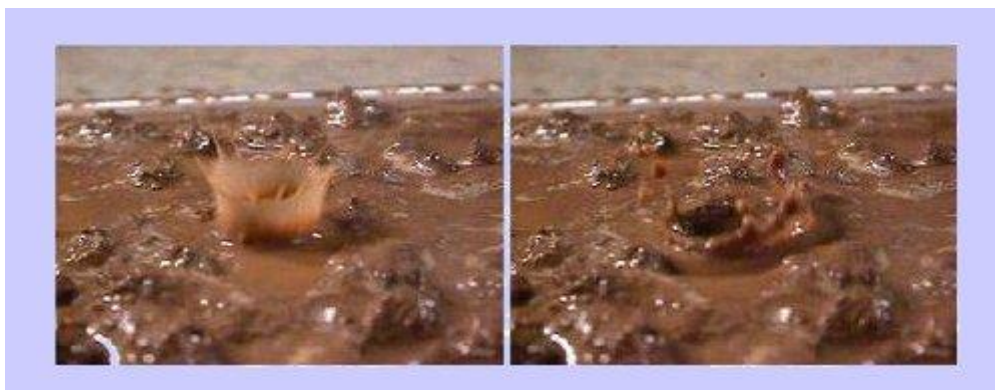


Photo 6. Rejaillissement du sol et de l'eau suite à l'impact d'une goutte d'eau ou effet splash (Le Bissonnais).

4.2.3. Le modèle empirique de perte en terre de Wischmeier et Smith (USLE)

Vingt ans après la mise en place des essais d'érosion en parcelles dans une bonne dizaine d'Etats d'Amérique du Nord, il existait une accumulation d'un grand nombre de données sur l'érosion dont il convenait de faire la synthèse. En 1958, Wischmeier, statisticien du Service de Conservation des Sols fut chargé de l'analyse et de la synthèse de plus de 10.000 mesures annuelles de l'érosion sur parcelles et sur petits bassins versants dans 46 stations de la Grande Plaine américaine. L'objectif de Wischmeier et Smith (1960; 1978) était d'établir un modèle empirique de prévision de l'érosion à l'échelle du champ cultivé pour permettre aux techniciens de la lutte antiérosive de choisir le type d'aménagement nécessaire pour garder l'érosion en-dessous d'une valeur limite tolérable étant donné le climat, la pente et les facteurs de production.

ANALYSE DES PRINCIPES DU MODELE

Selon ce modèle, l'érosion est une **fonction multiplicative de l'érosivité des pluies** (le facteur R, qui est égal à l'énergie potentielle) **que multiplie la résistance du milieu**, laquelle comprend K (l'érodibilité du sol), S L (le facteur topographique), C (le couvert végétal et les pratiques culturales)

et P (les pratiques antiérosives). C'est une fonction multiplicative, de telle sorte que si un facteur tend vers zéro, l'érosion tend vers 0.

Ce modèle de prévision de l'érosion est constitué d'un ensemble de cinq sous-modèles:

$$E = R \times K \times SL \times C \times P$$

1° Tout d'abord, R, **l'indice d'érosivité des pluies** est égal à E. l'énergie cinétique des pluies, que multiplie I_{30} (l'intensité maximale des pluies durant 30 minutes exprimée en cm par heure). Cet indice correspond aux risques érosifs potentiels dans une région donnée où se manifeste l'érosion en nappe sur une parcelle nue de 9 % de pente.

2° **L'érodibilité des sols (K)** est fonction des matières organiques et de la texture des sols, de la perméabilité et de la structure du profil. Il varie de 70/100ème pour les sols les plus fragiles à 1/100ème sur les sols les plus stables. Il se mesure sur des parcelles nues de référence de 22,2 m de long sur des pentes de 9 % et sur un sol nu, travaillé dans le sens de la pente et qui n'a plus reçu de matières organiques depuis trois ans.

3° **SL, le facteur topographique**, dépend à la fois de la longueur de pente et de l'inclinaison de la pente. Il varie de 0,1 à 5 dans les situations les plus fréquentes de culture en Afrique de l'Ouest et peut atteindre 20 en montagne.

4° **C, le facteur couvert végétal**, est un simple rapport entre l'érosion sur sol nu et l'érosion observée sous un système de production. On confond dans le même facteur C, à la fois le couvert végétal, son niveau de production et les techniques culturales qui y sont associées. Ce facteur varie de 1 sur sol nu à 1/1000ème sous forêt, 1/100ème sous prairies et plantes de couverture, 1 à 9/10ème sous cultures sarclées.

5° **Enfin, P**, est un facteur qui tient compte des **pratiques purement antiérosives** comme par exemple le labour en courbe de niveau ou le buttage, ou le billonnage en courbe de niveau. Il varie entre 1 sur un sol nu sans aucun aménagement antiérosif à 1/10ème environ, lorsque sur une pente faible, on pratique le billonnage cloisonné.

CALCUL DE L'INDICE R D'AGRESSIVITE DES PLUIES (d'après Wischmeier et Smith, 1978)

Pour chaque averse, délimiter des périodes d'intensité uniforme.

A chaque intensité, correspond une énergie cinétique selon l'équation:

$$E = 210 + 89 \log_{10} I$$

E = énergie cinétique de la pluie exprimée en tonne métrique x mètre/ha/cm de pluie.

I = intensité des averses de durée 30 minutes exprimée en cm/h.

L'indice R annuel n'est pas directement lié à la pluviosité annuelle. Cependant, en Afrique de l'Ouest, Roose a montré que R annuel moyen sur 10 ans = pluie annuelle moyenne x a

a = • 0,5 dans la majorité des cas ± 0,05

- 0,6 à proximité de la mer (< 40 km)
- 0,3 à 0,2 en montagne tropicale
- 0,1 en montagne méditerranéenne

LES LIMITES INTRINSEQUES DU MODELE "USLE"

Première limite: Ce modèle ne s'applique qu'à l'**érosion en nappe** puisque la source d'énergie est la pluie: il ne s'applique donc jamais à l'érosion linéaire, ni à l'érosion en masse.

Deuxième limite: Le type de paysage: ce modèle a été testé et vérifié dans des **paysages de pénéplaines et de collines** sur des pentes de 1 à 20 % à l'exclusion des montagnes jeunes, en particulier des pentes supérieures à 40 % où le ruissellement est une source d'énergie plus grande que les pluies et où les mouvements de masse sont importants.

Troisième limite: Les types de pluies: les relations entre l'énergie cinétique et l'intensité des pluies utilisées généralement dans ce modèle ne sont valables que dans la plaine américaine. Elles ne sont pas valables en montagne mais on peut développer des sous-modèles différents pour l'indice d'érosivité des pluies, R.

Quatrième limite: Ce modèle ne s'applique que **pour des données moyennes** sur 20 ans. Elles ne sont donc **pas valables à l'échelle de l'averse**. Un modèle MUSLE a été mis au point pour estimer les transports solides de chaque averse, qui ne tient plus compte de l'érosivité de la pluie mais **du volume ruisselé** (Williams, 1975).

Cinquième limite: Une limite importante de ce modèle, c'est qu'il **néglige certaines interactions** entre les facteurs pour pouvoir distinguer plus facilement l'effet de chacun des facteurs. Par exemple, il n'est pas tenu compte de l'effet de la pente combiné au couvert végétal sur l'érosion, ni de l'effet du type de sol sur l'effet de la pente.

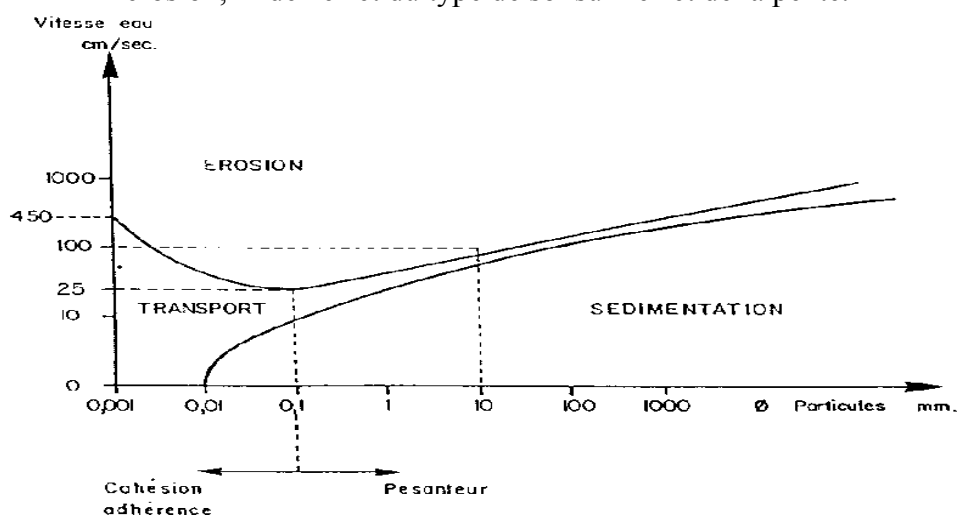


Figure 5. Diagramme de Hjulström

Ce diagramme nous apporte des informations très importantes.

1. Les matériaux les plus sensibles à l'arrachement par le ruissellement ont une texture voisine des sables fins de 100 microns. Les matériaux plus argileux sont plus cohérents. Les matériaux plus grossiers ont des particules lourdes qui exigent une vitesse supérieure du fluide. Il est intéressant de noter que pour Wischmeier *et al.*, (1971), les sols les plus érodibles sont ceux qui sont riches en limons et sables fins.

2. Tant que les écoulements s'effectuent à une vitesse faible (25 cm/seconde), ils ne peuvent éroder les matériaux. Pour éviter l'érosion linéaire, il faut donc s'appliquer à étaler et ralentir les écoulements. D'où l'origine de la théorie de la dissipation de l'énergie du ruissellement.

3. Le transport des particules fines argileuses et limoneuses s'effectue facilement, même pour de faibles vitesses. Mais, pour les matériaux plus grossiers que les sables fins, on passe très vite de la zone d'érosion à la zone de sédimentation. On comprend donc pourquoi les fossés d'évacuation des eaux de ruissellement sont soit érodés s'ils sont trop étroits ou trop pentus, soit ensablés par les matériaux grossiers qui n'arrivent pas à circuler. C'est une des raisons pour lesquelles les fossés de diversion ne donnent pas satisfaction dans les pays en développement, car il faut dessabler et entretenir régulièrement les fossés et terrasses de diversion.

4.2.4. L'érodibilité des sols

L'érodibilité d'un sol, en tant que matériau plus ou moins cohérent, est sa résistance à deux sources d'énergie: d'une part, la battance des gouttes de pluies à la surface du sol et d'autre part, l'entaille du ruissellement entre les mottes, dans les griffes ou les rigoles. Les premières études d'érodibilité des matériaux ont été effectuées par Hjulström dans des canaux.

Le diagramme de Hjulström montre qu'il existe trois secteurs en fonction de la vitesse des eaux et du diamètre des particules des matériaux terreux. L'analyse du secteur érosion montre que les matériaux les plus fragiles ont une texture telle que le diamètre des particules est de l'ordre de 100 microns, c'est à dire des sables fins. Lorsque les matériaux terreux sont plus fins, se développe une cohésion par simple frottement entre les surfaces des argiles et lorsque les matériaux sont plus grossiers ils deviennent de plus en plus lourds et par conséquent, plus difficiles à transporter. Dans ce type d'essai il s'agit de **la résistance en milieu humide aux forces d'arrachement par une rivière** ou par un ruissellement.

Depuis longtemps, les pédologues ont constaté que les sols réagissaient de façon plus ou moins rapide à l'attaque des gouttes de pluie et à la dégradation de la structure. Toute une série de tests de laboratoire ou de terrain ont été mis en place pour tenter de définir la **stabilité de la structure** vis-à-vis de l'eau. Citons par exemple, **les capsules de Ellison** (1944) où des agrégats tamisés sont soumis à l'énergie des gouttes de pluie, **le test de stabilité structurale de Hénin** (1956), où des agrégats sont plongés dans l'eau et tamisés sous l'eau, **le test des gouttes d'eau** où des mottes calibrées (30 gr) sont soumises à des gouttes de pluie tombant d'une hauteur déterminée (Mc Calla, 1944) ou encore le test de **dispersion de Middleton** (1930) qui cherche à comparer la teneur en particules dispersées naturellement dans l'eau, avec ou sans dispersant.

En conclusion, il est évident que **l'on n'a pas encore réussi à résoudre le problème méthodologique d'estimation de la résistance des sols à l'érosion et son évolution** au cours du

temps. Actuellement, on cherche à classer les sols en fonction de différents tests adaptés à différents processus que l'on peut rencontrer dans différentes circonstances. Valentin (1989) a montré que l'indice d'instabilité structurale de Hénin était en bonne relation avec la résistance du sol à l'érosion si les gouttes tombent sur sol sec, c'est à dire au début de la saison des pluies. Par contre, sur les sols humides de fin de saison des pluies, on obtient de meilleures corrélations entre les pertes en terre et les limites de liquidité d'Atterberg.

4.2.5. Le facteur topographique

La pente influence puissamment l'importance de l'érosion mais l'existence d'érosion et de ruissellement intense sur des pentes douces (glacis de 2 % au Sahel ou sur les plateaux européens) indique par contre qu'il n'est pas besoin d'une forte pente pour déclencher ce phénomène: l'action pluviale y suffit (Fauck, 1956; Fournier, 1967).

Tableau 1. Effet de la pente sur le ruissellement (KR %) et l'érosion (t/ha/an) à Séfa au Sénégal: cultures sarclées de 1955 à 1962, sol ferrugineux tropical lessivé à tâches et concrétions (d'après Roose, 1967)

Pente %	Erosion moyenne et t/ha/an	Ruissellement moyen annuel %
1,25	5,0	7
1,50	8,6	22
2,00	1 2,0	30

L'influence de la pente sur l'évolution des versants est bien connue des géomorphologues, au point que certains d'entre eux, caractérisent l'âge du paysage par l'inclinaison et la forme des pentes. De fortes pentes et des vallées encaissées se rencontrent dans un relief jeune comme celui des Alpes, tandis que dans un relief adulte ou sénile comme on en trouve sur le vieux continent africain, ce sont des plateaux, des glacis à pentes douces et de vastes pénéplaines qui s'offrent aux regards.

La pente intervient dans les phénomènes d'érosion du fait de sa forme, de son inclinaison et de sa longueur.

- L'INCLINAISON DE LA PENTE

Lorsque l'inclinaison de la pente augmente, l'énergie cinétique des pluies reste constante mais le transport s'accélère vers le bas car **l'énergie cinétique du ruissellement augmente** et l'emporte sur l'énergie cinétique des pluies dès que les pentes dépassent 15 %.

- Lorsque la pente augmente, **la forme de l'érosion change**; elle burine dans le sol de multiples figures et augmente de ce fait sa surface donc le nombre de pores capables d'absorber de la pluie au moins dans la phase initiale.

- Lorsque la pente est faible, l'énergie du ruissellement n'est pas suffisante pour transporter au loin les particules sableuses relativement grossières. Lors d'une pluie, celles-ci vont être libérées par effet "splash" puis traînées lentement vers les parties basses.

La pente hydraulique augmente avec la pente topographique, c'est à dire que les fortes pentes drainent plus rapidement que les pentes faibles.

Si l'érosion croît de façon exponentielle avec la pente et ceci malgré une diminution de ruissellement, c'est que la charge solide totale du ruissellement (suspension + charge de fond) augmente substantiellement avec la pente.

- LA LONGUEUR DE LA PENTE

En théorie, plus la pente est longue, plus le ruissellement s'accumule, prend de la vitesse, acquiert une énergie propre qui se traduit par une érosion en rigoles puis en ravines plus importantes. Ainsi, Zingg (1940) trouve que l'érosion croît de façon exponentielle avec la longueur de la pente. Wischmeier *et al.* (1958), après avoir examiné 532 résultats annuels sur parcelles d'érosion, en concluent que les relations entre l'érosion et la longueur de pente varient plus d'une année à l'autre que d'un site à l'autre. L'influence de la longueur de pente sur le ruissellement est encore moins nette. Elle est tantôt positive, tantôt négative ou tantôt nulle, en fonction de l'humidité préalable et de l'état de surface du sol (Wischmeier, 1966).

Saccardy (1950), en Algérie, s'est appuyé sur une évaluation de l'intensité maximale des pluies de l'ordre de 3 mm/minute pendant une demi-heure, a proposé pour les pentes:

$$< 25 \% H^3 = 260 P (2)$$

$$> 25 \% H^2 = 64 P (3)$$

Où H est la différence d'altitude entre deux banquettes (en mètre), P la pente du terrain en %.

4.2.6. Les effets du couvert végétal

Pour arrêter l'érosion, un couvert végétal est d'autant plus efficace qu'il absorbe l'énergie cinétique des gouttes de pluie, qu'il recouvre une forte proportion du sol durant les périodes de l'année où les pluies sont les plus agressives, qu'il ralentit l'écoulement du ruissellement et qu'il maintient une bonne porosité à la surface du sol. Cependant, il est difficile d'évoquer l'action protectrice d'un couvert végétal sans préciser les techniques culturales au sens le plus large, utilisées pour l'obtenir.

- L'INFLUENCE DES TYPES DE COUVERT VEGETAL

*** *Les couverts complets toute l'année***

La forêt dense, mais aussi les forêts secondaires arbustives, les savanes arborées non brûlées, les jachères naturelles, les prairies de plus d'un an, les cultures arbustives avec plantes de couverture ou de paillage. L'érosion est toujours négligeable sous ces couverts denses et le ruissellement est très faible. L'érosion et le ruissellement sont généralement très faibles sous forêt. Sur les pentes les plus répandues, il semble que les ruissellements soient nettement plus forts sur les sols ferrallitiques issus de schistes que sur ceux qui sont issus de granit ou de sédiments tertiaires. La forêt, avec sa frondaison dispersée sur plusieurs étages, les buissons et la litière de feuilles mortes, couvrent le sol toute l'année et le protègent contre l'énergie des gouttes de pluie.

La mésofaune (termites et vers de terre) entretient une bonne porosité et la vitesse d'infiltration reste élevée tout au long de la saison des pluies. Seule peut intervenir la saturation du sol au-dessus d'un horizon relativement peu perméable, à faible macroporosité.

Sous les savanes ou les vieilles jachères protégées depuis quelques années, les ruissellements moyens et les ruissellements maxima ne sont guère plus élevés que sous forêt. Par contre, si les feux interviennent chaque année, en particulier tardivement, les conditions sont radicalement différentes.

**** Les sols nus, les jachères nues ou peu couvrantes, durant les mois les plus agressifs***

L'érosion est alors d'autant plus considérable que la pente est forte et le climat agressif. En principe, un paysan ne laisse jamais son sol nu pendant la saison des pluies, il y fait pousser des récoltes sans quoi, la parcelle est envahie de mauvaises herbes. Mais il arrive qu'il soit amené à semer trop tard ses cultures, si bien que pendant les premiers mois de la saison des pluies, les sols sont dénudés et se comportent comme des parcelles nues. On constate alors que les parcelles cultivées tardivement développent une érosion qui est de l'ordre de 80 % de l'érosion mesurée sur parcelle nue.

**** Les couverts incomplets durant une partie de l'année***

Ce sont les cultures vivrières ou industrielles, les plantes de couverture ou de culture fourragère implantées tardivement ou encore celles qui démarrent lentement. Les phénomènes d'érosion sont évidemment intermédiaires mais extrêmement dépendants de la précocité et de la densité de plantation, de la pente et des techniques culturales. Dans les champs paysans traditionnels, il n'en va pas de même car les paysans plantent souvent très tôt après les premières averses et presque toujours en associant plusieurs cultures dont les couverts se complètent et se succèdent dans le temps et dans l'espace. En culture intensive, on ne peut pas prendre le risque de devoir recommencer les semis si des périodes sèches succèdent aux premiers orages. Les plantations se font donc nécessairement relativement tard après le labour, souvent deux à trois semaines après les semis en système traditionnel. Mais le labour favorise un enracinement profond et la fertilisation permet de rattraper le retard de végétation et d'augmenter la densité de plantation.

Il ressort encore que l'érosion, et dans une moindre mesure le ruissellement, dépendent pour une large part de la **proportion du sol non couvert par la végétation avant les grosses pluies.**

- L'INFLUENCE DE LA HAUTEUR DU COUVERT VEGETAL

L'érosion est fonction non seulement du couvert végétal, mais également de la hauteur du couvert végétal au-dessus du sol. Par exemple, lorsque le couvert végétal est de 100 % mais qu'il se trouve à 4 m de hauteur, l'érosion sera de l'ordre de 75 % d'une parcelle nue. Si le couvert est à deux mètres, l'érosion sera de l'ordre de 50 %. S'il est à 50 cm, l'érosion sera encore de l'ordre de 18 %. Par contre, au cas où l'on a une litière, l'érosion sera réduite à 3 %.

- L'ARCHITECTURE DES PLANTES

L'architecture des plantes peut également avoir un impact sur le développement du ravinement et de l'érosion. En effet, les arbres dont les feuilles canalisent les eaux vers le tronc, fonctionnent comme

un entonnoir et ces eaux qui se rassemblent à la base du tronc, peuvent être à l'origine d'un cisaillement des billons qui vont drainer ensuite toutes les eaux contenues dans les sillons et provoquer un ravinement.

Enfin, on constate l'influence des racines. Les racines superficielles fasciculées retiennent la surface de la terre; par ailleurs, les racines pivotantes augmentent de volume dans un premier temps, occupent les macropores des sols et réduisent donc l'infiltration, mais dans un deuxième temps, elles pourrissent, laissent des tuyaux stabilisés par la matière organique et favorisent l'infiltration.

