

L'érosion hydrique : méthodes et études de cas dans le Nord de la France

Lionel Mabit, Marc R. Laverdière, Claude Bernard

L'intensification des productions a largement contribué au dynamisme du secteur agricole. Cependant, elle a conduit à l'accélération de la dégradation des ressources en eau et en sol. La dégradation des terres arables, témoin de la fragilité des ressources naturelles, affecte de nombreuses régions du globe terrestre, y compris dans les pays développés et plus particulièrement dans les plaines tempérées océaniques et continentales, où l'érosion hydrique constitue le phénomène le plus fréquent. Le sol à bon potentiel agricole est une ressource limitée puisqu'il ne représente que 8 % du globe terrestre et 22 % des terres émergées. Il est d'autant plus fragile qu'il met longtemps à se reconstituer. En moyenne, un sol se forme à raison de quelques centièmes de millimètres par an, dans des conditions de maintien de biomasse optimale. Il n'est donc pas renouvelable à court et à moyen terme sans intervention anthropique coûteuse (complément d'éléments nutritifs et de matière organique, par exemple). En revanche, sa dégradation peut être très rapide. Les taux d'érosion spécifique prévus dès 1960 par Fournier [1] corres-

pondent à des taux de dénudation de plusieurs millimètres de terres arables par an. La morphogénèse des zones tempérées est actuellement ralentie : sols épais, conditions climatiques clémentes. Elles sont considérées, au sens strict, comme d'une grande « stabilité » au sens où Tricart, en 1978 [2], a défini des milieux stables comme « ceux où les modifications de la topographie superficielle sont suffisamment faibles et lentes pour ne pas constituer une contrainte appréciable pour leur fonctionnement ». Toutefois, elles sont soumises à une érosion plus insidieuse que spectaculaire.

Le passage d'une agriculture traditionnelle à une agriculture intensive et spécialisée a certes favorisé la productivité des systèmes, mais la pression de l'impact agricole s'est aussi accrue sur les ressources en sol. Ainsi, ces dernières décennies, celles-ci ont subi une dégradation quantitative et qualitative. Force est de constater que la modification des systèmes de culture a généralement exacerbé les dynamiques érosives. En Europe de l'Ouest où les mutations agraires ont été particulièrement marquées, 25 millions d'hectares de terres arables sont touchés ou fortement menacés par l'érosion hydrique [3]. Si, contrairement aux grandes plaines nord-américaines, l'érosion éolienne en Europe de l'Ouest apparaît comme un phénomène mineur n'affectant que les régions littorales, en revanche, l'emprise spatiale et l'ampleur de l'érosion hydrique sont nettement plus conséquentes. L'érosion hydrique touche les terres de grandes cultures : les plaines limoneuses du Nord de l'Europe (partie septentrionale du Bassin parisien, les plaines loessiques belges, allemandes, polonaises, jusqu'à l'Ukraine), le Sud-Est de

l'Angleterre, mais également la plaine sableuse baltique (le Nord de l'Allemagne et une partie du Danemark). Au début des années 90, le coût annuel de l'érosion en Europe a été estimé à 10 milliards de francs, sans compter la valeur propre du sol qu'il est impossible de chiffrer [3]. Il faut relativiser ce chiffre qui dépend en grande partie des conditions météorologiques de l'année en cours.

En France, la dégradation des sols a été initialement étudiée dans les régions accidentées et/ou cultivées du Sud, du Sud-Est et du Sud-Ouest, soumises à des conditions morphoclimatiques plus ou moins méditerranéennes, propices aux manifestations de l'érosion hydrique [4]. Pour faire face aux problèmes directs et indirects liés aux pertes de terre, des stratégies modernes d'équipement rural ont été précocement mises en place dans les secteurs sensibles : RTM (restauration des terrains de montagne) (Alpes et Pyrénées, 1850-1900) et DRS (défense et restauration des sols autour du bassin méditerranéen, 1940-1980).

Depuis quelques décennies, avec la modernisation de l'agriculture et la mise en valeur intensive par des systèmes culturaux érosifs, l'érosion s'est accrue en France [5, 6]. En 1990, l'érosion touchait 5 millions d'hectares en France [3]. La partie septentrionale du Bassin parisien n'est pas épargnée. L'introduction de cultures intensives et l'abandon des rotations avec des prairies temporaires ont accentué l'érosion hydrique dans les régions de grandes cultures du Nord de la France et augmenté les pertes de terres arables car les sols n'ont plus le temps de se reconstituer. Cette érosion a provoqué une baisse notable des taux de matière organique

Mabit, M.R. Laverdière : Département sols et de génie agroalimentaire, Université Laval, Sainte-Foy (Québec), Canada J1K 7P4. <lionel.mabit@sga.ulaval.ca>
Bernard : Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, rue Einstein, Sainte-Foy (Québec), J1A, G1P 3W8.

Part : L. Mabit

Discipline : Sciences des sols ; Agronomie.

ans les sols, et donc de leur fertilité, de 0,5 à 1,6 % en trente ans [7]. La question de la durabilité et de la viabilité des systèmes d'exploitation actuelle reste entière. La sensibilisation à la dégradation des terres agricoles en France a commencé dans les régions méditerranéennes et montagneuses [4]. Si on est loin de la situation alarmiste régnant aux États-Unis avec 120 millions d'hectares de terres dégradées dès 1930 [8], on estime tout de même à 2,7 millions d'hectares les superficies atteintes par ces maux au début des années 50.

Au regard de la faible agressivité érosive des pluies et des pentes modérées sur lesquelles sont généralement pratiquées les grandes cultures du Nord de la France, on aurait pu s'attendre à ce que les problèmes d'érosion y soient relativement peu importants [9, 10]. Dès les années 50, l'érosion touchant le Nord du Bassin parisien est soulignée [11, 12]. L'utilisation intensive des terres agricoles a renforcé l'intensité des phénomènes d'érosion dans le Sud, et les a progressivement mis en évidence dans le Nord de la France. Le développement de la grande culture au début des années 60-70, correspondant également aux réorganisations du parcellaire lors des remembrements, a souvent entraîné la recrudescence et l'accélération des phénomènes d'érosion [13].

Les changements intervenus dans les systèmes de production agricole liés en partie aux décisions politiques, comme la modification des rotations et des pratiques culturales, ont conduit à une multiplication des observations et des conséquences parfois catastrophiques de l'érosion hydrique des sols dans le Nord de la France (telles les inondations boueuses qui lui sont associées à l'aval des bassins versants agricoles) [6, 14, 15], ainsi que sur l'ensemble de la ceinture loessique du Nord-Ouest de l'Europe [16-20].

Cette nouvelle situation a provoqué une prise de conscience partielle du monde scientifique et des décideurs. Bien que les travaux de recherche portant sur l'érosion hydrique soient anciens et variés, des études récentes entreprises par des spécialistes du sol permettent de préciser ce type de dégradation dans le Nord de la France, région caractérisée par les grandes cultures (*encadré 1*). Après avoir décrit les formes que peut prendre l'érosion hydrique, cet article se propose de comparer et d'étudier de manière critique les différentes démarches permettant l'évaluation qualitative et quantitative de l'érosion hydrique dans cette région.

Processus, formes et conséquences agro-environnementales de l'érosion hydrique

Depuis la fin du Néolithique, tant au Proche-Orient qu'en Chine, les sociétés rurales et agro-pastorales ont notablement contribué à l'accélération de l'érosion. Cet impact anthropique peut se traduire par une rupture spatiale et temporelle des processus morphogéniques, se caractérisant par l'initiation ou l'accélération de ces processus. L'empreinte de l'homme affecte la dynamique des formes, à un rythme qui est celui de l'histoire [8].

L'érosion est un processus naturel exacerbé par les activités humaines (urbanisation, certaines activités agricoles). Son impact sur les sols agricoles est majeur. Elle réduit la couche arable, diminue sa teneur en matière organique et contribue à sa dégradation structurale. Ce phénomène est d'autant plus pernicieux qu'il n'est pas toujours facile à diagnostiquer, car les symptômes sont souvent masqués par les interventions agricoles répétitives, en particulier les labours. Il se décompose en un arrachement de matière (minérale et organique), un transport et un dépôt. L'écoulement et l'exportation des matériaux constitutifs du sol s'accompagnent aussi d'une pollution des eaux en aval des parcelles cultivées. Les agents de cette destruction peuvent être la pluie, le gel, le ruissellement, les mouvements de masse. Leur efficacité est conditionnée par la résistance du milieu (sol, couvert végétal, techniques culturales) et par la topographie [21, 22].

L'érosion des sols par l'eau, ou érosion hydrique, correspond au détachement et au transport des particules sous l'action combinée de la pluie et du ruissellement. Ce type d'érosion est attribué à plusieurs facteurs souvent associés : une mauvaise infiltration et un drainage insuffisant, dus à un sous-sol gelé, à une surface imperméabilisée et/ou au compactage du sol. Ces caractères peuvent être le résultat de caractéristiques naturelles ou de pratiques culturales. À ces différents facteurs, il faut ajouter le couvert végétal qui, lorsqu'il est faible ou nul, accentue les processus de dégradation des sols. Son action protectrice a été démontrée précocement tant par les travaux américains que par d'autres en Afrique et en Europe [23].

Le détachement mobilisant les fines parti-

cules de la surface du sol peut être assuré de deux manières [24]. La première correspond au rejaillissement des particules sous l'impact des gouttes de pluie (la battance des francophones encore appelée *splash* par les auteurs anglo-saxons). Dans ce cas, il s'opère sur toute la surface du sol exposée aux pluies. L'importance du flux de détachement est contrôlée essentiellement par l'énergie cinétique des gouttes de pluie, elle-même fortement corrélée à l'intensité pluviale, et variable en fonction du taux de couverture des cultures ou des résidus des cultures précédentes maintenus à la surface des sols [25]. Les caractéristiques du sol (granulométrie, taux de matière organique, état de surface et d'humidité avant la pluie) influencent aussi directement l'importance du *splash*. L'impact des gouttes de pluie brise les agrégats du sol en éléments plus fins qui progressivement entraînent la formation d'une croûte superficielle de quelques millimètres appelée aussi « croûte de battance » (*figure 1*). Cette croûte de battance entraîne une diminution notable de l'infiltration de l'eau dans le sol. Le sol n'étant plus en mesure d'absorber les pluies, l'excès d'eau s'accumule en surface (formation de flaques) puis ruisselle en transportant des particules de sol et de nutriments.

La deuxième forme de détachement est liée à la force tractrice des écoulements. En fonction de la capacité de transport du ruissellement apparaissent des incisions linéaires, plus ou moins espacées, que l'on appelle griffes, rigoles ou ravines, selon leur dimension, inhérentes aux irrégularités de la topographie et/ou induites par les activités agricoles. L'importance du flux de détachement est alors contrôlée à la fois par les caractéristiques des écoulements (vitesse, débit de pointe), par la résistance du sol à l'arrachement et la teneur en MES (matières en suspension) de l'eau de ruissellement.

On parlera de ruissellement diffus si les écoulements se font sous la forme de fins filets d'eau, ou de ruissellement concentré : les écoulements disposent d'une forte capacité de transport. Enfin, si l'écoulement s'effectue sous forme étalée, parcourant des pentes faibles, on parlera de ruissellement en nappe. Cette forme d'écoulement est fréquente sur les sols limoneux, lorsqu'il y a une perte de cohésion des sédiments limoneux saturés en eau par la convergence locale de l'eau hypodermique.

Le déclenchement du ruissellement superficiel pouvant générer les différentes formes d'érosion (*encadré 2*) provient généralement d'une faible infiltration

Grandes cultures et érosion

La dynamique induite par le contexte agro-industriel du Nord de la France a contribué à transformer progressivement l'agriculture diversifiée du début du siècle, pratiquée sur des exploitations de taille moyenne, en une agriculture aux grandes exploitations spécialisées. Les conditions climatiques et édaphiques de cette région ont constitué une véritable « manne » pour les grandes cultures : céréales (blé d'hiver) et cultures industrielles.

Le blé d'hiver, une culture parmi les moins érosives

La culture du blé d'hiver se caractérise par un semis précoce, s'échelonnant du 10 octobre au 11 novembre, et par un développement aérien nettement supérieur au développement racinaire. En prévision de bons rendements (70 à 80 q/ha), son semis est dense, environ 300 plants/m², soit près de 700 épis/m². Cela contribue de façon rapide à un recouvrement partiel du sol par cette culture. Mais, juste après le semis en hiver, celle-ci n'est pas assez couvrante pour protéger efficacement le sol contre une dégradation de sa structure sous l'impact des gouttes de pluies. De plus, les traces de roues, laissées par les divers engins agricoles réalisées dans les premières pluies après le semis imperméabilisent le sol et favorisent les écoulements concentrés. En revanche, cette culture protège efficacement le sol pendant cinq à six mois, de mars à août sachant que la réduction sensible de l'érosivité des pluies sur les sols est nettement observable à partir d'un couvert végétal supérieur à 30 %. Les principaux problèmes érosifs découlent des pratiques culturales associées à cette culture. En effet, le labour pratiqué en prévision du semis est profond d'environ une vingtaine de centimètres. Comme cette céréale affectionne les sols bien tassés et n'apprécie pas les terres soufflées à trop grands espaces lacunaires, les travaux superficiels du sol doivent l'émietter puis le tasser. Cette préparation contribue à diluer les matières organiques de la surface, et de compacter le sol en profondeur détruisant ainsi sa structure, ce qui a pour effet d'augmenter l'érodibilité et de favoriser la rapide saturation en eau de la couche de labour et donc le ruissellement aux dépens de l'infiltration. Ces travaux de préparation sur sols limoneux influencent aussi directement l'extension de la battance et donc l'importance du ruissellement. La faible rugosité du sol émietté et dégradé rapidement par effet *splash* limite aussi la capacité de stockage d'éventuels excès d'eau à la surface du sol et diminue aussi l'infiltration.