L'intensification de l'agriculture n'entraîne pas forcément une augmentation de la dégradation et de l'érosion des sols. Hudson (1973) a démontré en effet, que la production d'un sac de maïs provoquait 50 fois plus d'érosion en culture extensive du maïs qu'en plantation dense avec engrais. Ceci ne tient pas seulement au fait qu'il a fallu défricher des surfaces plus importantes pour produire la même quantité de maïs, mais aussi que sur des champs à faible densité, l'érosion supérieure à celle observée sur des champs à forte densité. De même, **les engrais peuvent avoir un impact significatif sur la protection contre l'érosion** (Tableau 2).

Tableau2. Influence de l'intensification de la production sur le ruissellement et l'érosion (Hudson, 1973)

	K R %	Erosion en t/ha/an
Maïs sans engrais	14	18
Maïs avec engrais	8	6,3

4.2.7. L'influence des techniques culturales

Il apparaît de plus en plus clairement que pour réduire le volume ruisselé ainsi que les pertes en terre, l'état de la surface du sol joue un rôle majeur.

- L'EFFET DU LABOUR PROFOND

Le travail du sol (profond ou même superficiel) a amélioré l'infiltration: **le ruissellement est toujours le plus fort sur sol nu non travaillé**, et le phénomène est encore plus marqué si on ne s'intéresse qu'aux pluies érosives survenues après le labour. **L'érosion par contre, évolue au cours du temps**, mais à partir de la troisième année, elle est nettement plus faible sur sol nu labouré et pulvérisé que sur sol nu travaillé superficiellement ou pas du tout. **Le travail du sol augmente nettement la charge fine en suspension dans les eaux de ruissellement.**

4.2.8. Les stratégies de lutte antiérosive

La lutte antiérosive classique consiste généralement à appliquer des recettes: structures antiérosives et techniques culturales qui ont montré quelque part et en d'autres circonstances, des aptitudes à retenir l'eau et à ralentir l'érosion. Dès lors, il n'est pas étonnant que la majorité des projets comportant la lutte antiérosive ait abouti depuis 50 ans à des échecs (Hudson, 1991).

- LES STRATEGIES D'EQUIPEMENT

Dans ce cadre, le bassin versant est l'unité physiographique naturelle d'aménagement, en particulier pour la lutte antiérosive. On procède de la façon suivante:

- On dresse d'abord **la carte des potentialités des terres.**

Les américains (USDA) ont défini huit classes de terre en fonction de leurs contraintes pour les grandes cultures.

Les classes 1 et 2 ont des pentes faibles (de 0 à 2 %) et sont plus ou moins bien drainées. Ces terres conviennent pratiquement à toutes les cultures aménagement particulier autre que le drainage.

Les classes 3 à 6 concernent des versants cultivables dont les contraintes à la culture augmentent en fonction de la faible épaisseur du sol, du taux de cailloux, des pierres empêchant la mécanisation et en fonction de la pente.

Les classes 7 et 8 doivent être couvertes de végétation permanente, de forêts de protection ou de pâturages extensifs. Ils ne permettent pas la culture.

Mais chacun doit trouver sa propre classification de potentialité des terres en fonction du climat et des conditions morphologiques et pédologiques locales.

A côté de la carte d'aptitude des sols, il faudra dresser **la carte des risques actuels d'érosion et la carte d'occupation des sols.** De la comparaison de ces trois cartes au 10.000ème on peut dresser **une carte d'intervention** et d'équipement rural en vue de l'aménagement du bassin.

- Il faut ensuite **définir les structures permanentes de l'aménagement.**

D'abord, le réseau routier, le réseau de drainage, les ponts qui permettent de circuler dans le bassin, en particulier en vue de prélever les récoltes. Ensuite, un système de lutte antiérosive, par exemple:

- des terrasses progressives, définies par des bandes de terre labourées vers l'aval, s'appuyant sur des bandes d'arrêt enherbées ou des talus;
- un système de planches mis au point par l'ICRISAT pour les vertisols sur des pentes inférieures à 2 % (Pathaket *al.*, 1985);
- un système de gradins à pente nulle pour les zones à forte pression démographique;
- un système de banquettes de diversion telles qu'elles sont connues en Afrique du Nord ou un système de terrasses individuelles, pour les vergers.

- Enfin, il faut **définir un système de production** tenant compte du milieu écologique mais aussi du milieu humain (besoins des populations, rentabilité des productions, marché local, niveau de connaissance des populations et autosuffisance alimentaire). Il faudra donc développer des rotations, un système de fertilisation et d'amendement, localiser les terres qui seront réservées à la

foresterie, celles qui seront utilisées en parcours, les blocs de culture, et les zones irriguées ou drainées. Enfin, prévoir un système de drainage, des exutoires aménagés, la stabilisation des rivières et des ravines, autant que l'organisation du marché régional et des transports.

Tableau3. Techniques culturales et structures antiérosives en fonction du mode de gestion des eaux de surface (d'après Roose, Ndayizigiyé et Sekayange, 1992)

Modes de gestion de l'eau	Structures	Techniques culturales
AGRICULTURE SOUS IMPLUVIUM Zone aride à semi-aride	Impluvium, citerne Drain, digues sur les oueds Terrasses discontinues	Labour, cuvettes localisés Microbassins Zai
INFILTRATION TOTALE Zone semi-aride (P < 400 mm) ou zone humide sur sol très perméable	Fossés aveugles Terrasses radicales Gradins	Labour + billons cloisonnés Paillage
DIVERSION Climat semi-humide, mois très humides. Sol peu perméable	Fossés de diversion Banquette algérienne Terrasse radicale drainante	Billons obliques ou dans le sens de la pente
DISSIPATION DE L'ENERGIE DU RUISSELLEMENT Tous climats, sols semi-perméables. Pentas pas trop raides	Cordons ou murs de pierres Talus enherbés, lignes d'herbes Haies vives	Agroforesterie Labour motteux Cultures alternées/prairie Paillis

Dans le cadre de cette stratégie d'équipement rural, l'ingénieur chargé par le pouvoir central d'aménager un bassin versant, définit autoritairement les zones à mettre en défens, les zones où les parcours des animaux seront organisés et l'ensemble des conditions de production dans la région.

4.2.9. Les pratiques antiérosives

Il s'agit de techniques culturales mises en œuvre exclusivement pour réduire le ruissellement et les dégâts d'érosion.

- LA CULTURE EN COURBE DE NIVEAU (CONTOURING)

Il s'agit simplement d'orienter les techniques culturales selon les courbes de niveau. En ce faisant, on oriente la rugosité du sol due aux mottes et aux petits creux, on les oriente perpendiculairement à la pente de telle sorte que l'on ralentit au maximum la nappe d'eau qui pourrait ruisseler.

- LE BILLONNAGE EN COURBE DE NIVEAU (CONTOUR RIDGING)

Le labour suivi d'un billonnage pouvait augmenter les risques d'érosion par le simple fait qu'il augmente la pente du terrain. Mais si on oriente les billons perpendiculairement à la plus grande pente, ceux-ci peuvent stocker dans le sillon une quantité non négligeable d'eau et de matériaux sableux ou limoneux en suspension.

Il est donc délicat de conseiller l'orientation des billons au cas où l'on souhaite réduire l'érosion et **ceci en fonction des interactions qui existent** entre la pente, les systèmes culturaux et les types de sol. Seule l'expérimentation locale permet de décider l'orientation la plus avantageuse et la moins risquée dans chaque système de culture.

- LA CULTURE EN BANDES EN COURBE DE NIVEAU, ISOLEES PAR DES BANDES D'ARRET ENHERBEES (BUFFER STRIPCROPPING)

Pour des pentes inférieures à 8 % l'érosion est ainsi réduite à 30 %. Mais l'efficacité des bandes d'arrêt varie en fonction de la largeur des bandes, du mélange d'herbes qui constituent la bande d'arrêt et de l'importance du ruissellement qui traverse la bande sous forme concentrée.

La bande d'arrêt se comporte comme une éponge qui absorbe partiellement les eaux de ruissellement et comme un peigne qui ralentit le ruissellement et provoque le dépôt des terres provenant du champ cultivé en amont. Les eaux de ruissellement s'infiltrent en profondeur ou sont freinées; la baisse de leur capacité de transport provoque alors le dépôt des éléments érodés les plus grossiers. D'où le maintien d'une bonne porosité et la formation d'une petite terrasse (5 à 20 cm par an) qui, à la longue transforme les paysages en une succession de champs en pentes douces et de talus protégés par la végétation herbacée.

- LE PAILLAGE NATUREL OU ARTIFICIEL

Etant donnée l'agressivité des pluies, et d'autre part la perméabilité et la résistance naturelle des sols ferrallitiques à l'érosion hydrique, le problème principal de ces zones tropicales humides consiste à trouver le moyen de couvrir la terre durant la période critique des fortes pluies pour éviter la destruction de la structure de l'horizon superficiel du sol, la formation de croûtes de battance et le démarrage du ruissellement. C'est sous l'angle de **complément temporaire à la couverture végétale** qu'est envisagée **l'efficacité d'un paillage léger**, soit constitué des résidus de cultures soit d'apports extérieurs ou d'un conditionneur de sol (par exemple, le Curasol) susceptible de créer une croûte souple protégeant la surface de la terre. Une couverture morte (un paillage de résidus ou une couche de cailloux) peut remplacer avantageusement une couverture vivante en ce qui concerne l'économie de l'eau et la protection du sol.

- LE PAILLAGE ARTIFICIEL: "CURASOL" EN PULVERISATION

Les méthodes de paillage et leurs variantes entraînent généralement des contraintes techniques (risques phytosanitaires, risques de maladies par insectes et risques d'envahissement par les mauvaises herbes) ou économiques (collecte du paillage: 250 à 300 jours de travail) mal acceptées en grande culture industrielle. D'où l'idée de tester un paillage artificiel susceptible d'être facilement épandu avec du matériel de pulvérisation existant dans bon nombre d'exploitations mécanisées (Roose, 1975 et 1977).

- LES PLANTES DE COUVERTURE

Comme la difficulté principale rencontrée pour le paillage est de produire et de transporter la biomasse sur le champ, une fois le sol préparé et planté, il était naturel de tenter de produire cette

biomasse sur place. C'est ainsi que furent testées, d'abord au Brésil depuis une vingtaine d'années (Séguy *et al.*, 1989), puis au Nigeria (Juo, Jonhson, Lal, station IITA à Ibadan), l'introduction d'une culture de légumineuses à enracinement profond semée en dérobée sous un maïs ou une autre céréale.

4.2.10. Le facteur P dans l'équation de Wischmeier

Le facteur "pratiques antiérosives" (P) est le rapport entre les pertes en terre sur un champ aménagé et celles d'une parcelle de taille voisine non aménagée ou encore de la parcelle de référence. Les parcelles d'érosion de petite taille (100 à 200 m²) sont généralement mal adaptées à l'étude des pratiques antiérosives: il faudrait effectuer des comparaisons sur de petits bassins versants d'une superficie d'un ha environ. On se bornera donc ici à mettre en parallèle les résultats acquis en Afrique du Nord, en Afrique de l'Ouest, avec les coefficients préconisés aux Etats-Unis après de nombreuses études sur petits bassins versants (Wischmeier, Smith and Uhland, 1958; Roose et Bertrand, 1971; Roose, 1973; Delwaulle 1973; Masson, 1983; Millington, 1984).

4.2.11. Les structures antiérosives en relation avec les modes de gestion de l'eau

Il arrive forcément des averses pour lesquelles le sol ne peut absorber toute l'eau: ceci est capital en zone aride et semi-aride car on va pouvoir collecter cette eau et améliorer localement la production. La lutte antiérosive doit donc prévoir la gestion de ces eaux de ruissellement. Il existe **quatre modes de gestion des eaux** auxquels correspondent des structures antiérosives:

- la capture du ruissellement pour l'irrigation d'appoint (runoffharvesting),
- l'infiltration totale (water absorption),
- la diversion des eaux excédentaires (runoff diversion),
- la dissipation de l'énergie du ruissellement (runoffspreading).

- LES STRUCTURES DE CAPTAGE DU RUISSELLEMENT VENANT D'UN IMPLUVIUM

Dans les pays semi-arides où la pluviosité ne permet pas la culture sur l'ensemble du versant, on réserve une partie de ce dernier pour favoriser le ruissellement, lequel est récupéré en aval pour irriguer des surfaces réduites, compléter les apports pluviométriques et améliorer la sécurité de production des cultures (Hudson, 1990).

* *Les demi-lunes*

Sur les glacis limoneux qui se dégradent très vite, une fois la végétation naturelle disparue, on peut capter le ruissellement de 10 à 20 m² en dressant des diguettes en forme de demi-lunes de 2 à 6 m de diamètre pour cultiver des céréales ou quelques arbres.

* *Les citernes ou boulis*

Les citernes ou boulis sont creusées dans le glacis à la limite du parcours (glacis gravillonnaire) et du bloc de culture (glacis limoneux). Certains paysans Mossi ont creusé progressivement des trous

d'eau, citernes ou boullis de 1 à 2 m de profondeur et avec la terre extraite, ont construit une digue en forme de croissant s'étirant sur une centaine de mètres.

*** Les digues de terre sous impluvium**

Le ruissellement provenant de l'impluvium formé par des collines ou par le parcours, peut aussi être capté par une digue en terre et irriguer un champ aménagé en cordons de pierres. Pour que ce supplément d'eau, distribué pendant l'averse sur un champ qui tend déjà à ruisseler par lui-même, ne provoque pas de ravinement, il faut réduire le rapport surface impluvium sur champ cultivé à moins de trois (Hudson, 1990) et casser les digues.

*** L'aménagement en planches collectant le drainage dans une citerne (vertisols)**

Les vertisols sont des sols très argileux et assez fertiles chimiquement, mais extrêmement difficiles à cultiver en saison des pluies. A cette époque en effet, ils sont boueux et manquent de portance. Par contre, il est possible de les labourer en saison sèche un mois après la fin des pluies et de dessiner sur les champs un ensemble de planches de 1,50 m de largeur séparées par des petits sillons en pente légère (0,5 %) qui vont ramener les eaux de drainage vers un exutoire et une citerne creusée dans la terre.

- LES STRUCTURES D'INFILTRATION TOTALE

Les structures d'infiltration totale sont utilisées dans deux cas: lorsque les pluies suffisent à peine à assurer l'évapotranspiration des cultures, ou dans les milieux très perméables.

*** Les fossés aveugles avec talus enherbés du Rwanda (ou le fanyajuu du Kenya).**

Au Rwanda et Burundi, les Belges ont proposé jadis, vers les années 1935, de creuser des fossés hysohypses sur des pentes de moins de 20 % où la couverture pédologique ferrallitique est profonde et très perméable et où les risques de glissement de terrain sont assez réduits.

Pour éviter que les eaux de ruissellement captées par les fossés ne se rassemblent en un point bas (par erreur de réalisation ou fragilité locale) et ne creusent des ravines profondes, des cloisons de 50 cm d'épaisseur séparent les segments de fossés de 3 m de long et 60 cm de profondeur et de largeur.

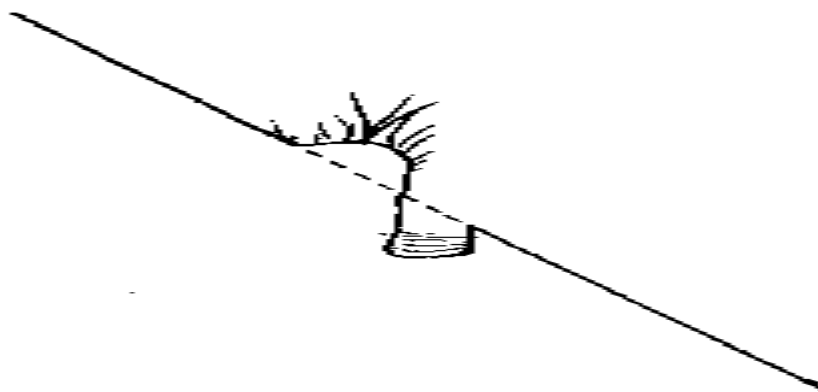


Figure 6. Fossés aveugles avec talus amont enherbé (Roose E., Ndayizigiye F. et Sekayange L. 1992)

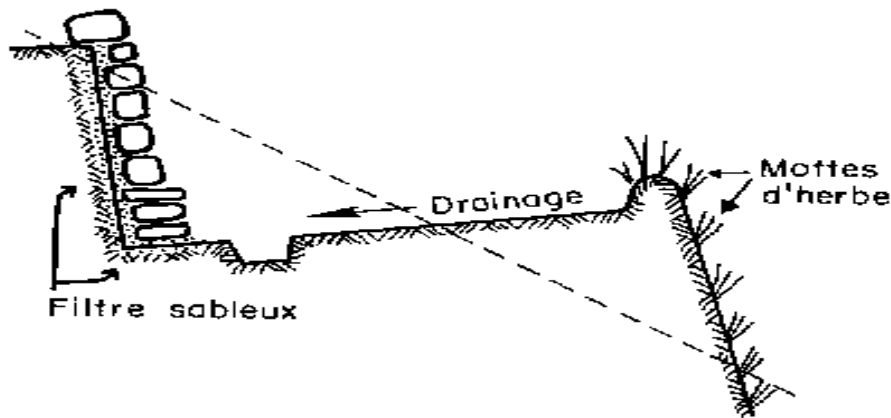


Figure 7. Gradin ou terrasse méditerranéenne ou encore terrasse radicale (Roose E., 1992)

Avantages: les fossés aveugles divisent bien les pentes trop longues en provoquant le stockage du ruissellement et des sédiments, ce qui peut être intéressant dans les zones sèches; ils favorisent aussi la formation de terrasses progressives si on rejette la terre et les sédiments vers l'amont et qu'on protège le talus avec des herbes fixatrices.

Ces fossés rechargent la nappe et humectent les environs permettant la plantation de bananiers et autres arbres exigeants en eau à proximité du fossé.

Inconvénients: cette technique est limitée à des sols profonds perméables et à des pentes de moins de 20 % (Tondeur, 1950).

Proposition: pour augmenter la stabilité de ces talus, il faut les retailler, faire glisser la partie haute et humifère avec les herbes sur l'entaille stérile non couverte.

*** Les gradins ou terrasses méditerranéennes (benterracing)**

On observe le plus souvent les gradins dans les montagnes autour du bassin méditerranéen, mais aussi dans les Andes du Pérou, à Bali, en Indonésie et en Chine, là où les zones planes manquent, là où la population est dense ou menacée par un envahisseur comme les Dogons au Mali, là où le travail est obligatoire ou très bon marché, et là où l'on peut irriguer et sortir des produits de haute valeur ajoutée (ex.: les oeillets de Nice, les fraises en Espagne et en Lozère, le kif dans le Rif central et le khat dans la région de Hararghe en Ethiopie).

Les gradins sont formés d'un talus subvertical renforcé par des pierres ou par des herbes et d'une terrasse en pente douce inversée avec possibilité d'irrigation et de drainage de la pente en long.

Avantage:

- Les gradins créent des zones planes et suppriment l'érosion en nappe,
- ils permettent d'investir et d'améliorer la productivité des terres sur forte pente,
- ils augmentent l'eau disponible pour les plantes,
- et permettent d'irriguer en captant les eaux de montagne et le ruissellement sur les talus.

Inconvénients:

- C'est un aménagement extrêmement coûteux lors de la formation, qui exige 500 à 1 200 jours de travail pour aménager un hectare et exige ensuite l'entretien des talus.
- Il augmente les risques de glissement de terrain car il favorise l'infiltration près de la roche; il n'est donc pas possible de l'installer sur des schistes ni sur des gneiss, ni sur des sols peu épais, ni dans des zones à forte fréquence de secousses sismiques.

Conclusion

Les structures d'infiltration totale apportent des solutions radicales en zone semi-aride où la production végétale est étroitement liée à la disponibilité en eau et sur les pentes fortes où il est délicat de gérer le ruissellement sans créer de ravines. Cependant, ces méthodes exigent un fort investissement à l'installation et à l'entretien. De plus, elles ne peuvent s'implanter n'importe où sans augmenter les risques de glissement de terrain et de lixiviation des nutriments.

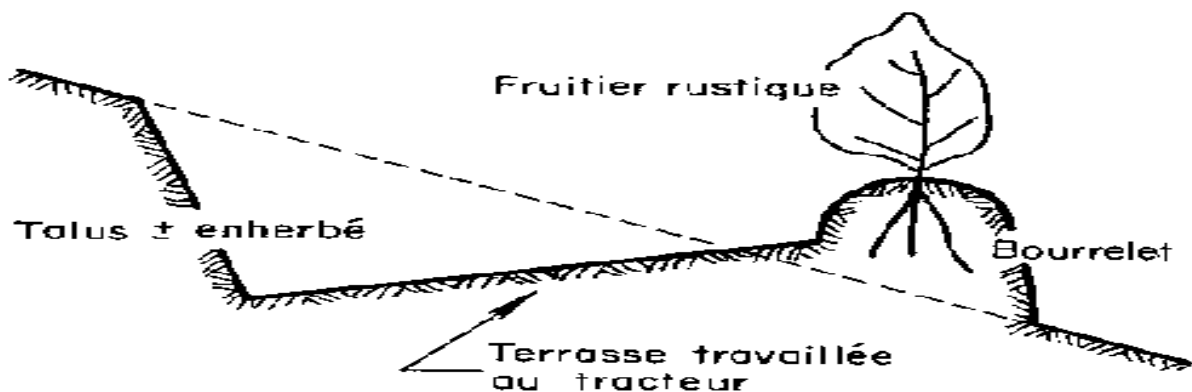


Figure 8. Banquette algérienne (Roose E., 1992)

- apport d'arbres fruitiers qui diversifient la production sur les terres agricoles;
- perte de 5 à 15 % de surface;
- pas d'augmentation des rendements;
- 80 % d'échec sur les pentes > 40 % (Mathieu, 1975);
- peu acceptée par les paysans car gêne l'exploitation mécanisée des terres;
- cas d'abandon des terres car aménagées par les services de DRS de l'Etat (crainte d'appropriation par l'Etat).

L'érosion est fonction de :

- l'énergie des pluies (constante tout le long de la pente)
- l'énergie du ruissellement (qui croît avec la pente $(MV^2)/2$. $E = f(\text{longueur}^n \times \text{pente})^m$)

* Les banquettes :

- peuvent évacuer l'énergie du ruissellement accumulée
- ne peuvent pas réduire l'énergie des pluies ni la dégradation du sol

Inconvénients

1. Nécessité d'équipes de topographes experts (coût élevé)
2. Important travail d'installation et d'entretien d'où généralement;
 - digues non protégées
 - canaux encombrés de sédiments
 - exutoires non enherbés ni protégés (surcreusés ou ensablés)
3. Perte de 5 à 15 % de la surface cultivée sans augmentation de rendement.
4. Perte d'eau et nutriments pour les champs cultivés en aval.
5. L'aménagement doit rompre s'il advient une pluie de fréquence inférieure à 1/10.
6. Variation de largeur des champs cultivés (mécanisation difficile).
7. N'arrête pas l'érosion en nappe ni la dégradation.
8. Finalement, risques graves de ravinement s'il y a rupture des digues (1 fois en 4 à 10 ans).
9. Accélération du temps de concentration des eaux:
 - gros débits de pointe
 - érosion marigots
 - ravinement régressif

4.3. L'ÉROSION LINEAIRE

Lorsque l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration de la surface du sol, il se forme d'abord des flaques; ensuite ces flaques communiquent par des filets d'eau et lorsque ces filets d'eau ont atteint une certaine vitesse, 25 cm par seconde d'après Hjulström (1935), ils acquièrent une énergie propre qui va créer une érosion limitée dans l'espace par des lignes d'écoulement. Cette énergie n'est plus dispersée sur l'ensemble de la surface du sol, mais elle se concentre sur des lignes de plus forte pente. L'érosion linéaire est donc un indice que le ruissellement s'est organisé, qu'il a pris de la vitesse et acquis une énergie cinétique capable d'entailler le sol et d'emporter des particules de plus en plus grosses: non seulement des argiles et des limons comme l'érosion en nappe sélective, mais des graviers ou des cailloux et des blocs lorsqu'il sera organisé en ravines.

4.3.1. Les formes d'érosion linéaire

A la surface du sol on peut observer des "délaissés de crues" composés souvent de matières organiques longues et fibreuses ou alors de dépôts sableux organisés en filets comme dans les oueds. L'érosion linéaire apparaît lorsque le ruissellement en nappe s'organise, il creuse des formes de plus en plus profondes. On parle de **griffes** lorsque les petits canaux ont quelques centimètres de profondeur, de **rigoles** lorsque les canaux dépassent 10 cm de profondeur mais sont encore effaçables par les techniques culturales. On parle de **nappe ravinante** lorsque les creux ne dépassent

pas 10 à 20 cm mais que leur largeur atteint plusieurs mètres et enfin, de **ravines** lorsque les creux atteignent plusieurs dizaines de cm (plus de 50 cm) et en particulier, lorsqu'ils ne sont plus effaçables par les techniques culturales. A l'intérieur des ravines on peut encore distinguer des **petites ravines** dont le lit est encore encombré de végétation herbacée et surtout arbustive et qu'on pourra fixer rapidement par des méthodes biologiques. Par contre, dans des **grandes ravines** qui peuvent s'étaler sur plusieurs kilomètres, le canal central comporte des blocs rocheux, témoins d'un charriage important et d'une certaine **torrentialité**. Ces fonds étant mobiles, il n'est plus question de les stabiliser uniquement par des méthodes biologiques; il sera nécessaire d'utiliser des seuils cimentés et des méthodes mécaniques coûteuses (Lilin, Koohafkan, 1987; Mura, 1990).

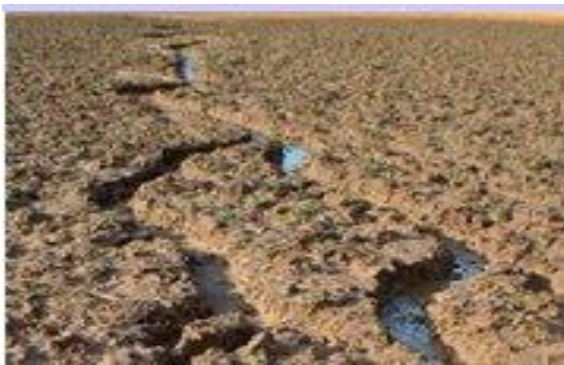


Photo 7. Rigoles (RooseE., 2002)



Photo 8. Griffes (RooseE., 2002)

Trois processus de ravinement

1) Sur matériau hétérogène: ravines en U

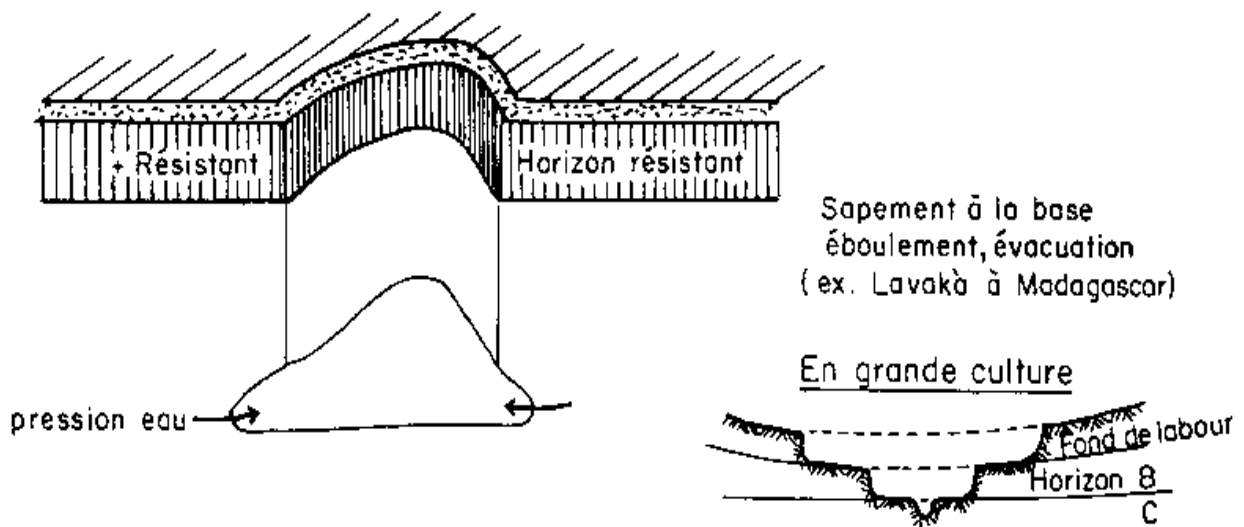


Figure 9. Ravines en U (RooseE., 1992)

2) Sur matériau homogène: flancs de ravine en V

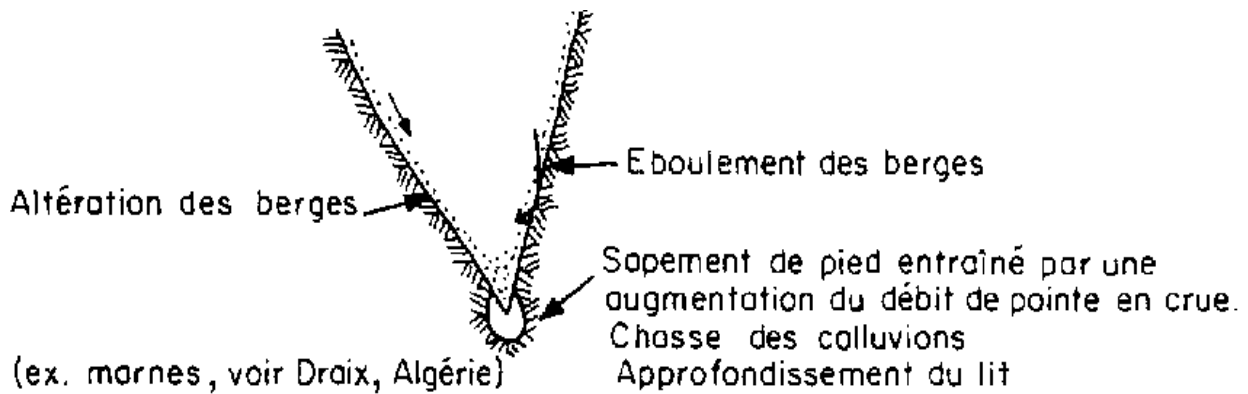


Figure 10. Ravines en V (Roose E., 1992)

3) Sur argiles gonflantes, gypse et matières solubles : ravine en tunnel

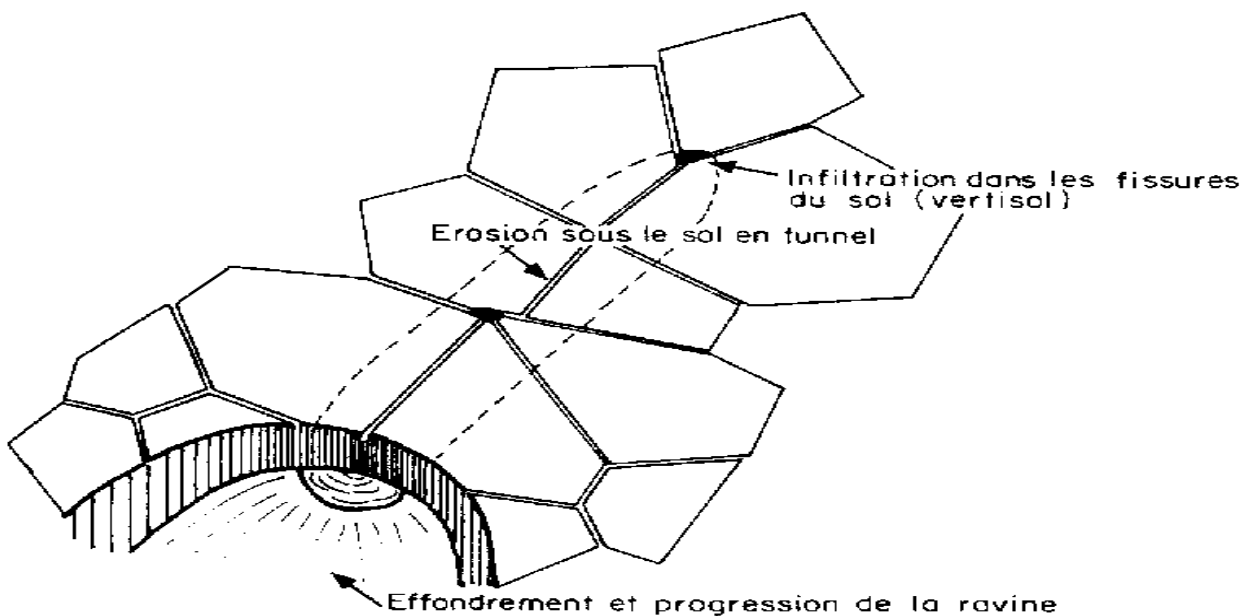


Figure 11. Ravine en tunnel (Roose E., 1992)

Il est également intéressant de noter la forme de ces ravines. Certaines ont des berges en V à pente constante jusqu'au fond, d'autres ont des berges verticales et sont en U. enfin d'autres ravines évoluent **par tunnel** et effondrement. On parlera de **grosses ravines ou de ravines à fonctionnement torrentiel** lorsque la violence et la fréquence des crues, l'importance du charriage, ne permettent pas d'envisager la végétalisation du fond de la ravine dans un délai raisonnable (Lilin, Koohafkan, 1987).

4.3.2. La cause et les processus de l'érosion linéaire

La cause de l'érosion linéaire est à chercher dans l'énergie du ruissellement, laquelle dépend à la fois du volume ruisselé et de la vitesse de celui-ci.

$$E_{\text{Ruiss}} = 1/2 MV^2 \text{ sur parcelle} = 1/2 MGH \text{ sur bassin versant}$$

TROIS THEORIES POUR EXPLIQUER LA NAISSANCE DU RUISSELLEMENT

1° **Théorie de Horton (1945)** Le ruissellement naît lorsque l'intensité des pluies est supérieure à la capacité d'infiltration du sol.

2° **Théorie de la saturation du milieu.** Le ruissellement naît lorsque l'espace poreux du sol est saturé.

3° **Théorie de la contribution partielle de la surface du bassin au ruissellement.** On constate que le ruissellement observé au niveau de la rivière est fonction de la **surface du sol saturé au fond de la vallée.**

Par conséquent, **même s'il n'y a pas de ruissellement sur le versant en période humide, l'ensemble du bassin versant va contribuer au volume écoulé par la rivière par extension de la surface saturée,** la nappe étant alimentée directement par le drainage de l'ensemble du bassin.

Naissance du ruissellement: trois théories

A. Si intensité pluie > Infiltration (Horton)

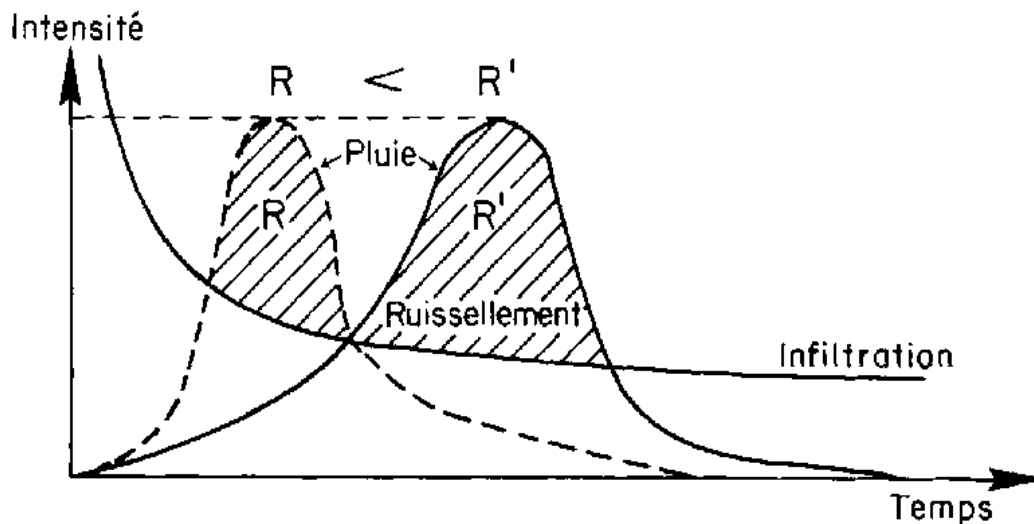


Figure 12. Naissance du ruissellement: première théorie (Horton)

B. Si la porosité du sol est saturée

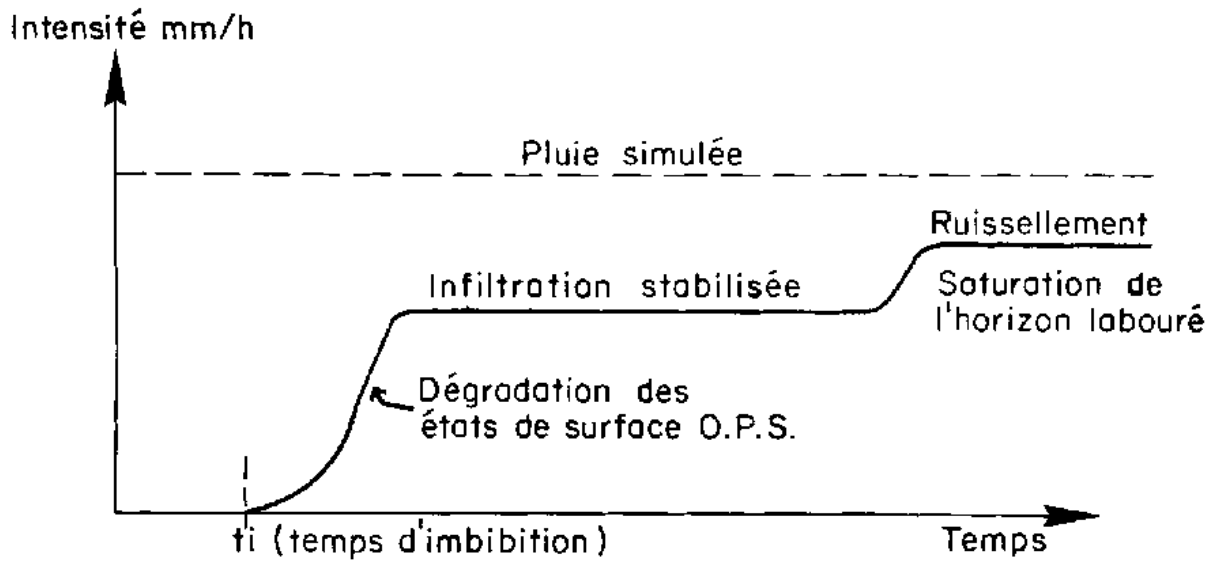


Figure 13. Naissance du ruissellement: deuxième théorie (Horton)

C. Contribution localisée du ruissellement

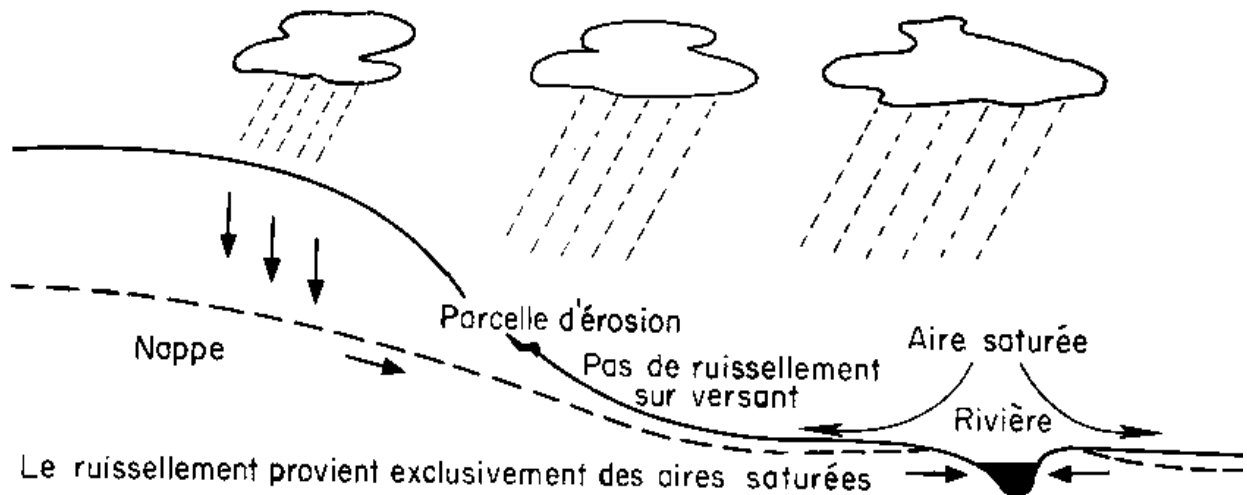


Figure 14. Naissance du ruissellement: troisième théorie (Horton)

En fonction de l'origine du ruissellement, la lutte antiérosive devra donc s'organiser différemment. Si comme dans le premier cas, le ruissellement provient de la dégradation de l'état de la surface du sol, la lutte antiérosive devra s'organiser essentiellement en protégeant cette surface du sol par la couverture végétale ou en retardant la formation de pellicule de battance.

Si par contre, le ruissellement s'organise à partir de la saturation du sol, il importe d'organiser un certain drainage. La végétation va freiner le ruissellement et le stocker provisoirement: elle va diminuer les pointes de crue et l'énergie disponible pour l'arrachement des matériaux. Enfin, si le ruissellement ne se manifeste que localement sur un bassin versant, il est inutile d'organiser des banquettes de diversion sur les versants et les pentes fortes, puisqu'il s'y forme très peu de ruissellement.

- LE DEVELOPPEMENT DES RAVINES

Le long d'un versant, l'énergie cinétique des gouttes de pluie est une constante à ceci près, qu'elle dépend de la vitesse du vent. Par contre, le ruissellement tend à s'accumuler et à s'organiser lorsque la longueur de pente augmente. Si le débit de pointe augmente, on observe l'entaille de la surface du sol et la formation d'une rigole. Celle-ci va évoluer par un frottement du fond par les sédiments transportés par le fluide et par effondrement des berges et transport du matériau ainsi désorganisé.

Dans la nature, on observe le plus souvent des **ravines en forme de V** qui s'impriment dans un **matériau homogène**, plus ou moins meuble, sablo-argileux; argileux, marneux ou schisteux. On observe en milieu méditerranéen une altération des marnes et des schistes qui peut atteindre 4 à 10 mm par an. L'enfoncement a lieu lors des averses exceptionnelles. Une à deux averses par an suffisent pour dégager toutes les particules accumulées durant l'année au fond de la ravine et pour entailler le fond de la ravine par abrasion des matériaux que le ruissellement charrie.

Un deuxième type de **ravines en U** s'observe fréquemment dans la nature sur des **matériaux hétérogènes**. Soit elles ont un fond constitué de matériaux très résistants: lors des crues exceptionnelles le canal va donc s'élargir latéralement par effondrement. Soit, la couche de résistance se trouve en surface, le ruissellement creuse alors profondément le matériau jusqu'à atteindre une nappe d'eau temporaire ou permanente qui va exercer une poussée latérale sur le bas du versant jusqu'à ce que celui-ci s'effondre (sapement de berges).

Il existe une troisième forme de ravinement encore plus difficile à traiter: **l'érosion en tunnel** (tunneling).