Les cultures industrielles aux pratiques culturales plus dégradantes

Parmi les principales cultures industrielles du Nord de la France, il en existe deux qui accentuent particulièrement les processus d'érosion hydrique : la betterave à sucre et la pomme de terre. Leurs semis sont tardifs et se déroulent début avril, afin d'éviter les dernières gelées. Au moment du semis pour la pomme de terre, la technique du tamisage contribue à générer beaucoup de terre fine et donc augmente sensiblement le risque de battance sur les sols limoneux. Au maximum de leur croissance végétative, la betterave à sucre et la pomme de terre ne couvrent que 50 à 80 % de la surface (*photos 1, 3 et 4*). Ces plantes sarclées ne protègent efficacement le sol que pendant un temps limité, compris entre 2 et 3 mois, en fonction de la précocité de la récolte. Ces plantes cultivées en rangs à grand espacement concentrent le ruissellement dans les entre-rangs. Les fourrières et les traces de roues qui peuvent couvrir 15 à 30 % de la superficie d'une parcelle, sont autant de zones préférentielles de concentration de ruissellement et donc d'érosion concentrée. Le travail du sol est profond et atteint 30 à 40 cm pour la betterave. Là aussi, l'utilisation répétée de machinerie lourde tout au long de la saison est à l'origine de compactage. Lors de leur récolte entre le 15 septembre et le 15 novembre (la pomme de terre est récoltée de fin septembre au début du mois d'octobre), on coupe les feuilles et on arrache les racines massives avec une effeuilleuse-arracheuse mécanique. Les betteraves sont alors déposées en tas imposants à l'extrémité des champs pour faciliter leur acheminement ultérieur vers la sucrerie. Pour marquer cette étape culturale, que ce soit pour la betterave ou la pomme de terre, on parle de chantiers de récolte. Ce terme paraît tout à fait approprié, aux sens propre comme au figuré (*photo 2*). Les états de surface, dégradés et fragilisés par le passage répétitif d'engins agricoles lourds (formation de croûtes, infiltration réduite, excès d'eau), aggravent ainsi les risques d'érosion hydrique.

La récolte conduit à un compactage du sol, aussi bien en surface qu'en profondeur, jusqu'à 40 cm, soit sur la totalité de la couche de labour. Un autre aspect érosif de ces cultures est la perte en terre par ablation, lors de la collecte du produit. Il n'existe que très peu de valeurs chiffrées. Par chance, le suivi régulier de la presse locale permet, parfois, d'avoir accès à des informations des plus intéressantes : « ...La campagne 1995 constituait la première année d'application de l'accord interprofessionnel, marqué notamment par la prise en compte de la tare terre. En clair, cet accord incitait les agriculteurs à proposer des betteraves aussi propres que possible avec une tare de référence de 25,39 %... C'est ainsi que pour le Nord-Est, la tare terre moyenne usines a été de 15,22 %, soit un gain de 10 points par rapport à la référence... Dans l'Aisne, le résultat a également été à la hauteur des espérances, avec une tare terre moyenne de 17,1 %... » [1].

[1] « Betteraves : un poids essentiel dans l'agriculture régionale », partie du dossier de presse de D. Lebrun, journaliste à l'Union (Aisne/Soissons/Château-Thierry). L'Union, n° 15 834 du 2/07/96



Photo 1. Champ de betteraves à sucre (mai 1998), bassin versant de Vierzy (Aisne, France). (Crédit photo : L. Mabit, 1999.)



Photo 2. Chantier de récolte de betteraves à sucre (octobre 1998), bassin versant de Vierzy (Aisne, France). (Crédit photo : L. Mabit, 1999.)

Photo 1. Sugar beet field (May 1998), Vierzy watershed (Aisne, France). (Photo: L. Mabit, 1999.)

Photo 2. Sugar beet harvesting site (October 1998), Vierzy watershed (Aisne, France). (Photo: L. Mabit, 1999.)



Photo 3. Champ de pommes de terre (mai 1998), bassin versant de Vierzy (Aisne, France). (Crédit photo : L. Mabit, 1999.)



Photo 4. Champ de pommes de terre (août 1998), bassin versant de Vierzy (Aisne, France). (Crédit photo : L. Mabit, 1999.)

Photo 3. Potato field (May 1998), Vierzy watershed (Aisne, France). (Photo: L. Mabit, 1999.)

Photo 4. Potato field (August 1998), Vierzy watershed (Aisne, France). (Photo: L. Mabit, 1999.)

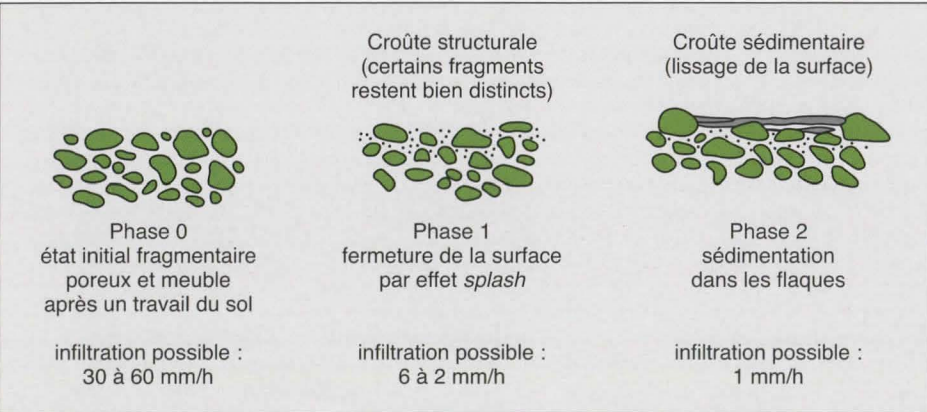


Figure 1. Stades de dégradation de la surface du sol et formation d'une « croûte de battance » sous l'action des pluies (d'après Boiffin, 1984 [25]).

Figure 1. Stages of soil surface degradation under rain action and formation of soil crusting.

précipitations, liée à l'importance de la pente, à la texture et à l'état hydrique des sols, à la dégradation de leurs états

de surface (imperméabilisation superficielle par compactage, travail excessif du sol, couvert végétal insuffisant), ainsi qu'à

l'intensité et à la durée des phénomènes pluvieux auxquels ils sont soumis.

Les conséquences de l'érosion hydrique sont nombreuses : pertes de terre arable, diminution des éléments nutritifs (N, P, K) et de la matière organique, champs ravagés, rendements moindres. Outre la dégradation agronomique, les impacts environnementaux de l'érosion hydrique peuvent être importants : eutrophisation, problèmes de turbidité, de sédimentation, de pesticides dans les hydrosystèmes ainsi que coulées de boue, inondations, voies de communication endommagées, etc. [30].

Les conséquences environnementales liées à l'érosion hydrique des terres agricoles, sous forme de ruissellement mobilisant préférentiellement les particules fines du sol, les nutriments et les pesticides qui leur sont associés, sont donc multiples. Contrairement aux autres pollutions urbaines et industrielles, ce type de perturbation induit par les activités agricoles interagit avec les hydrosystèmes avoisinants, *via* le ruissellement. Cette pollution est diffuse, car difficilement localisable, et souvent liée à plusieurs sources. S'il est possible de connaître les intrants potentiellement polluants auprès des agriculteurs, leur répartition spatiale n'est pas facilement quantifiable après un travail répétitif du sol, les récoltes et de nombreuses précipitations. Si les pertes en nutriments sont remplaçables par les pratiques de fertilisation, en revanche, la perte de matière organique, la dégradation de la structure et de la capacité de rétention en eau sont beaucoup plus difficiles, voire impossibles, à corriger. La perte de rendements, imputable à l'érosion hydrique des sols cultivés, provient au moins autant des dégradations physiques que de la perte de nutriments. En règle générale, les superficies érodées sont appauvries en éléments nutritifs (ce qui implique une baisse des rendements). L'érosion hydrique constitue donc le principal vecteur de transfert et de répartition spatiale des polluants (pesticides, métaux lourds et nutriments en excès), contribuant à induire des pollutions diffuses dans l'environnement. Cet enrichissement en nutriments des eaux courantes et stagnantes, accéléré entre autres par les mutations agraires, crée de grands conflits d'utilisation des ressources hydriques et/ou une limitation coûteuse de leurs divers usages originaux. L'érosion hydrique étant un phénomène complexe, avant de proposer des méthodes de lutte anti-érosive pour remédier à ses conséquences ou traiter ses maux, il paraît nécessaire de faire un diagnostic spatial, quantitatif et temporel de la dégra-