Elle peut se développer sur des pentes faibles, dans un matériau fissuré en surface, soit sur des sols riches en argiles gonflantes (vertisols, sols bruns tropicaux, etc...), soit sur des marnes riches en gypse ou en d'autres minéraux solubles (fréquent dans le bassin méditerranéen) .

Lors des orages de fin de saison sèche, les eaux pénètrent dans ces sols fissurés jusqu'à la roche altérée, ruissellent dans ces fissures jusqu'en bas de pente où elles peuvent former des ravines régressives.

Les fissures du sol dans lesquelles s'engouffre le ruissellement hypodermique vont se transformer progressivement en tunnels, lesquels s'effondrent et forment des ravines régressives qui peuvent progresser de quelques dizaines de mètres au cours des grosses averses. Seul, le labour en sec peut colmater ces fissures et forcer l'eau à mouiller toute la masse de sol sans s'infiltrer préférentiellement dans les mégaporosités.

4.3.3. Les facteurs du ruissellement

L'énergie du ruissellement est égale à $1/2 MV^2$ ou est égale à $1/2 MGH$ à l'échelle du bassin versant.

Quels sont les facteurs qui font varier le volume ruisselé?

- C'est **tout d'abord la pluie: la hauteur des pluies**, au cas où le ruissellement naît d'un engorgement du sol, ou **l'intensité des pluies en 30 mn** (Wischmeier et Smith 1960, Roose, 1973), qui règle la battance et la naissance du ruissellement, ou sur les fortes pentes des montagnes andines, l'intensité maximale en 15mn (De Noniet *al.*, 1989).

- **L'humidité du sol préalable à l'averse est le second facteur explicatif du volume ruisselé**

- **L'état de la surface du sol** peut se décomposer en:

- organisation pelliculaire,
- fissuration,
- orifices d'origine biologique,
- rugosité.

La rugosité de la surface du sol influence surtout la pluie d'imbibition mais cette influence diminue lorsque la pente augmente car le volume stocké dans les flaques diminue sur les pentes fortes.

Lorsque la surface des sols se dégrade, les mottes fondent et forment à leur surface une **pellicule structurale** de faible épaisseur, réduisant ainsi l'infiltration à quelques mm/h ou quelques dizaines de mm/h. Mais les **croûtes de sédimentation** qui envahissent le terrain à partir des flaques entre les mottes peuvent atteindre plusieurs centimètres d'épaisseur et avoir des capacités d'infiltration extrêmement réduites: de 0 à 10 mm/h. Le ruissellement d'une parcelle va donc dépendre de la surface couverte par les différents types de pellicules et par les macropores qui restent ouverts entre les mottes à la surface du sol.

- **L'inclinaison de la pente**

Généralement, l'inclinaison de la pente diminue le volume ruisselé car sur forte pente, on observe un meilleur drainage interne et une formation plus lente des pellicules de battance, lesquelles sont détruites au fur et à mesure par l'énergie du ruissellement. Le **facteur longueur** de pente intervient également sur le volume ruisselé, mais si théoriquement, ce volume en pourcentage reste constant le long de la pente, il apparaît dans de nombreux cas, lorsque les sols sont dénudés, que le coefficient de ruissellement diminue lorsque la pente augmente (Roose, 1973; Valentin, 1978).

- Les techniques culturales peuvent augmenter de façon considérable l'infiltration

Quels sont les facteurs qui vont jouer sur la vitesse du fluide ?

Le deuxième facteur, qui peut jouer pour réduire ou augmenter l'énergie cinétique du ruissellement, est la **vitesse** de celui-ci.

- Cette vitesse dépend d'une part de l'épaisseur de la lame ruisselante et de la pente du canal et d'autre part, de sa rugosité. La pente augmente la vitesse de l'écoulement et donc la vitesse d'avancement de la ravine mais le ravinement peut très bien commencer sur des pentes inférieures à 1 %.

- **La position de la parcelle dans la topographie peut aussi avoir un rôle majeur** (Heusch, 1970). En effet les eaux peuvent drainer dans le sol jusqu'à atteindre le fond de la vallée mais au niveau d'affleurement des nappes, il peut se développer du ravinement qui entraîne par la suite une érosion régressive.

$$\text{Erosion par ravinement} = 6.87 \times 10^{-3} P^{1.34} \times S^1 \times H^{0.52}$$

- **L'influence du couvert végétal sur l'érosion linéaire est complexe**

1° Le couvert végétal, d'une part protège contre la battance des pluies, donc prolonge la perméabilité du sol et réduit le volume ruisselé.

2° Sa litière entretient la mésofaune (laquelle creuse la macroporosité) et absorbe une grande quantité d'énergie de ruissellement.

3° La rugosité au sol dépend du nombre de tiges par m². C'est ainsi qu'une couverture végétale formée d'herbacées à tiges nombreuses est plus efficace pour protéger le sol contre le ruissellement que des arbres.

4.3.4. La lutte contre le ruissellement et l'érosion linéaire

Elle consiste à réduire la vitesse du ruissellement et progressivement son volume.

- **AUX CHAMPS**

Il est possible, par l'adaptation des techniques culturales et du couvert végétal de réduire le volume de ruissellement issu du champ. On a vu que le labour profond permet un meilleur enracinement, un meilleur stockage de l'eau en profondeur et donc un meilleur développement du couvert végétal, lequel entraîne une baisse significative de l'érosion et du ruissellement.

- **DANS LES VALLEES SECHES**

Dans les vallées sèches, les petites ravines et les fonds de vallées drainées, il suffit bien souvent de ne pas cultiver le terrain ou de **maintenir les terrains tassés sous prairie** pour réduire les dégâts par érosion.

- **LA FIXATION BIOLOGIQUE DES PETITES RAVINES** (Lilin, Koohafkan, 1987)

"L'activité des petites ravines est très variable d'une région à l'autre en fonction du stade de dégradation atteint. Si la végétation ligneuse constitue encore une armure défendant les bas-fonds, mais que celle-ci donne localement des signes de faiblesse, il convient simplement d'accorder une importance aux mesures préventives et de réduire le développement agricole dans les bas-fonds. Par contre, une fois que la ravine a commencé à inciser, il faut restaurer l'équilibre rompu.

L'objectif principal sera généralement **l'amélioration de la productivité agricole ou forestière** par la mise en valeur des atterrissements créés derrière chaque seuil dans le bas fond. Comme les phénomènes torrentiels sont peu importants, ces atterrissements ont souvent un potentiel productif élevé. A mesure que la terre s'accumule en amont du seuil, on peut y planter toutes sortes d'arbres fruitiers (exemple en Haïti: arbres à pain, manguiers, cocotiers et bananiers; en Algérie, poiriers, pommiers, abricotiers, noyers, ou peupliers, frênes, etc...) ou bien des espèces vivrières exigeantes en eau.

- LES GROSSES RAVINES TORRENTIELLES (Lilin et Koohafkan, 1987).

"Dans les grosses ravines à fonctionnement torrentiel, le barrage de correction torrentiel est l'outil de base de l'aménageur. L'aménagement peut avoir deux objectifs:

1. **Stabiliser le profil en long** de la ravine dans les secteurs où la tendance générale est au surcreusement. L'objectif n'est donc pas ici de retenir beaucoup de sédiments, mais de limiter l'approfondissement de la ravine.

2. **Retenir les sédiments** dans les sections en transit où l'incision est faible. De "sous-produit", la fonction "retenue d'alluvions" devient ici principale. L'intérêt du stockage d'alluvions est lié soit à l'objectif "protection d'une retenue contre l'envasement", soit à l'objectif "amélioration des ressources en eau par étalement des crues et par développement de nappes souterraines dans les matériaux alluvionnaires retenus", soit à l'objectif de "protection contre les laves torrentielles des lieux habités".

- LE TRAITEMENT DES RAVINES MOYENNES PAR GENIE MECANIQUE ET BIOLOGIQUE (Lilin et Koohafkan, 1987)

"Lorsque les petites ravines se sont dégradées suffisamment pour qu'il ne soit plus possible d'installer directement des barrages biologiques mais que le stade de ravinement torrentiel n'est pas encore atteint, il faut alors utiliser successivement des seuils pour fixer les fonds et ensuite une intervention biologique.

Dans le cas de ces ravines petites et moyennes il est possible de développer une exploitation végétale intéressant les paysans. Ceux-ci pourront donc être formés à la maintenance de ce système de fixation et de correction des ravines et valoriser, par la même occasion, la production de fourrage, de fruits et de bois.

En Algérie par exemple, la durée de vie des barrages étant extrêmement réduite, de l'ordre de deux à dix ans pour les petits barrages collinaires et de vingt à cinquante ans pour les grands barrages, une action de restauration des terrains de montagne et de correction des ravines a été développée. Celle-

ci a pour rôle général d'arrêter l'érosion, c'est-à-dire de bloquer les ravines là où elles creusent. On installe des seuils dans des goulots d'étranglement profonds et étroits et l'on forme des seuils élevés que l'on peut surélever jusqu'à obtenir une pente d'équilibre du fond et des berges; il s'agit donc de gérer les sédiments.

Seuil en grillage de fer galva. (Maille 0,5cm.) tendu sur des fers cornières (45mm) enfoncés dans le sol sur 50 cm.

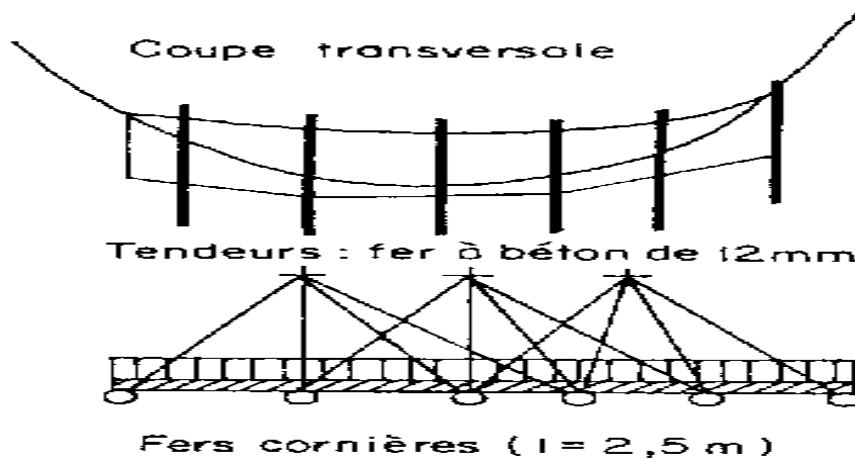


Figure 15. Seuil en grillage (Koohafkan, 1987)

Seuil en pneus de > 1 m de Ø de récupération fixé par des fers cornières enfoncés de 50 cm dans le sol. Les vieux pneus sont ligaturés en place et remplis de terre locale

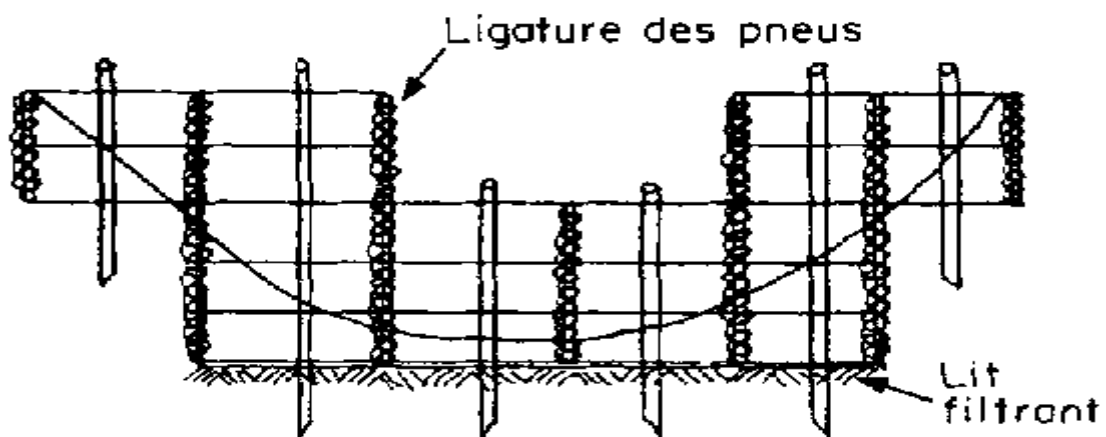


Figure 16. Seuil en pneus (Koohafkan, 1987)

En sac plastique 100 de long, 60 large, épaisseur 1 mm

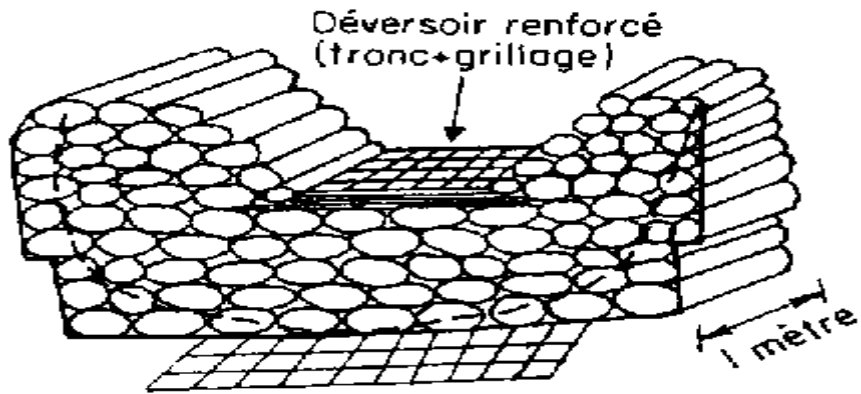


Figure 17. Seuil en sac plastique (Koohafkan, 1987)

Seuils en sacs plastiques épais remplis de terre locale, déversoir renforcé par quelques socs de sable mélangé ou ciment

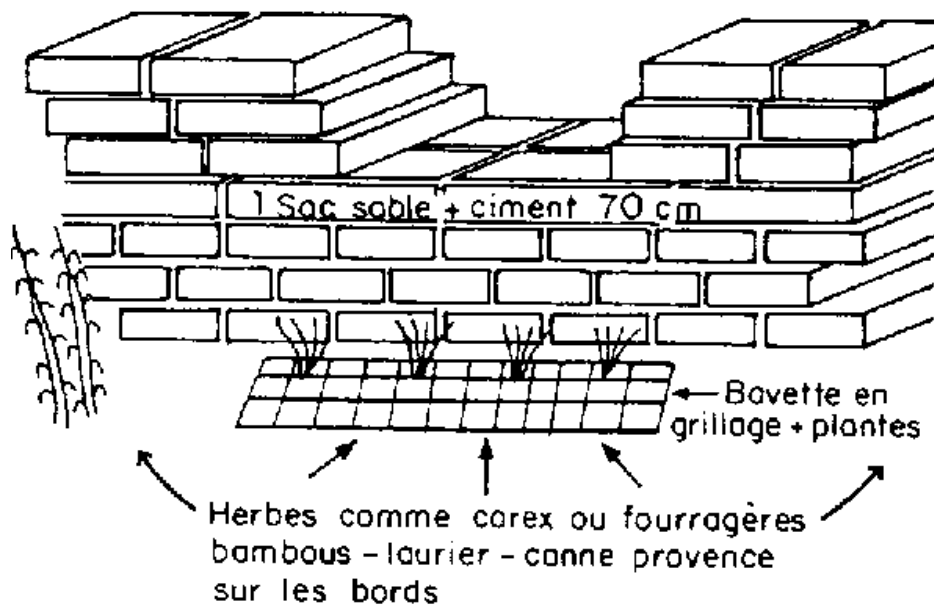


Figure 18. Seuils en sacs plastiques épais remplis de terre locale (Koohafkan, 1987)

DIX COMMANDEMENTS POUR L'AMENAGEMENT DES RAVINES

1. Tant qu'on n'a pas **amélioré l'infiltration sur le bassin versant**, il ne faut pas tenter de reboucher la ravine (sinon elle trouvera un autre lit), mais prévoir un canal stable capable d'évacuer les débits de pointe de la crue décennale (au minimum).

2. L'aménagement mécanique et biologique d'une ravine peut être réalisé progressivement en 1 à 6 ans, mais il doit concerner tout le bassin dès la première année. La fixation biologique d'une ravine vient consolider les versants et le fond de ravine stabilisé par différents types de seuils; si on inverse l'ordre, les plantes sont emportées avec les terres lors des crues.

3. L'emplacement des seuils doit être choisi avec soin selon l'objectif visé. Si on cherche seulement à rehausser le fond de ravine pour que les versants atteignent la pente d'équilibre naturel, il faut choisir un verrou, une gorge étroite où de nombreux seuils légers pourront s'appuyer sur des versants solides.

Si on cherche à fixer le maximum de sédiments ou à récupérer des espaces cultivables, il faut choisir les zones à faible pente, les confluents de ravines secondaires, les versants évasés et construire de gros ouvrages-poids qui seront rehaussés progressivement.

4. L'écartement entre les seuils est fonction de la pente du terrain. Le déversoir aval doit être à la même altitude que la base du seuil amont, à la pente de compensation près (1 à 10 % selon la nature du fond de ravine) qui peut s'observer sur place (zone stable sans creusement ni sédimentation). Dans un premier temps on peut doubler cet écartement et construire les seuils intermédiaires dès que la première génération de seuil est comblée de sédiments: **stabiliser immédiatement les sédiments** piégés avec des plantes basses dans l'axe d'écoulement et des arbres sur les versants.

5. Pour éviter la pression hydrostatique des coulées, il vaut mieux drainer les seuils (grillage, chicanes ou pierres libres).

6. Les seuils doivent être ancrés dans le fond et les flancs de ravine (tranchée de fondation) pour éviter les renards et contournements. Au contact entre le sol limono-argileux et les pierres des seuils, il faut prévoir une couche filtrante de sable et de gravier pour éviter que les **sous-pressions** n'entraînent les particules fines et la formation de renards.

7. Le courant d'eau doit être **bien centré dans l'axe de la ravine** par les ailes du seuil, plus élevées que le déversoir central. Ce déversoir doit être renforcé par de grosses pierres plates + cimentées ou par des ferrailles pour résister à la force d'arrachement des sables, galets et roches qui dévalent à vive allure au fond des ravines.

8. L'énergie de chute de l'eau qui saute du déversoir doit être amortie par une bavette (enrochement, petit gabion, grillage + touffes d'herbes) ou par un contre-barrage (cuvette d'eau) pour éviter les renards sous le seuil ou le basculement du seuil.

9. Tenir le bétail à l'écart de l'aménagement: il aurait vite fait de détruire les seuils et de dégrader la végétation. En compensation, on peut permettre des prélèvements de fruits, de fourrages et plus tard de bois, en échange de l'entretien de l'aménagement.

10. L'aménagement mécanique n'est terminé que quand on a éteint les sources de sédiments, stabilisé les têtes de ravine et les versants. La végétalisation doit alors se faire naturellement si on a atteint la pente d'équilibre, mais on peut aider la nature en couvrant rapidement les sédiments (herbe) et en les fixant à l'aide d'arbres choisis pour leurs aptitudes écologiques et leur production. Il faut passer de la simple gestion des sédiments à la valorisation des aménagements. Les ravines peuvent devenir des "oasis linéaires".

4.4. L'ÉROSION EN MASSE

Alors que l'érosion en nappe s'attaque à la surface du sol, le ravinement aux lignes de drainage du versant, les mouvements de masse concernent un volume à l'intérieur de la couverture pédologique. Nous ne présenterons ici que les principes généraux de prévention et de lutte contre les mouvements de masse à portée des paysans. Nous pensons que seul l'Etat dispose des moyens techniques, financiers et légaux, pour maîtriser les problèmes de glissement de terrain, souvent catastrophiques, et pour imposer des restrictions d'usage aux terres soumises à des risques majeurs de mouvement de masse.

4.4.1. Les formes d'érosion en masse

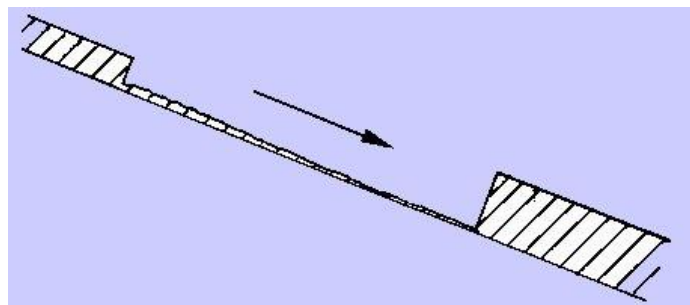


Figure 19. Processus de l'érosion en masse (Mazour M., 2004)



Photo 9. Érosion en masse dans la nature (Arabi, M.,1993)

Les phénomènes de mouvement de masse sont très nombreux mais on peut les regrouper en six groupes principaux :

- Les glissements lents (creep)

C'est un glissement plus ou moins lent des couches superficielles de la couverture pédologique, généralement sans décollement, qui s'observe assez généralement sur les pentes fortes grâce à la forme couchée des jeunes plants forestiers et à la forme en crosse de la base des arbres adultes. Dans les zones sylvopastorales; la circulation des animaux le long des versants peut également entraîner la formation d'escaliers encadrés par des réseaux de fissures (Moeyersons, 1989).

- Les glissements rapides

Les glissements de terrain **en planches** sont des décollements d'une couche plus ou moins épaisse de sol, glissant sur un horizon plus compact (souvent de la roche altérée), servant de plan de glissement. Ce phénomène est très courant sur les schistes dont le pendage est parallèle à la topographie (pendage conforme) sur les gneiss et sur les marnes en voie d'altération.

- Les versants moutonnés

Formes molles apparaissant dans des conditions humides lorsque les horizons superficiels dépassent le point de plasticité et progressent lentement, comme une pâte dentifrice, entre la trame de racines qui retient l'horizon de surface et l'horizon compact imperméable que représente l'altérité des marnes ou des argilites par exemple.

- Les coulées boueuses (lave torrentielle)

Ce sont des mélanges d'eau et de terre à haute densité ayant dépassé le point de liquidité et qui emportent à grande vitesse des masses considérables de boue et de blocs de roches de taille imposante. Lorsqu'elles viennent de se produire, elles se présentent sous forme d'un canal terminé par une langue de matériaux de texture très hétérogène (cône de déjection). Les matériaux fins sont

repris ultérieurement par l'érosion hydrique en nappe ou en rigole, laissant en place une masse de cailloux et de blocs de taille très hétérogène. Elles apparaissent souvent à la suite d'un glissement en planche ou dans une ravine lors d'une averse exceptionnelle nettoyant les altérites accumulées depuis quelques années (Temple, Rapp, 1972).



Boueuse (MazourM., 2004)



Photo 11. Lave torrentielle (MazourM., 2004)

Photo 10. Coulée

- Les glissements rotationnels en "coups de cuillère"

Ce sont des glissements où la surface du sol et une partie de la masse glissent en faisant une rotation, de telle sorte qu'il apparaît une contrepenne sur le versant. Il s'agit souvent de toute une série de coups de cuillère, laissant au paysage un aspect moutonné. Au creux du coup de cuillère, on observe généralement une zone humide où croît une végétation adaptée à l'hydromorphie (Carex). Il arrive couramment qu'après des périodes très humides, il s'installe un ruissellement sur les bords de la contrepenne et ce ravinement fait progressivement disparaître la contrepenne, ne laissant qu'un creux dans le versant qu'il est difficile de dissocier d'un ravinement ordinaire.(Boughalem, 2013)

- Les formes locales

Il s'agit d'éboulements rocheux, de sapements de berges ou d'effondrements de versants qui entraînent des glissements localisés. Ceux-ci sont très fréquents en tête de ravine: ils entraînent l'éboulement de la partie supérieure des lèvres d'une ravine et font progresser la ravine vers le sommet de la colline par érosion régressive. On les retrouve également dans les oueds, en particulier dans les parties concaves de la rivière lorsqu'elle forme un méandre.(Boughalem, 2013)



Photo 12. Les éboulements (MazourM., 2004)

4.4.2. Les causes et les processus des mouvements de masse

La cause des mouvements de masse (lents ou rapides) est à rechercher dans le déséquilibre entre d'une part, la masse de la couverture pédologique, de l'eau qui s'y trouve stockée et des végétaux qui la couvrent et d'autre part, les forces de frottement de ces matériaux sur le socle de roche altérée en pente sur lequel ils reposent (pente limites de 30 à 40 degrés = 65 %). Ce déséquilibre peut se manifester progressivement sur un ou plusieurs plans de glissement suite à l'humectation de ce(s) plan(s) ou par dépassement dans la couverture pédologique du point d'élasticité (creeping avec déformations sans rupture) ou de liquidité (coulées boueuses).

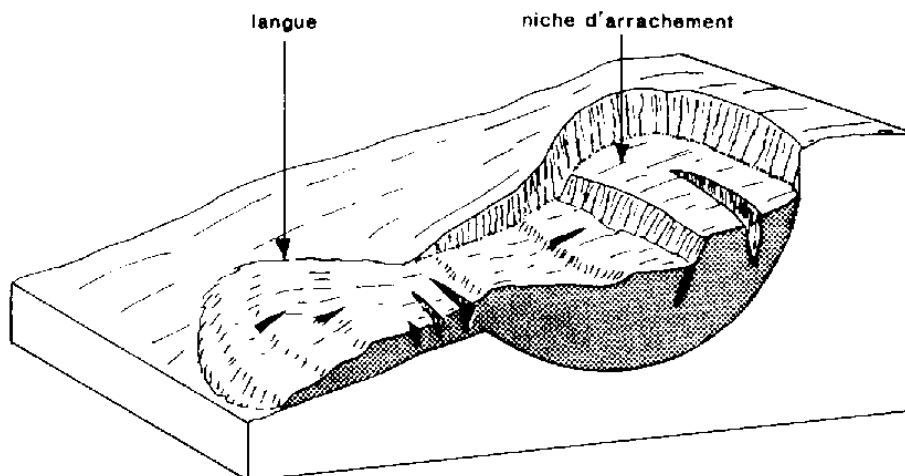


Figure 20. Glissement rotationnel en coups de cuillère (d'après Neboit, 1991)

Le déséquilibre est le plus souvent brutal et associé à deux types d'évènements isolés ou combinés: les secousses sismiques et les averses orageuses abondantes et intenses (plus de 75 mm en 2-3 heures) (Temple et Rapp, 1972). La circulation rapide de l'eau dans les fissures ou des mégapores (tunnelling) jusqu'à la roche pourrie provoquerait, à une certaine distance de la ligne de crête (5 à 95 mètres à Mgéta, en Tanzanie) ou aux points de rencontre des filets d'eau dans le sol, une pression

hydrostatique capable de repousser la masse réorganisée des sols, de décoller celui-ci par rapport à un niveau de fragilité de la roche pourrie: d'où la fréquence élevée des glissements en planche sur les schistes, les gneiss et les matériaux volcaniques poreux déposés sur les roches imperméables (ex. les cendres volcaniques sur dômes granitiques au Rwanda).

Les facteurs qui favorisent ce déséquilibre sont les secousses sismiques, les fissurations suite à l'alternance gel/dégel ou à la dessiccation des argiles gonflantes, l'altération de la roche, l'humectation jusqu'à saturation de la couverture pédologique, l'humectation du plan de glissement qui devient savonneux (présence de limons issus de l'altération des micas), des roches présentant des plans de clivage ou de fracture préférentiels (argillites, marnes, schistes, roches micassées, gneiss).

4.4.3. Les facteurs de risque de glissement de terrain

D'après Ferry (1987), les facteurs de résistance au glissement d'une couverture pédologique, apparaissent dans l'équation de Coulomb:

$$S = C + (P - U) \text{ tangente } F$$

où

S représente la résistance au cisaillement,

C la cohésion du sol,

P la pression normale à la surface du mouvement due à la gravité,

U la pression d'eau intersticielle dans le sol,

F l'angle de frottement interne,

tangente de F. le coefficient de frottement.

Les glissements se produisent lorsque la contrainte de cisaillement dépasse la résistance du sol ou lorsque la limite de plasticité ou de liquidité est atteinte. Le creep est souvent observé lorsque la couverture pédologique est épaisse, la pente forte et le climat très humide. Les glissements de terrain en planche sont favorisés par la présence de gneiss, de schistes ou de cendres volcaniques projetées sur les pentes convexes de schiste ou de granit en cas de pendage dans le sens de la pente, lorsque la couverture pédologique n'est pas très profonde, sur des fortes pentes (> 60 %) ou encore lorsqu'il existe un niveau imperméable ou un plan de contact en forte pente excessivement lubrifié.

Les versants en bourrelets ou moutonnés sont généralement liés à des milieux humides et marneux, de même que les glissements de terrain relationnels. Les sapements de berges et ceux de têtes ou de flancs de ravines, sont généralement liés à la présence d'écoulements qui creusent sous la couverture pédologique jusqu'à l'éboulement du matériau. On peut observer également des effondrements de tunnels provenant de la dissolution de gypse ou de sel ou creusés par des rongeurs à l'intérieur de la couverture pédologique dans lesquels les eaux vont s'engouffrer. Les sapements de berges sont fréquents dans les courbures des rivières et lors de la formation de méandres.

4.4.4. La lutte contre les mouvements de masse

Les méthodes de lutte contre les mouvements de masse sont généralement coûteuses et délicates. Contrairement à la lutte contre l'érosion en nappe ou l'érosion linéaire, il s'agit bien souvent **d'éviter que les eaux de pluie ne s'infiltrent dans le sol**, n'alourdissent la couverture pédologique et

n'atteignent rapidement le plan de glissement. Pour ce faire, on draine le sol en surface pour évacuer le ruissellement vers des zones non dangereuses, généralement les zones convexes d'un versant. On peut drainer en profondeur la zone située au niveau du plan de glissement pour éviter que la pression interstitielle ne décolle la couverture pédologique de la zone stable située en-dessous du plan de glissement.

Une autre méthode consiste à **assécher le terrain en augmentant l'évapotranspiration** des plantes; par exemple, en plantant des eucalyptus ou d'autres plantes qui ont un pouvoir évaporant important. Il faut cependant éviter que ce végétal n'atteigne des poids trop considérables.

Les méthodes préventives sont les plus importantes. Il faut donc éviter d'installer des infrastructures sur les versants instables, mais si on ne peut faire autrement, il convient de limiter les déblais et remblais qui déséquilibrent les versants. Si l'on est obligé de creuser le versant pour un passage routier par exemple, il faut conforter le talus en augmentant la butée par un masque en enrochement ou un mur de soutènement qui s'oppose au couple de rotation du glissement et améliore le drainage du versant.

CONCLUSION

La lutte contre **l'érosion en masse doit avant tout être préventive**: cartographie des zones dangereuses, plan d'occupation des sols interdisant toute construction et modification du versant, zone forestière de protection à gestion sous forme de taillis. Cependant, il n'est pas toujours possible d'éviter les cultures sur ces zones fragiles montagneuses souvent plus peuplées que les plaines environnantes car le climat y est plus sain (pas de paludisme) et les terres mieux arrosées.

La lutte contre les glissements de terrain est une affaire de spécialistes qui réclame de gros moyens pour drainer les plans de glissement hors de portée des paysans. Ces investissements de l'Etat ne se justifient que pour protéger des aménagements vitaux: réseaux routiers, villages, barrages, etc... Mais il existe quelques recettes que les paysans implantés depuis longtemps dans la région connaissent bien: il s'agit d'utiliser des arbres - en particulier l'eucalyptus et les bambous - pour dessécher l'assiette des talus et stabiliser les mouvements lents de la couverture pédologique sur les versants pentus et le long des berges.

B – EXPERIMENTATION

5. TROISIEME CHAPITRE : ETUDE DE CAS

5.1. L'ANALYSE DES FACTEURS DE RISQUE DE L'EROSION EN NAPPE ET LA CONSERVATION DE L'EAU ET DU SOL SUR LES VERSANTS DE LA REGION D'AIN TEMOUCHENT

5.1.1. Les conditions expérimentales

5.1.1.1. Présentation de la zone d'étude

5.1.1.1.1. Situation géographique

La wilaya de Ain Témouchent est située dans le Nord ouest algérien, elle est au carrefour de trois grande villes de l'ouest

- Oran
- Tlemcen
- SidiBel Abbas.

Elle est à seulement une centaine de kilomètres de la frontière marocaine.

Elle occupe l'arrière pays d'un territoire fortement industrialisé entre Oran, la zone des Hassi et Arzew. Dans ses limites administrative, la wilaya de Ain Témouchent s'étend sur 2 376 km² avec une façade maritime de plus de 80 Km.

Cette position géographique constitue un atout formidable pour le développement économique et sociale de la région qu'il faut absolument exploiter.

Les limites géographiques de la wilayade Ain Témouchent:

- La mer méditerranée au Nord ;
- La wilaya de Sidi Bel Abbas au Sud ;
- La wilaya d'Oran à l'Ouest ;
- La wilaya de Tlemcen au Sud-est.



Figure 21. Situation géographique de la Wilaya de Ain Témouchent (<http://www.andi.dz>)



Figure 22. Les limites administratives des communes et daïra de la wilaya de Ain Témouchent (<http://www.andi.dz>)

5.1.1.1.2. Le relief

Le relief de la wilaya de Ain Témouchent comprend principalement trois unités assez distinctes qu'on peut considérer comme étant des unités d'aménagement assez homogènes:

1- les plaines intérieures qui regroupent:

- les plaines de Ain Témouchent et d'El Amria

Ces plaines sont constituées de plaines et coteaux avec altitude moyenne de 300 mètres environ.

- la plaine de M'Léta

Elle se situe entre la Sebkha et le versant septentrional de Tessala. L'altitude moyenne varie entre 50 et 100 mètres.

2- La bande littorale qui fait partie de la chaîne tellienne et qui est composée:

- du massif côtier de Béni Saf dont l'altitude moyenne est de 200 mètres. Le point culminant atteint 409 mètres à Djebel Skouna.

- du plateau de OuledBoudjemaa avec une altitude moyenne de 350 mètres et une légère inclinaison en direction de la Sebkha.

- de la baie de Bouzedjar

3- la zone montagneuse dont l'altitude moyenne varie 400 et 500 mètres et qui regroupe:

- les Traras orientaux qui se caractérisent par un relief très abrupte

- les hautes collines des Berkèches qui se prolongent jusqu'aux monts de SebaaChioukh constituant une barrière naturelle entre les plaines intérieures et le bassin de Tlemcen.

- les monts de Tessala d'une altitude moyenne de 600 mètres.

5.1.1.1.3 Le climat

C'est une région (wilaya de Ain Témouchent) dégradée et représentative du tell occidental au vu de la diversité de ses caractéristiques et des différents aménagements dont elle a fait l'objet. Elle est caractérisée par :

Un climat de la est de type méditerranéen semi aride avec des pluies annuelles qui varient de 280 mm à 480 mm. Ces pluies sont caractérisées par une irrégularité spatio-temporelle et par un régime de courte durée et **à forte intensité** (l'intensité maximale peut atteindre 35 mm/h en 30 mn).

Malgré sa réputation de pays méditerranéen du fait de sa façade littorale de 80 km, c'est un climat très fortement marqué par son aridité.

Du fait de l'allongement du territoire vers le sud, le climat de l'Algérie s'assèche naturellement dans cette direction, puisqu'il passe du climat méditerranéen humide du littoral au climat désertique hyper aride qui caractérise le Sahara. Mais cette dégradation est rapide du fait des montagnes littorales (chaînes de l'Atlas Tellien) qui isolent le passage, vers l'intérieur du pays, des perturbations océaniques et marines porteuses de pluie.

Les zones du territoire algérien qui reçoivent plus de 400 mm de pluie par an se limitent à une bande d'un maximum de 150 km de profondeur à partir du littoral, cette bande se réduit à moins de 100 km en Oranie. On passe ensuite, au delà des reliefs de l'Atlas Tellien, à un climat semi aride dont la pluviométrie se situe entre 400 mm et 100 mm de pluie par an ; il concerne une seconde bande de territoire au moins deux fois et demie plus vaste que la précédente mais qui n'excède pas à son tour 300 à 350 km de profondeur.

Au total, l'Algérie enregistre une pluviométrie moyenne annuelle évaluée à 100 milliards de m³ sur lesquels les eaux de ruissellement ou écoulements superficiels représentent environ 12,5 milliards de m³, le reste des précipitations se partage entre évaporation et infiltration dans le sol (Remini, 2000).

Le climat dans la région de Ain Témouchent peut s'apparenter à celui de toute la région méditerranéenne, présentant un climat globalement doux et assez humide.

5.1.1.1.3.1. Bioclimat

Le bioclimat est de type semi-aride, modulé par la proximité de la mer au Nord et par l'augmentation des altitudes vers le Sud. De plus, la diversité morphologiques, les dénivelées importantes et l'orientation des reliefs WSW/ ENE induisent des nuances locales soit vers le frais et humide (retombée nord des Monts de Tessala et des Traras), soit vers le chaud et sec (retombée sud des Monts des Traras, plaine de M'Léta et la zone de Oulhaça). Ainsi en année moyenne, ce domaine semi-aride possède des enclaves soit subhumides (les sommets les plus élevés des reliefs et hauts de versants à l'exposition ouest ; soit arides (zones déprimées, en position d'abri comme la zone des Traras sud et la plaine de Ain Témouchent et El Amria, (Mazour, 1994).

5.1.1.1.3.2. Les températures

Aout est le mois le plus chaud de l'année. La température moyenne est de 25.7 °C à cette période. Au mois de Janvier, la température moyenne est de 10.8 °C. Janvier est de ce fait le mois le plus froid de l'année.

Température

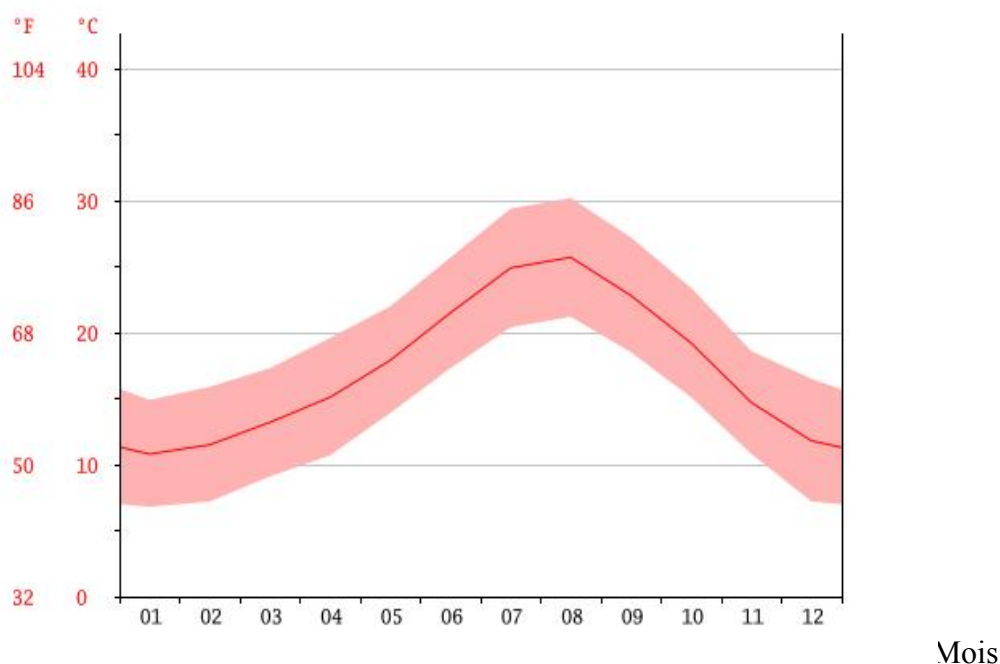


Figure 23. Courbe de température Ain Témouchent (<http://www.andi.dz>)

Une différence de 73 mm est enregistrée entre le mois le plus sec et le mois le plus humide. 14.9 °C de variation sont affichés sur l'ensemble de l'année.

5.1.1.1.3.3. Les précipitations

Tableau 4. Précipitation moyennes mensuelles annuelles de période de 2000-2011 (source ABH)

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jui	Aou	Moy
					v		s	il		n	l	t	
P (mm)	10,44	42,41	53,43	38,55	50,64	42,33	27,67	24,53	24,13	4,38	0,04	2,28	319,83

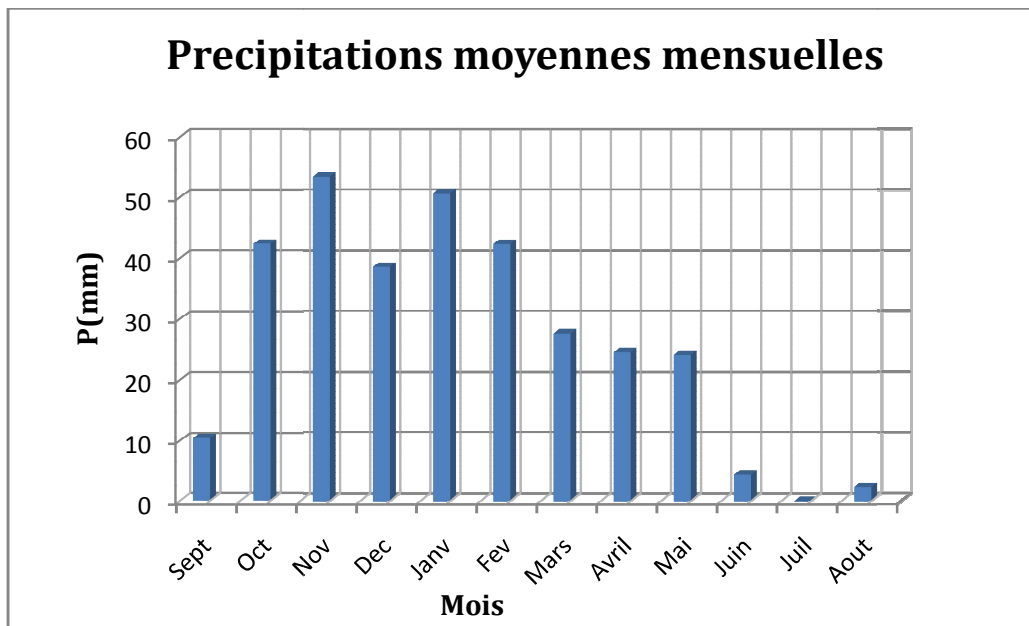


Figure 24. Variation des précipitations mensuelles à Ain Témouchent (source ABH)

La répartition **mensuelle des précipitations** montre un net contraste pluviométrique entre deux sous saisons humides (Octobre à Janvier) et (Février à Mai). Les orages estivaux sont fréquents et constituent une bonne partie des apports liquides aux barrages où l'évaporation reste le facteur le plus important en cette période.

La pluie moyenne annuelle est de 320mm.

L'évaporation sur nappe d'eau libre atteint la valeur moyenne annuelle de 1200 mm.

La pluviosité dans la région de Ain Témouchent varie fortement d'une année à l'autre. L'analyse **des pluies annuelles** dans la région permet d'observer :

- une tendance déficitaire des précipitations lors des 20 dernières années où plusieurs valeurs annuelles se trouvent en dessous de la moyenne ;
- une diminution de la pluie à mesure que l'on s'éloigne du littoral à cause de l'appauvrissement progressif de l'atmosphère en vapeur d'eau, lors du passage des courants aériens qui abandonnent leur pluie en franchissant, les chaînes montagneuses. Une sensible augmentation pluviométrique également de l'Ouest vers l'Est, est très perceptible.