Les différentes formes d'érosion

De l'influence respective de la pluie, du ruissellement, de la rugosité et de la pente du terrain, dépendent les formes de l'érosion hydrique. Selon la combinaison et la localisation spatiale des deux mécanismes de détachement précités, de multiples phénomènes se distinguent. Ils peuvent être réunis en cinq grandes classes :

- *l'érosion en nappe* se traduit par un décapage sélectif plus ou moins uniforme de la couche superficielle du sol. Elle est souvent à peine visible et concerne principalement les particules fines du sol (argile, limon et matière organique). Le ruissellement, dont la force n'est pas suffisante pour inciser le sol, n'intervient que pour le transport des particules fines et la redistribution des sables et des particules grossières ;
- *l'érosion en rigole-interrigole* (rill-interrill) est caractérisée par une érosion en rigoles quasi parallèles, à forte densité mais de dimension et de profondeur modestes, et par une érosion diffuse sur les bandes d'interrigoles. Elle se produit essentiellement lors d'orages violents sur des terrains dont la pente est supérieure à 5 % (dans le cas des loess européens) [26]. Le détachement de matières solides résulte à la fois de l'impact des gouttes de pluie, du ruissellement au niveau des rigoles et des interrigoles ;
- *l'érosion par ruissellement concentré* est matérialisée par de larges incisions, parfois profondes, très espacées et systématiquement localisées au niveau des chenaux de collecte du ruissellement (d'origine topographique ou agraire). Elle est dominante en automne et en hiver et prend le relais de l'érosion en rigole-interrigole lors des orages de printemps, principalement sous les conditions morphoclimatiques du Nord-Ouest de l'Europe [27]. L'érosion par ruissellement concentré, à l'origine de rigoles, voire de ravines, résulte de la connexion hydrologique entre une aire génératrice de ruissellement qui n'est pas nécessairement profondément érodée, et un collecteur linéaire, au niveau duquel les débits et vitesses tractrices des écoulements dépassent les seuils d'incision. La sensibilité à l'incision des collecteurs du ruissellement est contrôlée par la cohésion du sol, dépendante de la texture et de l'état hydrique du sol [28]. Le détachement est donc assuré presque exclusivement par le ruissellement, en fonction de son volume et de sa vitesse, qui a acquis une force tractrice suffisante pour inciser ;
- *l'érosion dite « de talus »*, type d'érosion plus marginale, essentiellement liée aux mouvements de masse, engendrée par le franchissement d'un dénivelé important par un ruissellement concentré en amont ;
- *l'érosion mécanique sèche*, encore appelée érosion aratoire, correspond à un lent mouvement en masse superficiel, lié à la pression répétitive exercée par le travail du sol. Les matériaux mobilisés et déplacés ne sont pas triés, contrairement à « l'érosion en nappe » aux effets similaires [29]. Ce type d'érosion additionnel, souvent sous-estimé, peut entrer en phase avec l'érosion hydrique.

dation des sols, à différentes échelles en fonction du contexte.

Méthodes utilisées et exemples de leurs applications dans le Nord de la France

En 1984, Roose [21] concluait sur les recherches menées jusqu'alors dans les

régions de grandes cultures en disant que « *la recrudescence des phénomènes d'érosion entraîne un regain d'intérêt pour des recherches légères. Il s'agit plus d'enquêtes, d'appuis au développement, de cartographie, de tests de terrain ou de laboratoire et d'analyses statistiques de données qualitatives que de recherches fondamentales ou de mesures sur parcelles ou bassins représentatifs qui demandent la maîtrise du terrain (difficile en milieu privatif) et des investissements sur de longues années* ». Le milieu des années 80 correspond à une multiplication des études dans l'ensemble de l'Europe, où les recherches sur l'érosion

avaient un sérieux retard, notamment par rapport à l'Amérique du Nord. Les chercheurs ont pris progressivement conscience du fait que l'érosion des sols pouvait affecter toutes les régions, y compris le Nord de la France. Ainsi, de nombreuses recherches se sont développées dans cette région en utilisant différentes méthodologies à différentes échelles.

Compréhension des processus : l'approche par les parcelles expérimentales

Les études dominantes abordent la compréhension des mécanismes aux échelles plus ou moins fines, de la « placette » expérimentale de quelques centaines de cm², sous pluie simulée, à la parcelle cultivée [25, 31-33], en allant jusqu'aux bassins versants [34]. Ces travaux s'intéressent principalement à l'identification des facteurs intervenant sur l'ensemble du processus érosif, ainsi qu'à leur classification au sein d'un système hiérarchique [35]. De nombreuses études ont permis d'identifier les principaux facteurs incriminés dans les déclenchements du ruissellement et de l'érosion et leurs localisations à l'intérieur des bassins versants. Ces facteurs déclenchants sont la pluie, les états de surface du sol, la pente et le couvert végétal. Leur interaction est à l'origine de la genèse des ruissellements induisant les pertes en terre [33, 36]. La compréhension des processus de déclenchement et la localisation des surfaces à forte susceptibilité de ruissellement se sont faites à travers une approche par secteur fonctionnel dépendant entre autres de la morphologie du bassin, mais aussi des pratiques culturales. Deux zones sont distinguées, l'impluvium (zone en amont à pentes faibles, dans laquelle se forme le ruissellement), et les zones de concentration, d'incision et de production de sédiments (figure 2). Des essais de pluies simulées sur des placettes de 1 m² et de 10 m², au sein d'une parcelle limoneuse du Pays de Caux, sous un couvert végétal de 10 %, ont mis en évidence des taux de ruissellement entre 55 et 95 % corrélés avec l'angle de la pente (2, 4 et 8 %) et l'intensité de la pluie. Dans tous les cas de figure, l'infiltration du sol est extrêmement faible, entre 0,5 et 4 mm/h. En ce qui concerne les pertes en terre, ces dernières passent de 0,2 à 0,35 t/ha/heure lorsque l'intensité de la pluie est de 10 mm/h, et de 1 à 2,7 t/ha/heure pour

50 mm/h [37]. Ainsi, la majorité des recherches sur l'érosion hydrique dans le Nord de la France a été axée sur l'étude de la dynamique des états de surface sur le ruissellement (battance, fentes de dessiccation, rugosité suite au travail du sol, présence d'un horizon compact vers 30-40 cm de profondeur), et sur les effets de ces états de surface sur les propriétés hydrodynamiques et mécaniques du sol, en relation notamment avec les interventions culturales [38].

Différentes techniques de diagnostic sur la stabilité de la structure du sol en rapport avec l'érosivité des pluies se développent. Certains auteurs ont donc proposé d'estimer la fréquence des cas d'érosion en fonction de l'état de surface d'un impluvium (stade des croûtes de battance et rugosité du micro-relief) [39], et des procédures ont été mises au point pour évaluer la sensibilité des sols à la destruction des agrégats, aboutissant à des classes de stabilité structurale [40, 41].

Utilisation de l'imagerie satellitale

L'intérêt grandissant des études à échelle pluri-kilométrique et les problématiques environnementales associées ont stimulé l'utilisation de la télédétection en pédologie [42].

Sur la base de la connaissance des états de surface et de leur comportement vis-à-vis des ruissellements et de l'érosion par expérimentation, la cartographie des risques érosifs est possible à grande échelle (parcelle, petit bassin versant élémentaire) mais aussi sur des surfaces qui peuvent atteindre plusieurs milliers de km² grâce à des modèles spatiaux [43].

L'acquisition de données satellitales (Landsat TM ou Spot), une technique et un outil couramment utilisés aujourd'hui, peut servir à la cartographie des risques érosifs. Si cette approche ne peut en aucun cas remplacer les études de terrain pour établir une compréhension du phénomène, de par son caractère spatial et temporel, elle reste la méthode de régionalisation et de mise à jour la plus rapide et la moins coûteuse. Actuellement, on peut atteindre une précision cartographique compatible avec des échelles de l'ordre du 1/25 000^e et de 1/50 000^e [44]. Certes, la cartographie directe des traces d'érosion n'est pas possible à l'heure

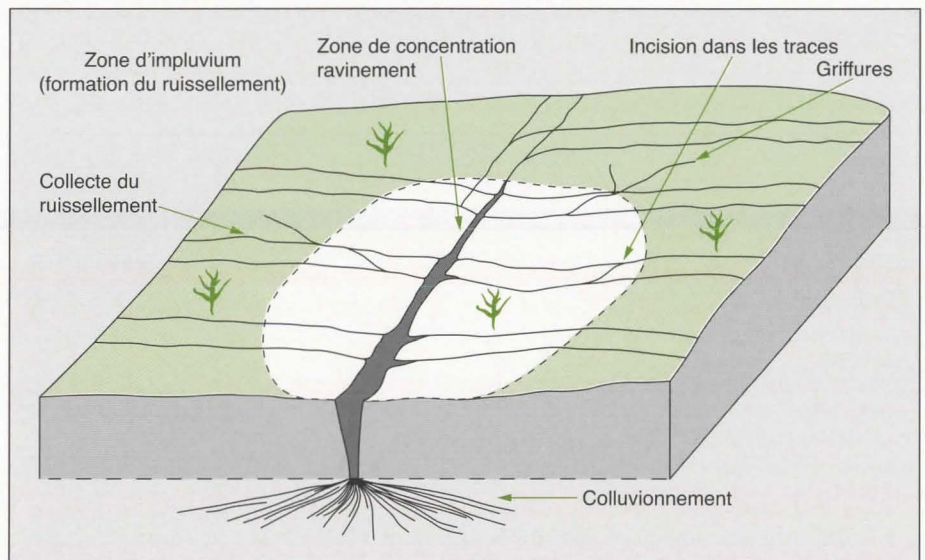


Figure 2. Formation des différentes zones de ruissellement et d'érosion dans un bassin versant agricole (d'après Auzet, 1987 [6]).

Figure 2. Formation of the various zones of rill erosion in an agricultural watershed.

actuelle, mais on peut en revanche étudier des critères indirects révélant, en surface, la présence de phénomènes érosifs [45]. Les risques d'érosion sont déterminés sur la base d'unités spatiales d'intégration (USI), tenant compte des limites hydrologiques et des limites de paysage, définies en regroupant les bassins versants élémentaires contigus en grands bassins versants. Le choix du critère indirect fut la dégradation structurale de la surface des sols limoneux, qui favorise le ruissellement puis l'érosion. Par la suite, un couplage des observations sur le terrain (surfaces tests) et des données satellitales a été effectué. Une base de données géographiques a été constituée, prenant en compte les principaux facteurs à l'origine du ruissellement à partir des données et des cartes existantes. Sur ce principe, une cartographie au 1/250 000^e des zones à risques érosifs de la région Nord-Pas-de-Calais a été réalisée, ainsi que d'autres études complémentaires sur la même région [35].

Modélisation et mesures de flux en aval des bassins versants

Pour les études à l'échelle des bassins versants, on assiste au niveau mondial depuis le début des années 90 à un essor de modèles (empiriques et/ou détermi-

nistes) le plus souvent validés sous les conditions morphoclimatiques des États-Unis. L'étalonnage de ces modèles requiert de nombreuses données d'entrées, sophistiquées et parfois coûteuses à acquérir, et leur validation sur le terrain se fait généralement sur des périodes trop courtes pour intégrer l'évolution temporelle des différents facteurs. La tendance actuelle est d'utiliser l'imagerie satellitale comme source de données d'entrée, et de coupler celles-ci à l'aide de SIG (système d'information géographique), mais peu d'exemples de leur application existent dans le Nord de la France. La spatialisation des modèles de pertes des sols dans un SIG avec l'aide de la télédétection nécessite de faire de nombreuses hypothèses (continuité du paysage, propagation des erreurs, distribution spatiale des pluies intenses, précision des cartes pédologiques, effet des interventions humaines) et la validation sur le terrain n'est vraiment pas aisée [46]. À l'échelle des bassins versants, l'estimation des surfaces potentiellement ruisselantes est faite, par exemple, en combinant les surfaces des sols sensibles à la battance et celles des parcelles en culture d'hiver. En 1993, plusieurs auteurs ont appliqué cette démarche sur 20 bassins versants élémentaires du Nord du Bassin parisien en établissant une relation entre les volumes de terre érodée en hiver et les surfaces potentiellement ruisselantes des bassins versants [34].

Dans les études d'érosion, les principales variables à expliquer sont bien entendu les flux de matières en suspension. Peu à peu, les recherches s'orientent pour appréhender les processus vers l'échelle des bassins versants, afin de prendre en compte les ressources couplées eau/sol et de quantifier les processus en cause.

L'érosion concentrée est un phénomène chronique au sein des sols limoneux dans le Nord de la France, notamment pendant l'hiver. Elle peut se dérouler pendant des épisodes pluvieux non exceptionnels, si les chenaux d'écoulement sont associés à de grands impluviums dont les états de surface sont dégradés [47]. Les modèles classiquement utilisés, comme l'équation universelle des pertes en terre ou USLE et ses variantes, ne sont pas adaptés en vue d'estimer ce type de dégradation, car ils concernent l'érosion diffuse ou l'érosion en rigole-interriole (*rill-interrill*) [48]. Ils rendent possible une approche globale et non spatialisée du rôle des différents facteurs jouant sur l'érosion, sans distinguer les processus de genèse du ruissellement, de détachement et de transport des particules solides. L'Inra, conscient de ce fait, propose de modéliser ce type d'érosion moins étudiée à l'échelle des bassins versants [27].

La variabilité de l'érosion en rigole, issue d'un ruissellement concentré, a été analysée en fonction des caractéristiques topographiques, pédologiques et agraires de 33 bassins versants élémentaires cultivés (BVEC) du Nord-Pas-de-Calais, du Pays de Caux et du Laonnois, pendant quatre périodes hivernales (de 1988/89 à 1991/92). Les bassins versants sont subdivisés en un ensemble de sous-unités hydrologiques emboîtées, pour mieux apprécier l'érosion en rigole. Cette analyse a été réalisée sur la base des réseaux de collecte du ruissellement. La variation des taux d'érosion, estimée à partir du volume des rigoles rapporté à la surface des BVEC (d'une superficie comprise entre 3 et 95 hectares), est forte (0 à 11,7 m³/ha) et corrélée à l'aire des zones présentant un état de surface apte à produire du ruissellement. Le rôle majeur de l'état structural de la surface du sol, l'influence limitante de la longueur incisable des segments du réseau des collecteurs, ainsi que le rôle de la pente locale et de la sensibilité du sol à l'incision le long des collecteurs, ont été mis en évidence. La position spatiale relative des aires contributives au ruissellement et du réseau des collecteurs semble détermi-

nante vis-à-vis des risques d'érosion en rigole [27].