5.1.1.1.3.4. Les averses torrentielles

Le climat régional est caractérisé par un régime pluviométrique particulier : les pluies sont souvent violentes et de courte durée (elles dépassent rarement 48 heures). Elles sont concentrées sur quelques jours de quelques mois de l'année. Les averses les plus dangereuses sont celles de la fin de l'été et du début de l'automne, les sols étant nus, les dégâts par érosion peuvent être considérables. Les averses ont aussi cette particularité d'être très localisées dans l'espace.

Les besoins hydriques ou déficits sont d'autant plus importants que les pluies mensuelles sont inférieures à l'ETP (Ain Kihal). Si par contre les pluies mensuelles sont supérieures à l'ETP, il y aura une disponibilité d'eau qui servira à reconstituer les réserves d'eau dans le terrain et le surplus

ruissellera sur les versants et vers les thalwegs. C'est surtout dans la partie montagneuse, au sud de la wilaya que les écoulements sont les plus importants (Tessala, etc.).

5.1.1.1.3.5. Conclusion

Le climat dans la région de Ain Témouchent est caractérisé par des pluies d'origine orographique, dépendantes des détails du relief. Elles augmentent avec l'altitude (où les isohyètes des pluies annuelles suivent en gros les courbes de niveau) et varient entre 300 et 500 mm.

Les versants nord des montagnes (Monts de Tessala) sont plus arrosés que les versants sud (collines de Sidi Abdelli, Ain Kihal, Ain Témouchent, etc.).

Les mois les plus pluvieux de l'année sont généralement Mars, Février et Avril.

Les pluies maximales journalières dépassent assez souvent 20 mm et peuvent atteindre 40 mm. Il a été mesuré **des intensités de l'ordre de 48 mm/heure** lors d'averses exceptionnelles (Sidi Boussidi)

Une lithologie caractérisée par des roches en majorité tendres (marnes et grès tendre) mais aussi des roches calcaires en dalle dans le domaine Jurassique au sud de la wilaya. Ce sont les zones marneuses du Miocène au nord qui sont les plus exposées aux différents processus d'érosion.

Des formations végétales très dégradées par le parcours, caractérisées par de faibles densités de recouvrement et de mauvaises conditions de régénération.

Les cultures sont représentées principalement par la céréaliculture, un peu de cultures sarclées, de timides réintroductions de vignoble et arboriculture rustique.

Des sols riches en calcaire sauf pour les sols rouges fersialitiques, le complexe adsorbant est saturé et dominé par le calcium et le magnésium. Le taux des matières organiques est faible et décroît de la surface vers la profondeur. Le rapport C/N montre une bonne évolution des matières organiques (Mazour, 2004).

5.1.1.2. L'approche méthodologique

Elle repose essentiellement sur des observations dans des sites assez représentatifs de l'état de la dégradation des sols par l'érosion hydrique à travers la wilaya de Ain Témouchent.

Les sites sont choisis tout d'abord pour des raisons pratiques (accès, représentativité, etc.) et aussi pour l'impact des systèmes d'utilisation des terres sur l'érosion et la dynamique de l'eau dans le sol.

Nous avons choisi deux sites d'observation et de mesure, l'un situé près de Ain El Alem sur un versant marneux cultivé en céréaliculture et l'autre entre Ain Tolba et Ain Kihal, sol nu, tassé et fortement décapé. (Figure 25).

Pour le premier site, sur un transect du haut vers le bas, trois points de mesure et d'observation ont été définis: T1, T2 et T3.

Sur le deuxième site, sur un versant, trois points de mesure et d'observation ont été aussi définis: F1, F2 et F3.

Ces observations concernent particulièrement les états de surface, l'ampleur du décapage par l'érosion en nappe et le ravinement.

L'infiltrabilité est évaluée sur site par la méthode de Piogger ou technique du cylindre simple anneau en fonction des conditions du milieu naturel.

Ce sont des techniques assez extensives mais vu le temps qui nous est consacré, nous ne pouvons pas assoir un dispositif expérimental qui permet une évaluation plus rigoureuse de l'érosion et du ruissellement afin de mieux apprécier la dynamique de l'eau dans le sol.

Cette méthode permet néanmoins d'avoir une première appréciation de la dynamique de l'érosion et du **ruissellement et pour une première fois dans la région de Ain Témouchent.**

Cette approche nous permet en même temps d'analyser **l'effet des systèmes de gestion des terres** les plus fréquents et les plus dominants dans la région : sol nu, sol cultivé, sol en jachère et sol sous végétation naturelle pâturée et quelques améliorations, **sur les risques de ruissellement et d'érosion.**



Figure 25. Sites d'observation et de mesure (<http://www.andi.dz>).



Photo 13.Site1,Ain El Alem versant marneux cultivé.



Photo 14.Site 2, sol nu, tassé et dégradé.

5.1.1.3. Observations, mesures et résultats

Les premières observations du phénomène d'érosion hydrique à travers la wilaya de Ain Témouchent au niveau des sites d'observation montrent que, d'une manière générale, à **chaque type**

de sol correspond une végétation naturelle ou cultivée caractéristique : sur les sols marneux est pratiquée le plus souvent une céréaliculture extensive avec des rendements variables en fonction de la pluviométrie et sa répartition durant la période qui va de l'automne au printemps en rotation avec quelques légumineuses (fèves et petits pois) et jachère pâturée. **La végétation naturelle y est essentiellement herbacée et annuelle** ; le sol est pratiquement nu durant l'été et l'automne.

Ces sols fonctionnent différemment au niveau des sites d'observation en fonction des différents événements pluviométriques et la végétation. Les sols d'érosion peu évolués sont peu profonds et sensibles au ruissellement et à l'érosion. Les autres sols sont plus profonds et moins sensibles et sont localisés au niveau des bas de pente.

5.1.1.4. Evaluation de l'infiltrabilité des sols

L'infiltrabilité ou capacité d'infiltration (capacité d'absorption) c'est le flux d'eau maximal que le sol est capable d'absorber à travers sa surface, lorsqu'il reçoit une pluie efficace ou s'il est recouvert d'eau. Elle dépend de la texture et de la structure du sol, mais également des conditions aux limites, c'est à dire, la teneur en eau initiale du profil et la teneur en eau imposée en surface.

Si l'on compare l'intensité de la pluie et la capacité d'infiltration d'un sol, il existe deux possibilités :

Tant que l'intensité de la pluie est inférieure à la capacité d'infiltration, l'eau s'infiltré aussi vite qu'elle est fournie. Le temps nécessaire pour égaler la capacité d'infiltration est variable. Il dépend principalement des conditions antécédentes d'humidité du sol et de l'averse. Le temps requis est d'autant plus long que le sol est sec et que le régime d'alimentation est voisin de la conductivité hydraulique à saturation.

Lorsque l'intensité des précipitations est supérieure à la capacité d'infiltration du sol, l'excédent d'eau s'accumule en surface ou dans les dépressions formant des flaques, ou bien encore s'écoule en suivant les dénivelés topographiques. Dans ce cas, on a atteint le **temps de submersion** et l'on parle d'infiltration à capacité (le régime d'infiltration est limité par la capacité d'infiltration du sol).

Les taux d'infiltration dépendent fortement du couvert végétal puisque les végétaux et matières organiques augmentent la porosité du sol et agissent ainsi sur sa conductivité hydraulique. En absence d'un couvert végétal, la porosité du sol près de la surface peut diminuer fortement sous l'impact des gouttes de pluie et former une croûte de battance. Dans ce cas, le taux d'infiltration est très faible. Un système racinaire bien développé améliore aussi les taux d'infiltration (Linsley et al., 1958, Kincaid et al. 1963).

La teneur en eau dans le sol est fonction de la porosité et de la perméabilité du sol. Le volume maximal d'eau qu'un sol peut retenir est la "**capacité au champ**" ou capacité de rétention du sol qui dépend essentiellement de la granulométrie du sol. Près de la surface, le sol n'est pas saturé, les espaces vides contiennent de l'eau et de l'air; l'eau est soumise aux forces de gravité et de capillarité. A partir d'une certaine profondeur, la teneur en eau n'augmente plus: le sol est saturé, tous les pores du sol sont remplis d'eau: cette zone saturée forme une nappe; les forces de gravité sont prédominantes. L'eau du sol ne représente que 0,064% de l'eau douce totale; son rôle est cependant essentiel puisque c'est l'eau qu'utilisent les racines des plantes.

Les mesures et la pénétration de l'eau dans le sol, in situ visent à connaître le flux vertical de l'eau d'un sol soumis à une lame d'eau ou d'une pluie artificielle (Brouwers, 1990).

Les méthodes de mesures d'infiltration de l'eau sur terrain se différencient dans leur exécution par :

- Le nombre d'anneaux employés (simple ou double anneaux)
- La charge : constante ou décroissante
- La surface occupée par l'anneau central sur lequel se fait la mesure.

5.1.1.4.1. Matériel et méthode

Le **matériel** utilisé pour mesurer l'infiltration est un dispositif à simple anneau à charge décroissante appelée aussi monocylindre (Roose et al., 1993) (Figure 26).



Figure 26. Test d'infiltration au monocylindre (Boughalem., 2007);

C'est un matériel facile à transporter nécessitant une faible quantité d'eau par rapport aux simulateurs de pluie

La méthode consiste à suivre l'infiltration en fonction du temps d'un litre d'eau introduit dans un cylindre métallique de 100 cm^2 de section et de 10 cm de charge initiale. Elle consiste à tracer la courbe de la quantité infiltrée en fonction du temps d'arrosage.

Des couples de lecture (hauteur d'eau « h », temps « t ») sont effectués avec une périodicité en fonction de la vitesse d'infiltration. Ce test est poursuivi jusqu'à ce qu'on obtienne une vitesse d'infiltration stable.

Une fois l'infiltration terminée (fin de la brillance de la surface), on observe rapidement si la surface du sol n'a pas été dégradée ou colmatée, puis on enlève rapidement le cylindre. Une coupe est en suite réalisée à l'aide d'une bêche et un couteau pour relever les dimensions et la forme de la partie mouillée (après 3min environ).

Le relevé systématique de la forme des dimensions de la partie mouillée sous le cylindre est très intéressant puisqu'il permet d'une part, de voir comment s'est effectué le mouvement de l'eau et d'autre part, elle nous permet de faire des corrections si l'essai est affecté d'un biais du aux flux latéraux.

Si le sol est sableux et très perméable, la tache aura la forme d'un cylindre (Figure 27 a).

Si le sol est sablo-limoneux ou argileux, la tache prendra la forme d'un ballon ou d'un cône renversé à cause de la succion latérale dans les micropores (Figure 27 b).

Si le sol est tassé, l'infiltration est lente, la succion latérale est importante, et la tache prend la forme d'une coupe évasée (Figure 27 c).

Enfin, si le sol est formé d'un horizon perméable sur un horizon peu perméable, la tache s'étale sur ce dernier et forme un champignon renversé. S'il y a un drainage oblique vers le bas de la toposéquence, la tache indiquera le sens du drainage oblique (Figure 27 d).

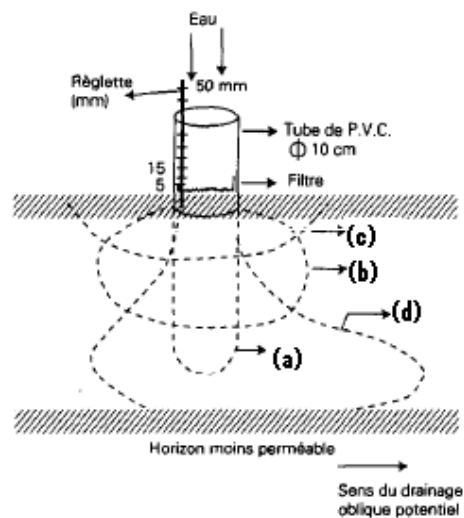


Figure 27. Forme des taches d'humectation en fonction des caractéristiques hydrodynamiques des horizons du sol (Roose et al., 1993)

a) sol sableux très perméable ; b) sol sablo-argileux à porosité fine ; c) sol peu perméable, tassé ou battu par la pluie ; d) horizon perméable sur un horizon moins poreux avec tendance au drainage oblique (Roose et Blancaneaux, 1993 in Roose et al., 1993).

Le diamètre moyen de la tache permet de corriger l'estimation de l'infiltration en fonction de la succion latérale :

$$\text{Le coefficient de correction (CC)} = f(\text{volume des taches}) = \frac{\pi \cdot H \cdot R^2}{\pi \cdot H \cdot r^2} = \frac{R^2}{r^2}$$

CC varie de 2 à 4 sur sols à comportement sableux ou argileux stables

CC varie de 4 à 10 sur sols argilo-limoneux instables

(F_n corrigé = F_n mesuré $\times R^2/r^2$) (Roose et Smolikowski, 1997).

Capacité d'infiltration corrigée

Pour tenir compte de la succion latérale indiquée par la forme de la tache, on calcule le coefficient de correction à partir du rayon moyen sur l'ensemble de la hauteur de la tache (R). On divise l'infiltration finale par le coefficient de correction:

$$FN \text{ corrigée} = FN \frac{R^2}{r^2} \quad (\text{en mm/h})$$

Plus le coefficient de correction est élevé, plus les risques de drainage oblique sont forts.

Avantages

- C'est un Test rapide qui exige peu d'eau, il permet une bonne compréhension du comportement de l'eau dans le profil et le long d'une toposéquence ; le matériel est très mobile, à la portée de toutes les bourses. Cette méthode permet de définir les propriétés hydrodynamiques les plus utiles.
- Ce test donne souvent des valeurs relatives 10 fois supérieures aux mesures d'infiltration sous pluies simulées (Roose et Smolikowski, 1997).

Limites

- C'est qu'un test comparatif et non une mesure absolue : les sols sont souvent des milieux si hétérogènes qu'il est nécessaire de faire de nombreuses répétitions (cinq au minimum) dont on compare les médianes.
- La surface de mesure (100 cm²) n'intègre pas toujours toute la maille de l'hétérogénéité.
- Il n'est pas toujours facile d'étanchéifier le contact sol cylindre, en particulier sur les sols sableux, caillouteux, fissurés ou tassés : on augmente alors artificiellement les valeurs de la capacité d'infiltration.
- Il faut absolument verser l'eau dans le cylindre avec soin et amortir l'énergie de chute à l'aide des doigts ou d'une cuillère sans remuer la surface du sol ; sans quoi il se forme une suspension qui va se déposer et former une croûte artificielle.

Influence de l'état hydrique des sols

Afin d'avoir des résultats comparables, tous les tests de suivi de la vitesse d'infiltrabilité doivent être effectués durant la même période à savoir pour notre cas à la fin du mois d'avril.

L'état hydrique initial des sols varie au cours de l'année.

Le choix des dates a été fait sur la base du temps réservé pour la réalisation de ce projet de mémoire mais aussi un peu en fonction de la répartition de la pluie.

En été, les pluies sont rares et les sols sont secs et fissurés. Les sols restent tels qu'ils sont après les récoltes, le taux d'humidité du sol est de l'ordre de 5%.

Au mois de novembre et décembre que le sol commence à être travaillé après les premières pluies de la saison. Le sol commence à s'humidifier et les fissures se referment progressivement, mais la surface reste toujours nue sans couverture végétale, le taux d'humidité du sol est de l'ordre de 25 à 40%.

Au printemps, le sol est totalement couvert par la végétation et tout en s'approchant de la fin de la saison, il commence à se dessécher et les premières fissures apparaissent et continuent à prendre de l'ampleur au fil de l'arrivée de la saison sèche, le taux d'humidité du sol est de l'ordre de 25%.

Les essais des différentes époques sont situés sur le même site. Les tests ont été accompagnés chaque fois par l'observation de l'allure de la frange infiltrée et de l'état de surface (Morsli, 1997). Avant et après chaque essai, nous avons déterminé au bord de chaque parcelle l'humidité des sols à 10 cm (par variation de poids d'un sol mis à l'étuve à 105°C pendant 24 h).

L'argile mobilisé migre dans l'eau d'infiltration, couvre la périphérie des agrégats et colmate les interstices intra-agrégats ou bien se dépose à la surface du sol pour former la croûte.

La formation des croûtes, ou organisation pelliculaire de surface, entraîne une réduction de l'infiltrabilité, accroît les risques de ruissellement et d'érosion.

5.1.1.4.2. Résultats et discussion

Rappelons tout d'abord que, sur le terrain, nous avons fait trois répétitions pour chaque mesure sur chaque site. Les valeurs d'infiltration obtenues ont été corrigées en fonction de la succion latérale indiquée par la forme de la tache d'humectation (Figure 27).

Nous donnerons la valeur moyenne des répétitions qui sera à la base de nos commentaires.

Dynamique de l'infiltration

En région aride et semi-aride le ruissellement et son corollaire l'érosion dépendent du dépassement de la capacité d'infiltration d'un sol, c'est-à-dire de sa possibilité d'absorber le flux d'eau fourni. Le processus d'infiltration débute généralement par une décroissance très rapide durant les premiers instants de l'événement pluvieux. Par la suite le taux de décroissance diminue pour aboutir à un régime stable appelé infiltrabilité finale.

L'infiltration de l'eau dans le sol est un paramètre très important pour l'étude de l'érosion ; plus l'infiltration est importante, plus le ruissellement est réduit. Celle-ci est extrêmement

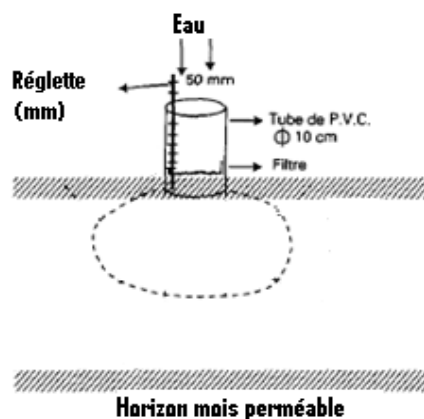


Figure 28. Forme de la partie mouillée sous le cylindre de mesure de l'infiltration obtenue sur sol marneux (Roose et al., 1993)

variable en fonction de l'humidité préalable, de la texture et surtout de la structure du sol et de la stabilité de sa surface.

Les résultats d'infiltration obtenus sont présentés sur les tableaux 5 et 6 et sous forme de graphiques sur les figures 29 et 30.

- Infiltration K (mm/h) sur le site 1

Tableau 5. Tableau des valeurs des mesures de l'infiltration sur le site 1. Versant sous culture de céréales

T1	T2	T3	Temps (min.)
512	618	965	1
460	522	816	2
415	460	750	3
410	455	746	4
406	430	728	5
320	386	561	6
230	322	488	7
120	203	278	8

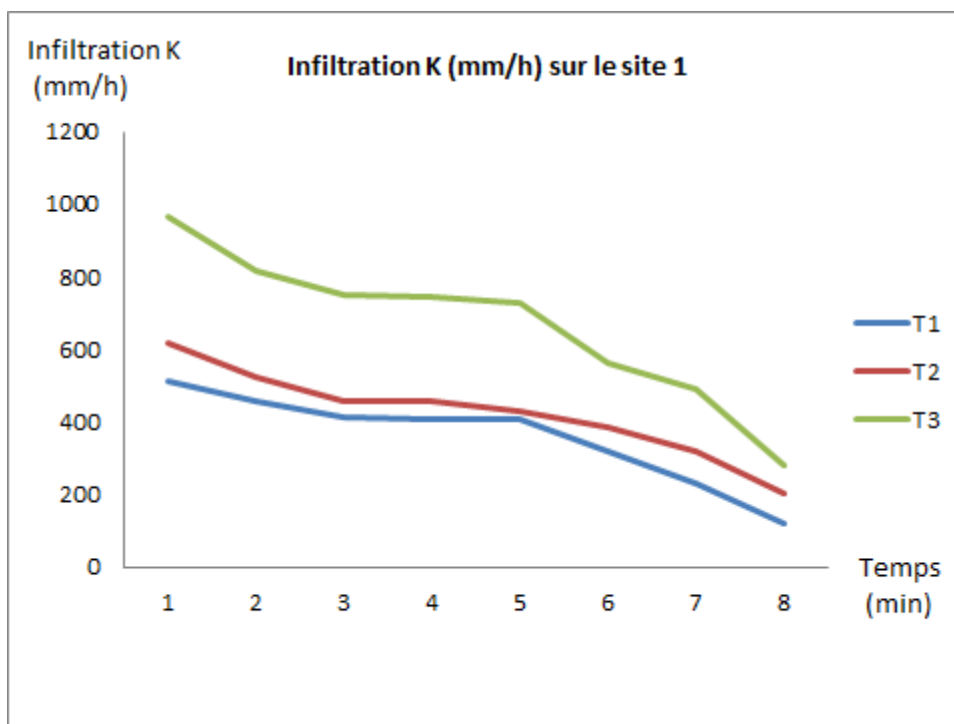


Figure 29. Variation de l'infiltration en fonction du temps sur versant sous culture de céréaliculture

Infiltration K (mm/h) sur le site 2

Tableau 6. Tableau des valeurs des mesures de l'infiltration sur le site 2 .Versant sol nu tassé et dégradé

F1	F2	F3	Temps (min.)
310	366	626	1
285	322	582	2
277	272	520	3
268	249	460	4
212	210	432	5
186	166	390	6
117	122	248	7
48	62	129	8

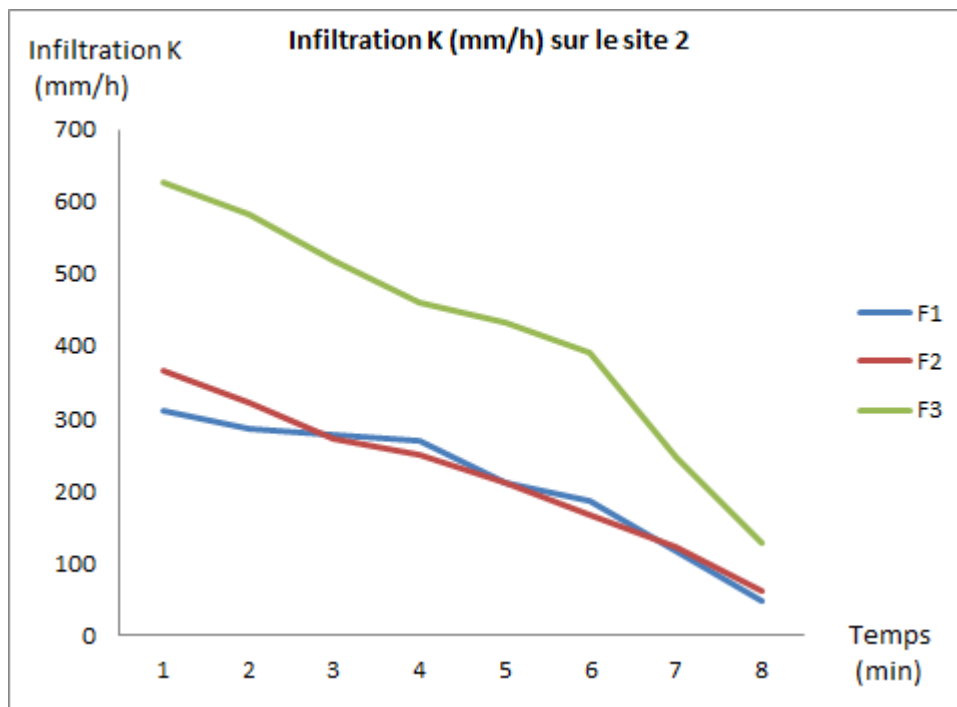


Figure 30. Variation de l'infiltration en fonction du temps sur versant nu, tassé et fortement dégradé

1. La phase d'**imbibition** : durant laquelle toute l'eau s'infiltre. Cette phase coïncide avec la constitution de la croûte structurale ou croûte de battance sous l'action mécanique et physique de l'eau.

2. La phase de **décroissance de l'infiltration** qui se présente avec un profil de diminution progressif. La diminution de l'infiltrabilité est due à plusieurs causes :

- La diminution du gradient potentiel hydrique au fur et à mesure que la teneur en eau du sol augmente.
- La dégradation de la structure qui fait disparaître les macropores.
- Le colmatage des pores par les particules solides mises en suspension.
- Le piégeage de l'air qui se comprime dans les pores et empêche la pénétration de l'eau.

Selon Poss et al, (1989-1990) la phase de décroissance correspond à la transformation de la croûte structurale en croûte d'érosion.

3. La phase de **stabilisation** (intensité limite d'infiltration), au cours de cette période la diminution de l'infiltrabilité se poursuit très lentement et coïncide conjointement avec le développement de la croûte d'érosion sur les zones restées saillantes et de la croûte de sédimentation dans les zones immergées (Poss et al, 1989-1990).

Une infiltration préférentielle attribuable à des macro-pores semble se produire au début de l'infiltration pour tous les sites.

Dans les sols marneux, très riches en minéraux argileux gonflables, La dynamique hydrique est très particulière. L'infiltration est très liée à l'état hydrique et structural du sol. Le suivi de l'infiltration a permis d'expliquer cette dynamique hydrique.

Au début de l'été, le dessèchement du sol provoque une réorganisation de ses constituants. Il en résulte un retrait se manifestant par une modification de la porosité du sol et notamment par l'apparition des fissures. L'infiltration peut atteindre des valeurs assez basses sur des sols tassés ou reposant sur un horizon imperméable.

Le dessèchement du sol provoque l'apparition d'un réseau serré de fissures fines, puis le retrait continu avec le temps et on observe l'élargissement de certaines fissures au dépend d'autres, (Morsli, 1997).

Lorsque le sol est sec, l'infiltration est élevée (600- 900 mm/h) et peut atteindre des valeurs plus basses sur des sols tassés ou reposant sur un horizon imperméable. Les eaux infiltrées par les grandes fissures emportent vers les profondeurs des quantités appréciables de terres fines.

Elle diminue quand le sol est relativement humide (48- 300 mm/h) environ.

Les sols marneux, une fois saturés deviennent gonflants, perdent leur stabilité et par simple soutirage ou rupture de pente, on observe un effondrement en masse de ces sols.

Pour ce type de sol, lorsque l'infiltration le permet, l'eau s'infiltré dans la masse et dès que certains seuils sont franchis, des déformations et des glissements s'amorcent.

A partir de cette analyse, on peut dire que l'écoulement de l'eau dans le sol marneux est de deux types : un écoulement lent dans le sol (écoulement au niveau de la microporosité du sol). Cet écoulement se réalise lorsque le sol est humide et fermé (non fissuré) et un écoulement rapide par l'intermédiaire des fissures, écoulement privilégié et hypodermique (écoulement préférentiel) à travers la macroporosité.

Boudjemline (1987 in Roose, 1996) a montré que c'est l'humidité de la couche superficielle qui influence le plus la réaction du sol à la pluie : au-delà de 10 cm, le complément d'information est négligeable, sauf dans le cas où le ruissellement naît de la saturation d'un massif poreux situé au-dessus d'un horizon très peu perméable. Trévisan (1986) a montré par ailleurs que c'est le déficit de saturation de cet horizon poreux (Porosité totale - porosité pleine d'eau avant l'averse) qui conditionne le démarrage du ruissellement (pluie d'imbibition) plus que l'humidité en elle-même des échantillons.

L'infiltration est aussi liée à l'état structural du sol. Les conséquences du retrait ont une grande influence sur l'infiltration de l'eau dans le sol (Hallaire, 1988). Les phénomènes de gonflement-retrait et de saturation des sols ont surtout été analysés dans le cas des sols argileux (Tessier, 1984 ; Bruand, 1986 ; Hallaire, 1987 ; Mc Garry et Daniells, 1987).

Généralement, les valeurs d'infiltrabilité les plus élevées sont enregistrées en été, au niveau des sols présentant les plus fortes proportions de surfaces ouvertes, tandis que les plus faibles infiltrabilités sont notées en hiver, sur des sols avec de faibles proportions de surfaces ouvertes. Cette relation montre que l'ouverture telle que nous l'avons estimée visuellement est un paramètre hydrodynamique pertinent. Ces résultats concordent avec ceux de Morsli, (1997) obtenus à partir des test d'infiltration par la méthode de Piogger et ceux de Habi et al., (2009) obtenus sous pluies simulées.

Test d'infiltration sur site 1:

Site 1: Parcelle de céréaliculture, sol marneux, exposition nord, date: 29 avril

Trois tests: T1, T2, T3

L'infiltration moyenne pour le sol sec (T1) en bas de pente est de (965 - 278mm/h), la présence d'une litière à la surface du sol, fortement transformée par les vers de terre et les termites, explique la disparition des croûtes de battance et l'amélioration de la capacité d'infiltration de l'eau pour ce site; par contre, sur T2 à mi-pente elle est moyenne et varie de 618 à 203mm/h, en haut du versant T3, l'infiltration n'est que de 512 - 120mm/h

Certains auteurs ont établi des fonctions de puissance entre le gradient de pente et l'érosion en nappe (Govers, 1991 ; McCoolet *al.*, 1993). Il a été démontré, en se basant sur des pluies simulées, que plus la pente est forte plus l'infiltration est faible à cause du changement des propriétés de la surface du sol et la mise en place de la croûte de battance qui se traduit par l'augmentation de l'érosion (Poesen, 1984).

Site 2: Sol nu tassé, sol marneux et caillouteux, exposition sud, date: 30 avril

Trois tests: F1, F2, F3

L'infiltration moyenne varie en fonction de l'exposition des versants « nord/sud » et augmente du haut vers le bas des versants.

Ainsi, l'infiltration moyenne est plus élevée pour les tests F1 et F2 (366- 62 mm/h) que sur celui de F3 (626- 129mm/h).

Pour F1 et F2 (situés en haut et mi pente), l'infiltration moyenne reste modérée (366- 62 mm/h), alors que pour F3, l'infiltration moyenne de l'eau est légèrement plus élevée (626- 129). Celle-ci peut atteindre jusqu'à 38 mm/h quand le sol est humide (après pluie).

Nos résultats montrent que c'est sur les sites orientés au nord et situés en bas de pente que sont enregistrées les valeurs d'infiltrabilité les plus élevées. Cela s'explique par le couvert végétal qui favorise l'infiltration et s'oppose ainsi au ruissellement.

En effet, les teneurs en matières organique sur les versants nord sont relativement élevées (Mazour, 2004) et diffèrent selon les systèmes d'utilisation des terres. Les versants sud les moins arrosés et les plus érodés sont exposés à des conditions favorables de minéralisation de la matière organique.

De cette analyse de l'infiltration, il ressort que :

- si l'infiltration est élevée lorsque le sol est sec, elle peut atteindre des valeurs moyennes à faibles et même très faibles lorsque le sol est humide.

-l'infiltration sur les sols cultivés est plus élevée que sur sol nu.

-l'infiltration est variable dans l'espace : elle est plus élevée sur les versants exposés nord que ceux exposés sud. Pour le même type de sol et la même orientation, l'infiltration augmente de l'amont vers l'aval des versants.

La valeur d'infiltration la plus faible a été mesurée sur la parcelle F1, labourée, orientée sud et située en haut du versant (parcelle pauvre en biomasse, sol tassé et durci, croûte de battance...).

La plus forte valeur d'infiltration a été enregistrée sur la parcelle T3, en semis direct, orientée nord et située en bas du versant ; à ce niveau, le sol est maintenu couvert en permanence par une biomasse sèche de résidus végétaux, sa vie biologique s'anime, sa fertilité s'enrichit et il est à l'abri des différentes formes de dégradation. En réduisant le ruissellement, le système du semis direct constitue une protection efficace contre l'érosion.

D'après Ehlers (1977 in Raheliarisoa, 1986), l'infiltration de la pluie s'est trouvée meilleure dans le cas d'un sol non labouré que dans le cas d'un sol labouré (blé sur sol loessique), et la différence est surtout nette pour les fortes intensités de pluie; par conséquent le ruissellement et l'érosion sont réduits.

Ce même auteur a démontré que la porosité totale des sols labourés et les pores supérieurs à 30 microns sont élevés dans la couche 0-10 cm, mais très réduits dans la semelle de labour (20-30 cm). Par contre, dans les sols non labourés, la porosité et les tailles des pores sont plus homogènement répartis dans tout l'horizon (0-45 cm).

Certains facteurs favorisent la structure du sol, d'autres la régénèrent. Un travail du sol excessif diminue la stabilité de la structure, de même qu'une hydratation trop brutale des agrégats, suivie d'une dessiccation rapide. Certains éléments interviennent sur la stabilité structurale et ont des interactions positives comme par exemple le calcium, l'humus et le fer (Oades, 1984 ; Amézketa, 1999). La destruction de la structure ou la désagrégation se produisent par une perte de porosité, de perméabilité, par une prise en masse, un état de dispersion, et par la formation d'une croûte de battance à la surface du sol.

5.1.1.4.3. Conclusion sur l'infiltrabilité

Le test d'infiltration au monocylindre nous a permis d'identifier le comportement hydrodynamique des sols marneux et de mettre en évidence des comportements influencés par le mode de gestion de ces sols ainsi que leur position topographique.

Les sols marneux se caractérisent par une structure stable et une infiltration très variable dans le temps et dans l'espace. Les mesures d'infiltration effectuées sur ces sols ont révélé une liaison

étroite entre les dynamiques hydriques et structurales. Lorsque ces sols sont desséchés, la macroporosité fissurale est responsable de l'infiltration très élevée. L'eau de pluie s'engouffre dans les fentes qui constituent les voies préférentielles d'écoulement.

Les résultats obtenus ont bien montré l'influence de l'humidité préalable du sol sur le comportement hydrodynamique. L'infiltration varie de 120 à 965 mm/h pour les sols cultivés en céréaliculture, assez secs et en allant du haut vers le bas du versant et de 48 à 62650 mm/h pour les sols secs, tassés et fortement déstructurés.

Malgré leur bonne stabilité structurale, les sols marneux restent très sensibles à l'érosion du fait de leur comportement hydrodynamique particulier. Ils sont affectés d'alternances d'humectation et de dessiccation (déterminées par les conditions météorologiques) entraînant une microfissuration des agrégats. Lorsque ces sols sont fissurés, l'infiltration est très élevée et une érosion interne peut être engendrée. Ces infiltrations peuvent même favoriser des mouvements de masse. A l'état plus ou moins saturé, l'infiltration devient très faible, ce qui déclenche facilement le ruissellement, et lorsque l'infiltration est importante, des mouvements de masse peuvent être déclenchés sur les zones de fortes pentes.

Le piétinement du bétail et le surpâturage modifiant la structure du sol (fermeture des pores, tassement, etc.) réduisent l'infiltration de l'eau dans le sol et rendent plus aisé le ruissellement (Mazour, 2004).

Cette étude a permis de contribuer à la compréhension du comportement hydrodynamique des sols marneux de la zone d'étude selon le mode de gestion des terres au printemps.

5.1.1.5. Etude des états de surface

5.1.1.5.1. Introduction

Parmi les divers paramètres explicatifs des caractéristiques hydrodynamiques des sols, les états de surface (EDS) tiennent une place importante qu'il n'est plus besoin de démontrer. Ils sont composés d'un ensemble de descripteurs caractérisant le microrelief de la surface, son état structural, son état hydrique et son couvert végétal. Les (EDS) occupent une place d'interface entre la sphère climatique, la sphère pédologique et la sphère anthropique. Leur évolution est donc conditionnée par ces trois paramètres très complexes.

Par ailleurs, la conduite des systèmes de culture détermine une succession dans le temps de perturbations de l'état de surface, par fragmentation sous l'effet du travail du sol, par compactage par les engins agricoles et par dégradation structurale sous pluies (battance).

Appréhender les variations des EDS grâce à quelques descripteurs permet alors un regard transversal et complet sur le milieu environnant. Dans notre cas, l'évolution des EDS est notamment conditionnée par les épisodes pluvieux. Elle se manifeste par le passage d'un état initial (le semis) poreux, meuble et motteux à un état dégradé, beaucoup plus lisse et fermé (Auzet, 2000).

Le suivi des (EDS) s'avère fondamental pour la compréhension des processus de ruissellement et d'érosion (Casenave et Valentin, 1989). L'étude de l'érosion hydrique nécessite non seulement la prise en considération des facteurs physiques et anthropiques, mais aussi l'étude des états de

surfaces du sol et leur impact sur l'écoulement et l'infiltration. En d'autres termes, pour étudier l'érosion, il faut mettre en relation les propriétés climatiques de la région, les propriétés physico-chimiques du sol, le type du couvert végétal, le mode d'exploitation du sol ainsi que ses états de surfaces. C'est-à-dire qu'il faut adopter une vision globale du phénomène de l'érosion qui ne se limite pas à le considérer comme un simple effet des facteurs physiques ou anthropiques. C'est dans cette perspective que s'intègre cette épreuve. On tente d'évaluer les risques de l'érosion en se basant sur l'étude de l'état de surface du sol et son impact sur le ruissellement, l'infiltration et les pertes en terre.

Rappelons que les relevés de descriptions des états de surfaces des sols ont été faits suivant la méthode des points quadrats.

5.1.1.5.2. Matériel et méthode

Les sites choisis pour faire la description des états de surfaces du sol correspondent aux deux sites expérimentaux à savoir site1: versant cultivé en céréaliculture et site 2: versant à sol nu, tassé et dégradé.

Le matériel de travail comporte, en plus des sites expérimentaux, deux cadres en bois (voir Figure 31) et une tige métallique ou (une aiguille à tricoter).

-Le premier cadre est de 1m^2 , muni d'un quadrillage qui comporte 100 grilles de 10 cm^2 . Les observations sont faites sur 110 points d'intersection. Ainsi, les données sont directement fournies en %.

-Le deuxième cadre est un support. Il sert à maintenir le premier à l'horizontale de la parcelle sans toucher le couvert végétal ou le sol. Dans le cas où la hauteur du premier cadre est inférieure à celle de la végétation, celle-ci va être écrasée et s'étaler sur une superficie supérieure à la réalité.

-La tige métallique doit être bien droite et bien pointue pour faciliter les relevés.



Photo 15. Méthode des points quadrats ; un test simple et facilement applicable sur terrain (Boughalem., 2007)

Les relevés des états de surfaces ont été réalisés le 03 Mai 2015 sur les deux sites à raison de trois mesures par site: en haut, au milieu et en bas du versant.

Le choix de cette date a été fait sur la base des contraintes du temps, mais nous pouvons tout de même faire une évaluation intéressante qui peut nous renseigner sur l'état hydrique, fissuration, l'état du sol (travaillé ou non), couvert ou nu, etc.

C'est un facteur important pour prévoir les risques des ruissellements et de l'érosion.

Ces observations d'EDS sont à analyser et interpréter avec les mesures de l'infiltration.

La méthode consiste à décrire les états de surface des parcelles expérimentales comme suit: Poser le cadre en bois, muni du quadrillage, à 5 cm du sol, et laisser descendre (systématiquement, sans viser) une aiguille à tricoter ou un crayon aux points d'intersection correspondant au cadre de mesure.

Au point d'impact avec le sol, compter les points suivants :

-le % des surfaces couvertes au ras du sol (CV % = adventices + litière + cailloux) ;

-le % des surfaces ouvertes (SO%= agrégats + fissures + trous faune) :

-ou fermées (SF% = pellicule, croûtes, zones tassées et cailloux inclus dans la masse du sol) (Roose, 1996).

On prélève donc l'absence ou la présence de chaque élément. Ainsi, les données sont directement fournies en %.

La somme des surfaces couvertes et nues égale 100%. De même, la somme des surfaces fermées et ouvertes égale 100 %.

Avantages et limites

C'est une méthode rapide adaptable à toutes les situations et ne nécessitant pas une grande technicité. Toutefois, cette méthode présente de multiples inconvénients. Elle est basée sur le hasard car seules les composantes effectivement touchées par la tige sont prises en considération.

5.1.1.5.3. Résultats et discussion

Les résultats montrent que les composantes de l'état de surface du sol de chaque parcelle évoluent d'un relevé à l'autre. Les composantes les plus dynamiques sont le couvert végétal et le sol qui varient en sens inverse (Tableau7).

Tableau 7. Evaluation des états de surface sur le versant cultivé: site 1 à Ain El Alem

Dates	Parcelles	Etats de surfaces						
		Cailloux (%)	Litière (%)	Adventices et cultures (%)	Surface couverte (%)	Sol nu (%)	Surface ouverte (%)	Surface fermée
02/Mai/2015 Site 1	T1	10	11	51	72	28	64	36
	T2	9	9	62	80	20	67	33
	T3	7	10	73	90	10	49	51

Tableau 8. Evaluation des états de surface sur le sol nu: site 2 à Ain Tolba

Dates	Parcelles	Etats de surfaces						
		Cailloux (%)	Litière (%)	Adventices (%)	Surface couverte (%)	Sol nu (%)	Surface ouverte (%)	Surface fermée
05/Mai/2015 Site 2	F1	7	10	19	36	64	8	91
	F2	9	14	14	37	63	5	91
	F3	8	12	12	32	68	6	94

Les surfaces fermées vont produire rapidement de l'eau libre à la surface du sol. Pour que celle-ci ruisselle, il faut encore qu'elle évite les pièges des surfaces ouvertes c'est-à-dire zones motteuses très perméables, fissures profondes, galeries des termites et des vers de terre.

La couverture du sol, en interceptant l'énergie des gouttes de pluies (canopée et litières) et l'énergie des eaux ruisselantes (litières, adventices et végétations basses) peut avoir une influence considérable sur l'érosion et dans une moindre mesure, sur le ruissellement (Roose, 1995).

Les sols cultivés, marneux présentent la plus forte proportion de surfaces ouvertes (49 - 67%), pour cette période, le sol étant sec (début Mai) la plus faible proportion (5%), sur les sols nu tassé au printemps. Ceci est dû au phénomène du retrait- gonflement caractéristique du domaine marneux.

En fin, l'étude de la porosité d'un sol marneux nécessite l'analyse des phénomènes de gonflement et de retrait, responsables d'une variation importante de l'espace poral au cours des cycles d'humectation et de dessiccation. On sait que ces phénomènes sont étroitement liés à la nature minéralogique de l'argile, à la charge du feuillet, mais également aux contraintes subies par le matériau au cours de son histoire hydrique et/ou mécanique (Tessier, 1984; Azzaoui, 1988).

On constate d'une manière générale que sous les mêmes conditions climatiques, les parcelles étudiées présentent des réactions différentes dues à la différence de leurs états de surfaces.

Les zones sur versant nu (F1, F2 et F3) sont les parcelles les plus anthropisées. Le parcours ameublait la terre et détruit la végétation spontanée. Il réduit la teneur en matière organique des horizons superficiels des sols, leur stabilité structurale et leur capacité d'infiltration. Cela explique la faible densité du couvert végétal (12- 19%) lors du notre relevé de Mai. Ce taux peut augmenter et atteindre des valeurs assez élevées après les pluies d'hiver.

Cela signifie que ces versants ne bénéficient pas d'une protection durant toute l'année. Cette variation saisonnière du taux du recouvrement engendre une variation saisonnière de l'érosion, d'autant plus que la période des labours coïncide avec la période des grandes pluies. Les labours entraînent sur ces parcelles une augmentation des risques de ruissellement et, sur les parcelles situées en haut de pentes (F1 et F2) des risques de ravinement.

Les zones cultivées T1, T2 et T3 bénéficient du taux de recouvrement les plus élevés (72- 90%). On constate que le pourcentage de sol nu diminue au bénéfice du couvert végétal et parallèlement, celui des surfaces fermées diminue progressivement.

Par ailleurs, la végétation joue un rôle de protection, garantie essentielle et constante contre le détachement des particules dû à l'énergie cinétique des gouttes de la pluie. Cela signifie que les fractions des gouttes des pluies interceptées ou amorties sont très importantes.