Un programme interdisciplinaire de recherche sur l'environnement de la Seine (PIREN-Seine), mis en place en 1989, regroupant différents acteurs, dont 70 chercheurs de multiples organismes de recherche, a pour objectif d'analyser, de mesurer et de modéliser le fonctionnement du « système Seine » [49].

Une partie de ce programme a été consacrée aux études des interférences entre les activités agricoles et la qualité de l'eau, à différentes échelles spatiales. Les études menées sur le plateau de la Brie, à l'est de Paris, entre autres, ont démontré, à travers l'analyse de la texture des sols, une forte susceptibilité à la battance malgré de faibles pentes, et donc une sensibilité particulière à l'érosion hydrique [50], ainsi qu'une influence notable des MES provenant des champs agricoles sur les hydrosystèmes [51].

Les études de couplage spécifiques érosion-pollution se sont aussi développées, pour la mise en évidence des relations entre l'érosion et la qualité des eaux de surface. Deux bassins versants, l'un de 28 hectares (Erlon) et l'autre de 180 hectares (Vierzy), représentatifs de deux unités spatiales (respectivement le Marlois et le Soissonnais), ont été sélectionnés pour estimer les risques d'érosion à l'échelle régionale [52]. Pendant les trois années de mesure, les épisodes de ruissellement à Erlon (région de collines) ont été plus importants qu'à Vierzy (plateau Soissonnais). Ces différences de comportement sont à mettre en relation, en priorité, avec les facteurs morphopédologiques et, secondairement, avec les facteurs culturels, le bassin versant d'Erlon étant plus petit et plus pentu (87 % des pentes supérieures à 3 %, contre 23 % à Vierzy). Les seuils de déclenchement du ruissellement sont de 19 mm pour Vierzy et de 6-7 mm pour Erlon, à condition que les cumuls des précipitations au cours des dix jours précédents soient respectivement de 60 mm et de 20 mm [52].

Cette étude comparative a mis en évidence la variabilité temporelle des flux mesurés en fonction des deux bassins versants, des états de surface et de la couverture végétale. Selon les années, les pertes par érosion sont variables. Pour le site d'Erlon, ces dernières varient de 0,06 t/ha/an à 20 t/ha/an !

Ces mesures hydrométriques et de qualité de l'eau à l'exutoire de petits bassins hydrographiques doivent donc porter sur plusieurs années pour avoir une repré-

sentativité temporelle (sur 10-15 ans pour tenir compte des variabilités climatiques inter-annuelles). De plus, les estimations de flux calculées annuellement à l'exutoire d'un bassin versant permettent seulement d'estimer les sorties de sédiments du site étudié et ne sont représentatives que de l'année d'étude.

On ne peut donc malheureusement pas se contenter de la mesure des exportations à l'exutoire, car la seule connaissance de cette donnée ne permet ni de localiser les zones sources de sédiment (ce qui est très important pour évaluer les risques de pollution associée), ni *a fortiori* d'évaluer la nuisance « perte en terre » que subissent les parcelles agricoles constituant ces zones sources [24].

La quantification et la spatialisation de l'érosion hydrique dans les agrosystèmes ne sont pas aisées par les méthodes traditionnelles (mesures de flux à l'exutoire de bassin versant) qui ont déjà prouvé leurs limites (spatiale et temporelle) pour cet objectif. Une autre difficulté, en ce qui concerne la cartographie de l'érosion des terres de grandes cultures, est qu'elle est difficile à réaliser à l'échelle scalaire supérieure à la parcelle [5]. Si les relevés de terrain permettent de cartographier les manifestations ponctuelles de l'érosion (rigoles, griffures, ravines), ils ne permettent pas d'intégrer les lents décapages affectant les surfaces sub-horizontales (érosion en nappe). Si ces observations, qui demandent un suivi fréquent sur le terrain, sont très intéressantes pour la compréhension des phénomènes, elles ne sont représentatives que d'une période donnée. De plus, les traces érosives sont éphémères et en grande partie effaçables par les labours [53]. Ces limites ou contraintes peuvent être levées par l'utilisation d'un traceur isotopique : le ¹³⁷Cs.

Utilisation des marqueurs radio-actifs : l'exemple du ¹³⁷Cs

Le césium 137 (¹³⁷Cs) est un radio-isotope anthropique qui permet de quantifier les déplacements de sol à des échelles spatiales variant de la parcelle au bassin versant [54]. On procède à des prélèvements ponctuels de sol, pour déterminer l'activité spécifique en ¹³⁷Cs. Ces valeurs sont comparées à celles établies dans un site témoin considéré comme stable vis-à-vis de l'érosion hydrique (vieux prairie ou milieu forestier). La différence d'activité entre les sites de prélèvements et la

valeur du site référentiel permet, *via* une relation mondialement reconnue, d'estimer les mouvements des sols [54]. Comme hypothèse, on assume que les retombées des radio-isotopes sont homogènes à l'échelle du km² et qu'elles ont été culminantes au début des années 60. Il est possible d'apprécier l'homogénéité initiale de la teneur des sols en radioélément grâce à la valeur du coefficient de variation des sites référentiels. Parfois, les apports de radio-isotopes provenant de l'accident de Tchernobyl en 1986 peuvent fausser les conditions d'utilisation de la méthode dans certaines régions européennes. Si les retombées survenues en 1986 sont supérieures à 10 % de la teneur initiale du sol en césium, il est alors préférable d'utiliser un modèle mis en place pour intégrer cet enrichissement [55].

La mesure de la redistribution spatiale de l'isotope depuis son introduction majeure dans l'environnement en 1963, permet de distinguer, de quantifier et de localiser les superficies érodées, stables et de dépôts, au sein des terres cultivées [54, 56, 57]. Quand nous parlons de superficie stable mise en évidence par les mouvements des sols résultants au cours des 30 dernières années, cela ne signifie pas que ces surfaces sont exemptes de pertes par transport compensées par des dépôts, mais que le bilan global des transferts est nul [58].

Dès le début des années 90, des études exploratoires utilisant ce radio-marqueur ont été menées en France pour quantifier et spatialiser les processus érosifs des sols des régions de grandes cultures, en zones tempérées, à l'échelle du bassin versant élémentaire. Les premiers essais de cette technique étant concluants, elle s'est poursuivie au travers d'un travail de recherche franco-canadien par son application à l'échelle d'un bassin versant en France et au Québec [56, 59].

En utilisant cette méthode, la cartographie des mouvements des sols (bilan interne) et les sorties nettes de sédiment à l'exutoire (bilan externe) du bassin versant de Vierzy ont été établies. Ces bilans correspondent à des valeurs annuelles moyennées sur les 33 dernières années (1963-1996). L'amplitude des mouvements des sols varie d'une perte de 18 t/ha/an à des dépôts de 19 t/ha/an [60] et les sorties nettes de sédiments à l'exutoire ont été estimées à 1,9 t/ha/an. Seulement 11 hectares, soit 6 % de la superficie du bassin versant de Vierzy, sont soumis à des pertes nettes majeures,

supérieures à 8 t/ha/an. L'estimation de la couche arable perdue, d'après les quantités de terre transitées à l'exutoire en direction d'autres géosystèmes plus en aval, correspond à une perte annuelle de 0,12 mm. Sur les 33 dernières années, cette perte est donc estimable à 4 mm pour l'ensemble du bassin, et une projection dans 100 ans, sous les mêmes conditions agro-environnementales, laisse entrevoir une perte globale de 1,2 cm de terre arable [61].

La teneur en matière organique résiduelle semble étroitement corrélée avec la teneur des sols en ¹³⁷Cs [62]. En fonction de l'intensité des processus de redistribution interne de terre arable dans le bassin versant de Vierzy, les secteurs érodés concèdent une perte moyenne relative de 10 % de matière organique, et les secteurs de dépôt un gain moyen relatif de 15 %. La matière organique apparaît potentiellement comme un indicateur de la durabilité culturale en terre de grandes cultures [62]. Cette perte de fertilité a également été mesurée directement à l'exutoire du bassin [52] : la fraction organique de la charge solide (matières en suspension), peut être très élevée, variant de 8 à 90 % !

Synthèse comparative des différentes méthodes

À travers la présentation succincte des travaux réalisés dans le Nord de la France, nous avons recensé les différentes méthodes de mesure et d'estimation de l'érosion hydrique existantes. Il s'agit maintenant, en conclusion, de confronter ces approches, et notamment les deux les plus utilisées qui sont les mesures en parcelle expérimentale et les mesures effectuées à l'exutoire de bassins versants expérimentaux élémentaires, à la méthode utilisant le ¹³⁷Cs, afin d'en dégager les champs d'application spécifiques et les éventuelles complémentarités.

En prélude à cette analyse comparative, rappelons qu'il n'existe pas de méthode parfaite mais des configurations techniques, souvent encore en cours de mise au point, que l'on a tenté d'adapter à un espace particulier et à un questionnaire spécifique. Dès lors, le recours à

l'une ou l'autre des méthodes est d'abord fixé par les ambitions du projet en terme d'objectifs scientifiques, d'échelle spatio-temporelle, et bien sûr, de moyens techniques et financiers consentis. À cet égard, il apparaît clairement que la technique du césium 137 est de loin la plus adaptée à la spatialisation des mouvements des sols, à l'échelle des bassins versants, et à la cartographie de ces mêmes mouvements (*tableau*). Si les méthodes de mesure directe et indirecte de l'érosion hydrique, ou plus précisément de son estimation, sont nombreuses [63, 64], force est de constater la limite de leur représentativité spatiale et temporelle. Deux méthodes d'estimation de l'érosion dominent.

La première méthode, la plus ancienne, porte sur la mesure de pertes en terre par des parcelles expérimentales. Les parcelles expérimentales de l'ordre du m² (ou micro-parcelles) sont particulièrement utiles pour analyser les processus d'infiltration et de ruissellement. En conditions contrôlées, les macro-parcelles de quelques dizaines de m² à 200 m², permettent de mieux comprendre l'influence combinée et/ou respective du couvert végétal, de la pente, du type de sol et des techniques culturales. Il faut aussi préciser que le ruissellement des parcelles expérimentales peut être récolté et analysé par la suite.

En revanche, de par leur taille réduite, ces parcelles ne permettent pas de prendre en compte l'ensemble des processus induits par l'érosion hydrique. La dynamique spatiale du ruissellement est occultée et peut entraîner une surestimation des pertes en terre [65]. L'extrapolation des mesures réalisées en parcelle à des échelles scalaires géographiques plus petites demeure une question majeure non résolue [23, 66]. Ces mesures en parcelle peuvent s'obtenir en conditions naturelles ou sous pluies « simulées » ou artificielles reproduisant l'intensité des pluies locales.

Dans le premier cas, les résultats sont dépendants des conditions météorologiques. De plus, la représentativité temporelle des résultats, pour intégrer les variabilités climatiques interannuelles, doit porter sur plusieurs années. En revanche, sous pluies artificielles, à l'aide d'un simulateur de pluies, en conditions contrôlées (lame d'eau et intensités des précipitations proches des conditions naturelles, et contrôle des autres paramètres : humidité du sol, etc.), ces dispositifs expérimentaux s'avèrent très utiles

Tableau

Comparaison des principales méthodes pour estimer l'érosion des sols

	Mesure en parcelle expérimentale	Mesure à l'exutoire des bassins versants	Mesure à partir du ¹³⁷ Cs
Échelle spatiale	Parcelle (X m ²)	Bassin versant (de X ha à X km ²)	De la parcelle au bassin versant (de X ha à X km ²)
Échelle temporelle	X années à partir de la date d'étude (en conditions naturelles) ou directe* (utilisation d'un simulateur de pluie)	X années à partir de la date d'étude	De 1963 à la date d'étude
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôle des paramètres - Estimation des pertes en terre et de polluants (nutriments, pesticides...) - Mesure de l'érodibilité des sols 	<ul style="list-style-type: none"> - Mesure des sorties nettes - Compréhension des déclenchements des seuils de ruissellement - Possibilité d'étude couplée eau/sol/polluants 	<ul style="list-style-type: none"> - Estimation rapide, en un prélèvement des mouvements des sols - Possibilité de cartographie de ces derniers - Estimation des sorties nettes
Limites	<ul style="list-style-type: none"> - Représentativité des résultats à d'autres échelles scalaires très limitée - Représentativité des processus limitée par la dimension même de la parcelle 	<ul style="list-style-type: none"> - Forte dépendance vis-à-vis des paramètres climatiques - Représentativité limitée à la durée de l'étude, à moins de la prolonger 	<ul style="list-style-type: none"> - Résultante sans dynamique de 1963 à la date de prélèvement - Estimation des pertes en sol uniquement**
Coût (1)	500 €	15 000 €	46 000 € Possibilité de faire de nombreuses mesures sur d'autres sites

(1) Coût relatif pour l'acquisition de l'appareillage et sa mise en place. Coût, hors main-d'œuvre, fonctionnement et d'entretien, n'incluant aucune analyse de sol ou d'eau. En revanche, les coûts de fonctionnement et de maintien sont faibles pour la méthode utilisant le césium, moyens pour les mesures de flux à l'exutoire des bassins versants, et élevés pour les parcelles expérimentales.

* Les valeurs obtenues avec le simulateur de pluie peuvent être extrapolées, en comparant l'érosivité de la pluie simulée à celle des précipitations annuelles de la région d'étude.

** Les mesures de ¹³⁷Cs ne permettent d'estimer que les pertes ou les dépôts de sol. Il est possible d'extrapoler cette remarque à certains polluants plus ou moins liés aux sédiments. En revanche, il est difficile de connaître la contribution respective des processus en cause : érosion hydrique au sens strict, érosion mécanique liée au travail du sol, érosion nivale. Mais des modèles sont en voie de développement à ce sujet.

Comparison of the main traditional methods to estimate soil erosion

pour des informations rapides sur la dynamique de l'infiltration et les risques de ruissellement, sur les relations entre les pertes en terre et la pente ou différentes cultures et pratiques culturales. Toutefois, entre 5 et 10 manipulations peuvent être nécessaires pour valider les résultats, avec un niveau de confiance acceptable.