Les résultats mettent en évidence l'importance du couvert végétal contre l'érosion et le ruissellement et nous permettent les remarques suivantes:

- Les observations de surface ont révélé la résistance à la dégradation;

- On n'observe que très rarement la formation de croûtes sédimentaires, témoin de la formation du ruissellement.

Il est généralement admis que les cultures, en augmentant la résistance à l'arrachement par la pluie et le ruissellement, diminuent les transferts de matières solides à l'échelle des parcelles. La couverture du sol par les végétaux, morts ou vivants, retarde l'apparition de la croûte de battance dans la mesure où, en interceptant les gouttes d'eau, elle réduit leur énergie cinétique et par conséquent leur pouvoir dégradant. De même, les résidus de récolte créent une rugosité pérenne qui barre la propagation du ruissellement et favorise l'infiltration de l'eau dans le sol (Gascuel-Odoux et Heddadj, 1995).

Une bonne stabilité structurale réduit la battance et donc les pertes par ruissellement. Dans l'expérimentation installée en 1987, le sol sous semis direct montre une amélioration de la stabilité structurale à l'eau en comparaison avec le labour conventionnel au pulvérisateur à disques dans les trois couches, et ceci après une période de 11 ans (Mrabet et al., 2001; Saber et Mrabet, 2002).

Cette amélioration est due à une augmentation de 136 % de la matière organique sous semis direct alors que sous le labour conventionnel, la séquestration du carbone était négligeable (Mrabet et al., 2001). Monnier et al. (1976) ont trouvé qu'entre 1970 et 1974 sur un sol limono-argileux, la stabilité structurale a augmenté considérablement surtout à la surface du sol dans le cas du semis direct. Dans les Rougiers de Camarès (sud de France), Barthès et al. (1998, 1999) ont trouvé une corrélation significative positive entre la macroagrégation et la teneur en matière organique de la couche 0-10 cm d'un sol limono-argilo-sableux.

Sur la parcelle T3 (labourée, orientée sud et située en bas de pente), on a enregistré une infiltration de 965 mm/h correspondant à un taux de recouvrement de 90%. En même temps, en F3, sur sol nu (68%), l'infiltration a oscillé entre 129 et 626 mm/h.

La protection, garantie essentiellement par le couvert végétal, n'a pas reflété parfois une meilleure infiltrabilité (129 mm/h). Ceci signifie que les zones couvertes par la végétation ne doivent pas être qualifiées systématiquement d'infiltrantes.

Les résultats montrent que l'infiltration est plus élevée sur les parcelles présentant les taux de recouvrement les plus élevés. Ces résultats sont en concordance avec ceux trouvés par Morsli, 1997. et ceux trouvés dans les parcours du moyen Atlas (Sabir et al., 1994).

Inversement, nos résultats ne mettent pas en évidence de relation nette de l'infiltration avec la couverture végétale du sol, contrairement à ce qui est signalé par plusieurs auteurs (Alkarkouriet al., 2000; Sabir et al., 2004).

5.1.1.5.4. Conclusion

Le ruissellement et l'infiltration sont fortement corrélés à la pluie en début d'averse, ce sont les états de surface par la suite qui conditionnent en grande partie le ruissellement et par conséquent les pertes en terre.

L'étude des états de surfaces et de l'infiltration avec les facteurs qui les commandent, ont permis en partie d'expliquer la sensibilité des sols à l'érosion dans la région de Ain Témouchent.

Ces méthodes peuvent nous aider à poser un diagnostic sur l'origine du ruissellement, donc de l'érosion en rigoles et ravines.

La sensibilité des sols dépend beaucoup de ces caractéristiques, mais reste dépendante encore plus des conditions climatiques, topographiques et culturelles.

Si ces paramètres nous ont permis d'expliquer dans une certaine mesure la résistance des sols à l'érosion, il y a cependant toute l'importance des facteurs de sollicitation de la dégradation des sols (agressivité climatique, intensité des pluies, leur fréquence les pentes, les modes d'utilisation des terres, etc.).

6. Conclusion générale

Le potentiel de l'érosion au niveau de la région de Ain Témouchent représentée par deux sites d'observation et de mesure, est assez important. Les deux sites sont loin d'être représentatif de l'ensemble de la complexité du phénomène de l'érosion et de la dégradation des sol au niveau de la région. Toutefois par ce premier travail sur la question dans la région, nous avons voulu fournir les premiers résultats sur les processus et l'ampleur de l'érosion. Les facteurs de risque de l'érosion sont connus (pluie, fragilité des sols, facteurs anthropiques, modes de gestion des terres, etc.), mais leur évaluation reste à faire et à analyser.

Les processus érosifs sont exacerbés par l'agressivité du climat, la régression du couvert végétal, la faible résistance des terrains marneux, aux fortes pentes et surtout aux modes de gestion des terres.

Cette situation limite l'infiltration des pluies et accentue le ruissellement, ce qui occasionne souvent des écoulements importants et rapides qui se déversent des versants, accentuant ainsi, la dynamique érosive et le phénomène d'inondation.

La détermination relative de la capacité d'infiltration des sols en fonction de différentes situations en zone cultivée et en zone de sol nu et dégradé ainsi que l'évaluation des états de surface au niveau des sites expérimentaux 1 et 2 constitue pour nous des éléments de première importance pour faire un diagnostic préliminaire de l'état de dégradation des sols et de la dynamique de l'eau dans le sol.

Il en ressort de l'analyse des résultats obtenus que les sols cultivés sont relativement mieux protégés que les sols nus (90% du sol couverte), mais il n'y a pas que les cultures qui protègent le sol; la pierrosité, la litière et autres débris végétaux peuvent jouer un rôle intéressant. L'infiltration est ainsi améliorée d'une manière significative (jusqu'à 965 mm/h).

Par contre, les sols nus tassés et dégradés (structure superficielle détruite) infiltrent peu (48 à 623%). Ceci favorisent beaucoup les ruissellements à l'origine d'un départ de sédiments assez important. Il s'ensuit une érosion accélérée qui provoque différentes formes d'érosion et une dégradation des sols dangereuse.

Les états de surface sont bien plus favorables en zone cultivée; le phénomène de croûte de battance qui bloque la pénétration de l'eau et de l'air dans le sol est beaucoup moins présent; la première barrière à l'infiltration de l'eau est levée. L'amélioration des états de surface et de la porosité du sol se traduisent par une plus grande quantité d'eau dans les horizons explorés par les racines.

Il y a alors nécessité de mettre en place une véritable stratégie de conservation, gestion et de lutte contre l'érosion des sols. En général, l'érosion hydrique représente l'élément moteur qui guide l'évolution géomorphologique des versants. Favorisé par une lithologie tendre, des pentes fortes, un couvert végétal dégradé, le processus de l'érosion se multiplie rapidement rongéant directement dans le soubassement rocheux après l'attaque des formations superficielles.

Cette agressivité érosive des processus génère d'importantes quantités de sédiments qui, une fois prises en charge par les oueds et leurs affluents, vont participer d'une manière active à l'envasement des réservoirs d'eau, diminuant ainsi leurs capacités initiales. Le développement de l'érosion dans cette région de Ain Témouchent, n'est donc pas une fatalité naturelle; elle est la manifestation d'une rupture d'équilibre favorisé par les conditions du milieu et l'action humaine.

Il y a quelques aménagements à proposer parmi un listing des aménagements assez long. Il faut nécessairement choisir les mieux adaptés au terrain, les plus efficaces et peut être aussi les moins coûteux. Il faut intégrer le plus possible les aménagements traditionnels et accorder une importance particulière aux traitements biologiques.

Il est évident que le traitement du ravinement peut faire appel à certains ouvrages mécaniques qui exigent une technicité assez élevée, mais les traitements au niveau des versants cultivés sont eux aussi à faire avec le plus grand soin notamment le choix des techniques culturales appropriées, des systèmes de gestion des terres et des assolements bien choisis.

- **Aménagement des ravines**

Vu la nature marneuse des terrains de la région, les types d'ouvrages préconisés pour l'aménagement hydraulique des ravins sont des seuils en terre. Ils pourraient permettre une bonne stabilisation des ravines en terrain marneux et une bonne reprise de la végétation si seulement leur dimensionnement et leur réalisation se font correctement.

- **Plantations fruitières**

Comme l'arboriculture rustique répond positivement aux vœux de la population riveraine et joue un rôle efficace contre la dégradation des sols tout en apportant un revenu à la population locale, certains versants ont été choisis pour la plantation de l'*Olivier*, l'*Amandier* et le *Figuier*.

- **Amélioration des systèmes de production**

Actuellement, en Algérie où les terres font l'objet de modifications majeures d'usage des sols et de reconversion, les grands projets nationaux de développement rural s'appuient sur la logique de la GCES, celle du développement rural avec la participation des communautés rurales (Roose, 2004) : les plantations arboricoles, l'amélioration des techniques culturales et de la gestion de l'eau, et même l'agroforesterie et les parcours réglementés sont les actions les plus à développer. L'efficacité des techniques culturales est strictement liée aux conditions économiques des sociétés (Roose, 1994).

BIBLIOGRAPHIE

Arabi et Roose, 1989 ; Roose, 1994 ; Roose et al, 1993 Influence de quatre systèmes de production en région méditerranéenne de moyenne montagne algérienne. *Bull. Réseau Erosion*, ORSTOM, Montpellier 9: 39-51 –

Boli Z., Bep A. et Roose E. 1991. Enquête sur l'érosion en région cotonnière du Nord Cameroun. *Bull. Réseau Erosion* 11 : 127- 138.

Bolline A. 1982. *Etude et prévision de l'érosion des sols limoneux cultivés en moyenne Belgique*. Thèse Dr Géographie Univ. Liège, 356 p.

Critchley W., Reij C. et Seznec A. 1992 .Water harvesting for plant production. Part II. Case studies and conclusions for Sub-Sahara Africa. *World Bank Techn. Paper*, 120 p.

De Noni G., Viennot M. et Trujillo G. 1989-90. Mesures de l'érosion dans les Andes de Equateur. *Cah. ORSTOM Pédol.* 25 (1 -2): 183 - 196. Paris.

Delwaulle J.C. 1973. Résultats de six années d'observations sur l'érosion au Niger. *Bois et Forêts des Tropiques* 150: 15-37.

Dregne H. E. 1988. *Erosion, Productivity and Sustainable Agriculture*. Int. Center for Arid and Semiarid land studies, Texas Techn. Univ. Lubbock, Texas, 11 p.

Ellison W.D. 1944. Studies of raindrop erosion. *Agric. Eng.* 25: 13 1-181.

Fauck R. 1956. *Erosion et mécanisation agricole*. Bureau des sols en Afrique occidentale, 24 p.

Ferry O. 1987. *Conservation des sols et participation paysanne en Commune de Kinyami: Rwanda*. AFUP, France. 1 p.

Fournier F. 1967. La recherche en érosion et conservation des sols sur le continent africain. *Sols Africains* 12(1): 5-53.

Hénin S. et Monnier G. 1956. *Evaluation de la stabilité structurale du sol*. CRAISS, Paris, volume B: 49-52.

Heusch B. 1970. L'érosion du Pré-Rif. Une étude quantitative de l'érosion hydrique dans les collines marneuses du Pré-Rif occidental. *Annale Rech. Forestière du Maroc*, tome 12, 176 p.

Heusch B. 1986. Cinquante ans de banquettes de DRS en Afrique du Nord: un bilan. *Cah. ORSTOM Pédol.* 22(2): 153-162.).

Hudson N.W. 1973. *Soil Conservation*, Batsford, London

- Hudson N.W. 1990. Conservation des sols et des eaux dans les zones semi-arides. *FAO Bulletin pédologique* n° 57, Rome, 182 p. version française adaptée par Roose.
- Hudson N.W. 1991. A study of the reasons for success or failure of soil conservation projects. *FAO Soils Bulletin* 64, Rome, 65 p.
- Kang B.T., Wilson G.F. et Lawson T.L. 1984. *Alley cropping: a stable alternative to shifting cultivation*. IITA, Ibadan, 22 p.
- Lilin Ch. 1986. Histoire de la restauration des terrains en montagne. *Cah. ORSTOM Pédol.* 22(2): 139-146..
- Lilin Ch. et Koohafkan P. 1987. *Techniques biologiques de conservation des sols en Haïti*. FAO, Rome, 36 p.
- Lovejoy J.B. et Napier T. 1986. Conserving soil: sociological insights. *J. Soil and Water Conservation* 41(5): 304-310.).
- Lowdermilk W.C. 1953. Conquest of the land through 7 000 years. *Agriculture Information Bull.* 99. USDA, SCS.. On constate que les méthodes traditionnelles sont strictement liées aux conditions socio-économiques.
- Marchal, 1979 ; Lefay O. 1986. Etude de l'efficacité des travaux de DRS en Algérie. *Rapport de stage CNEARC-ORSTOM-INRF*, Montpellier. 50 p. + ann. ; Reijet *al.*, 1986)
- Mazour M., 2004. Etude des facteurs de risque de ruissellement et de l'érosion en nappe et conservation de l'eau et du sol dans le bassin versant de l'Isser Tlemcen. Thèse de Doctorat d'état, Université de Tlemcen; 184; 131 p.
- Mazour M., Roose E., 2002. Influence de la couverture végétale sur le ruissellement et l'érosion des sols sur parcelles d'érosion dans les bassins versants du Nord-ouest de l'Algérie. *Bull Réseau Erosion* 2002; 21: 320- 330.
- McCalla T.M. 1944. Waterdrop method of determining stability of soil structure. *Soil Sci.* 58: 117-123.
- Moeyersons J. 1989. Les glissements de terrain au Rwanda occidental: leurs causes et les possibilités de leur prévention. *Cah. ORSTOM Pédol.* 25(1): 131 - 150.
- Monjauze A. 1962. *Rénovation rurale: rôle et dispositifs d'infiltration*. Délégation Générale, Dept. Forêts, Service DRS, Alger, 16 p.; Greco, 1979 Gréco J. 1979. *La défense des sols contre l'érosion*. La Maison Rustique, Paris, 183 p.).
- Mura R. 1990. *La correction torrentielle*. Cemagref, Grenoble, 9 p.

- Ndayizigiyé F. 1992. Valorisation des haies arbustives *Calliandra et Leucaena* dans la lutte contre l'érosion en zone de montagne Rwanda. *Bull. Réseau Erosion* 12: 120-129
- Nyamulinda V. 1989. méthodes autochtones de conservation des sols en Préfecture de Ruhengeri. *Bull. Agric. Rwanda* 3: 147-158.
- Pathak P., Miranda S. et El-Swaïfy S.A. 1985. Improved rainfed farming or semi-arid tropics: implications for soil and water conservation. In: *Soil Erosion and Conservation*. El-Swaïfy, Moldenhauer et Lo (eds.). S.W.C. Soc. of America. pp. 338-354.
- Pieri C. 1989. Fertilité des terres de savane. Bilan de 30 ans de recherche et de développement agricole au Sud du Sahara. Min. Coop. et Dév., CIRAD Paris, 444 p..
- Plantié L. 1961. *Technique franco-algérienne des banquettes de DRS*. Délégation Générale, Dept. Forêts, Service DRS d'Oran, 22 p. ;
- Poesen J. 1989. Conditions for gully formation in the Belgian loam belt and some ways to control them. *SoilTechnology* 1: 39-52.
- Putod R. 1956. La protection des vignes contre l'érosion. *Revue Agronomie d'Afrique du Nord* 1992: 567-576. ;
- Revel J.C. Coste N., Cavalié J. et Costes J.L. 1989. Premiers résultats expérimentaux sur l'entraînement mécanique des terres par le travail du sol dans le Terrefort toulousain France. *Cah. ORSTOM Pédol.* 25(1): 111-118.
- Roose E. 1967. Dix années de mesure de l'érosion et du ruissellement au Sénégal. *Agon. Trop.* 22(2): 123-152.
- Roose E. 1973. *Dix-sept années de mesure expérimentale de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire*. ORSTOM Abidjan, 125 p. Thèse Doc. Ing. Fac. Sci. Abidjan, n° 20.
- Roose E. 1975. Natural mulch or chemical conditioner for reducing soil erosion in humid tropical areas. In: *SoilConditioners*. SSSA Spécial publication 7(12): 131-137.
- Roose E. 1980. Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Etude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées. Thèse Doct. ès Sciences, Université d'Orléans, 587 p. In: *Travaux et Documents de l'ORSTOM*, Paris, n° 130, 569 p.
- Roose E. 1987. Gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols dans les paysages soudano sahéliens d'Afrique occidentale. C.R. Séminaire ICRISAT/INRAN, Niamey, Niger, p. 57-72.).

Roose E. 1990. Diversité des stratégies traditionnelles et modernes de conservation de l'eau et des sols en milieu soudano-sahélien d'Afrique occidentale. In: *Aridité, contrainte au développement*. ORSTOM Paris, Collection Didactique, pp 481-506.

Roose E. 1991. Conservation des sols en zones méditerranéennes. Synthèse et proposition d'une nouvelle stratégie de LAE: la GCES. *Cah. ORSTOM Pédol.* 26(2): 145-181.

Roose E. 1992. Capacité des jachères à restaurer la fertilité des sols pauvres en zone soudano-sahélienne d'Afrique occidentale. *C. Rendu Séminaire sur la Jachère*, ORSTOM, Montpellier.

Roose E. et Bertrand R. 1971. Contribution à l'étude de la méthode des bandes d'arrêt pour lutter contre l'érosion hydrique en Afrique de l'Ouest. Résultats expérimentaux et observations sur le terrain. *Agron. Trop.* 26(11): 1270-1283.

Roose E. et Cavalié J. 1986. New strategy of water management and soil conservation. In: *Proceedings ISCO 5 Bangkok*. Rimwanich (ed.). pp. 913-924.

Roose E. et Masson F. X. 1983 .Consequence of heavy mechanization and new rotation on runoff loessial soil degradation in north France. In: *Soil Erosion and Conservation*. El Swaify, Moldenhaueret Lo (eds.). pp. 24-33.

Roose E. etPiot J. 1984.Runoff, erosion and soil fertility restoration on the Mossi Plateau Central Burkina Faso, Symposium Harare, Zimbabwe, *AISH Publication* n° 144: 485-498.

Roose E., Dugue P. et Rodriguez L. 1992. La GCES: une nouvelle stratégie de lutte antiérosive appliquée à l'aménagement de terrasses en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso. *Bois et Forêts des Tropiques*, n° 233.

Roose E., Ndayizigiye F. et Sekayange L. 1992. La GCES: une nouvelle stratégie pour l'intensification de la production et la restauration de l'environnement rural sur les collines

Roose, 1992, Dugue P. et Rodriguez L. 1992. La GCES: une nouvelle stratégie de lutte antiérosive appliquée à l'aménagement de terrasses en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso. *Bois et Forêts des Tropiques*, n° 233.

Roose, E. 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bulletin Pédologique FAO, Rome, N°70, 420 pages

Roose, E., Arabi, M., Brahamia, K., Chebbani, R., Mazour, M.&Morsli, B. 1993a. Erosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, Vol. XXVIII, N°2, 1993 :289-308.

Saccardy L. 1950. Note sur le calcul des banquettes de restauration des sols. *Terres et eaux, Alger* 11: 3-19.

Séguy L., Bouzinac S., Pacheco A. et Kluthcouski J. 1989. *Des modes de gestion mécanisée des sols et des cultures aux techniques de gestion en semis direct, sans travail du sol, appliquées aux cerrados du Centre Ouest brésilien*. Doc. IRAT, Montpellier. 185 p.

Stocking M. 1978. A dilemma for soil conservation. *AREA* 10: 306-308.

Stocking, 1978; Mannering, 1981 Mannering J.V. 1981. The use of soil loss tolerance as a strategy for soil conservation. In: *ISCO 2*, Morgan (ed.), Wiley: p. 337-350.

Temple P. et Rapp A. 1972. Landslides in the MGETA area, Western Ulugurumountains, Tanzania. Geomorphological effects of Suddan heavy rainfall. In: *Studies of Soil Erosion and Sedimentation in Tanzania*. Rapp, Berry et Temple (eds.). Geografiska Annales 54(3-4): 157-194.

Tondeur G. 1950. *Erosion, spécialement au Congo belge*. Publication Ministère des Colonnes, Bruxelles, 3e édit., 240 p.

Valentin C. 1981. *Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de régions subdésertiques Agadès: Niger*. Thèse 3e cycle, Paris 7, ORSTOM, Paris, série Etudes et Thèses, édit. 1985, 259 p.

Wassmer P. 1981. *Recherches géomorphologiques au Rwanda. Etude de l'érosion dans la préfecture de Kibuye*. Thèse 3e cycle Univ. Strasbourg, 156 p.

Williams J.R. 1975. Sediment yield prediction with USLE using runoff energy factor. In: *ARS-S-40*. Agr. Res. Serv., USDA. Washington DC. pp. 244-252.

Wischmeier W. H. et Smith D. 1978. Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning. *Agriculture Handbook* N° 537, Washington DC. 58 p.

Wischmeier W.H. 1966. Surface runoff in relation to physical and management factors. *Proc. 1st Pan Am. Soil Cons. Congress Sao Paolo, Brazil*. pp. 237-244.

Wischmeier W.H. et Smith D.D. 1960. A universal soil-loss estimating equation to guide conservation farm planning. *7th Congrès AISS I*: 418-425.

Wischmeier W.H., Johnson C.B. et Cross B.V. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *J. Soil and Water Cons.* 26(5): 189-192.

Wischmeier W.H., Smith D.D. et Uhland D.R. 1958. Evaluation of factors in the soil loss equation. *Agric. Eng.*, 39: 458-462, 474.

Zingg A.W. 1940. Degree and length of land slope as it affects soil loss and runoff. *Agric. Eng.* 21: 59-64.