Parallèlement, une équation de prédiction, l'USLE (Universal Soil Loss Equation), fondée sur l'étude de 10 000 mesures annuelles de l'érosion en parcelle, a été mise au point par Wischmeier [63]. Si cette dernière a été mondialement utilisée, car très pratique, ses limites ont été soulignées dès la fin des années 70. L'utilisation de ce modèle doit être limitée en toute rigueur à l'échelle scalaire du champ agricole dont les pentes sont inférieures à 20 % (il faut toutefois noter que la version modifiée de l'USLE (MUSLE), en tenant compte de l'énergie du ruissellement plutôt que

de celle des pluies, peut permettre son utilisation sur des pentes pouvant atteindre 40 %). De plus, ce modèle fut validé sous les précipitations de la plaine nord-américaine, et les interactions entre les différents facteurs introduits sont négligées [29].

La pertinence des échelles d'observation et d'études quantitatives est discutée depuis longtemps. Dans l'agriculture moderne, la parcelle constitue une unité de base qui s'insère dans un système de gestion plus vaste qui est le bassin versant agricole. L'étude des processus érosifs a été conduite à l'échelle de bassins versants, car ce sont des unités fonctionnelles permettant de prendre en compte de manière systémique le cycle de l'eau et des flux internes [67]. La pertinence de cette échelle d'étude permet de prendre en compte et d'intégrer les caractéristiques stables du milieu (à l'échelle historique, au moins) et des paramètres variables, sur des pas de

temps courts (saisonniers, annuels ou pluriannuels) [23].

Une autre approche plus récente consiste donc à mesurer, à l'exutoire des bassins versants, les flux liquides et solides par l'installation d'une station d'échantillonnage. On procède aussi à une mesure des sorties de matières de l'agrosystème concerné. L'avantage majeur de cette méthode est qu'elle est développée sur des bassins versants de quelques dizaines d'hectares à plusieurs centaines de km², et qu'elle permet, par des analyses supplémentaires, de « qualifier » ces sorties par des analyses d'eau. Cette méthode rend donc possible une étude couplée des ressources en eau et en sol. Nous nous intéresserons seulement à l'aspect portant sur l'estimation des pertes en terre.

Cette approche est soumise aux variabilités climatiques annuelles et interannuelles. Cette remarque est d'autant plus vraie pour les bassins versants qui comportent

un cours d'eau intermittent. Cette prise en compte des variabilités climatiques nécessite une poursuite des recherches sur de nombreuses années. Les mesures de pertes en terre ne sont représentatives que de l'année d'étude, ou du laps de temps consenti. En revanche, cette démarche permet de mesurer les pertes en terre qui sortent effectivement du site. Encore faut-il bien analyser et interpréter les interactions entre les différents paramètres morphoclimatiques et anthropiques. En effet, le bilan annuel des pertes en terre, lié au fonctionnement des bassins versants dissimule des discontinuités temporelles [23]. Du point de vue de l'estimation des pertes en terre, de nombreuses questions restent sans réponse. Que se passe-t-il au sein du bassin versant ? Quelles sont les parties productrices de ces pertes en sol, qu'en est-il des relais ? Quelle est la véritable représentativité des sorties nettes à l'exutoire, par rapport à la dynamique induite par l'érosion hydrique sur l'ensemble du site étudié ?

Ainsi, l'estimation et la spatialisation des risques d'érosion hydrique à l'échelle des bassins versants ne sont pas aisées. Les mouvements des sols ne peuvent être estimés ou spatialisés par les techniques traditionnelles d'approche des processus érosifs. Le césium 137 (^{137}Cs) peut être utilisé pour pallier certaines limitations des méthodes traditionnelles, tout en leur étant complémentaire. Cette méthode intègre l'ensemble des processus érosifs globaux (anthropiques et naturels). En utilisant le ^{137}Cs , on dépasse la simple cartographie, car les données correspondent à un état des lieux, intégrant plus de 30 ans de gestion agricole (période qui, en France, correspond approximativement à l'intensification de l'agriculture). Le résultat final s'apparente plutôt à un audit érosif spatio-temporel [56]. On ne peut donc connaître ni les rythmes, ni la dynamique de l'érosion hydrique pendant ce laps de temps. Les mouvements annuels des sols (bilan et sorties nettes) sont donc moyennés sur une trentaine d'années, ce qui permet d'intégrer les variabilités climatiques annuelles et interannuelles. En revanche, comme on ne mesure que la résultante de l'érosion, il est très difficile d'analyser les paramètres explicatifs et donc la lutte anti-érosive adaptée qu'il faut développer. Cette méthode permet difficilement de prendre en compte l'érosion linéaire non sélective et les apports de poussières. Cette technique permet de faire la jonction entre les approches en parcelle et les études en bassin versant. Elle permet de relier les mouvements des

Summary

Water erosion: methods and case studies in Northern France

L. Mabit, M.R. Laverdière, C. Bernard

The degradation of the arable lands, a witness to the brittleness of this natural resource, affects many areas of the globe, including developed countries and more particularly oceanic and continental temperate plains. Water erosion is one of the major causes of soil degradation in the temperate regions and several decades of modern and intensified agriculture have accentuated the agricultural impoverishment of the soils of Northern France. Despite low rain erosivity and moderate slopes, water erosion affect silt plains and plateaux of this productive area. Soils of the region are low in organic matter and susceptible to crusting due to their texture combined with the crops selected as well as the cultural practices used. The intensive development of mechanized annual crops such as winter wheat, sugar beet and potatoes (box 1) leaves the soil highly vulnerable to soil erosion for a long period of time every year (Photographs 1-4). The aim of this paper is to present and compare various methods used in this region of France in order to examine and evaluate agricultural soil loss due to water erosion. After a brief definition of this type of degradation and of the various processes identified at different stages (box 2, figures 1 and 2), the authors present some studies carried out or still in progress in the area. This non exhaustive review, presents the advantages and the limitations of the various approaches and their complementarity to measure water erosion (Table 1). We must keep in mind that erosion is a combination of several processes and before new management practices are proposed to land owners to solve their problem, the latter must be well documented in terms of extension: field, farm or watershed. Water erosion studies which began during the first half of the twentieth century, have commonly started by conventional sediment loading measurement at spatial scales ranging from micro-plots to large-sized plots (under simulated or natural rainfall) and more recently at watershed scale. Such measurements have to be carried over decades to integrate the interannual variability of climate and cropping practices.

More recently, caesium-137 (^{137}Cs), an anthropic radiotracer universally recognized in the study of soil movement within the landscape, was shown as an effective means of quantification and spatialization of erosion in a small watershed in the Soissonnais (France). This technique is useful to quantify, spatialize and map net soil movements and appears as a fast and well-adapted method that complements other soil erosion assessment techniques.

Cahiers Agricultures 2002 ; 11 : 195-206.

sols aux paramètres agro-environnementaux (pente, sol, culture, etc.) comme les mesures en parcelle, tout en intégrant la variabilité spatiale de ces mêmes facteurs, comme le font les études à l'échelle des bassins versants. Les mesures permettent donc d'identifier les secteurs du bassin les plus vulnérables à l'érosion, participant de ce fait aux exportations de matières polluantes, et contribuant vraisemblablement le plus à la dégradation des écosystèmes situés à l'aval. Il est ainsi possible de circonscrire les zones d'intervention prioritaires. Par la suite, des aménagements raisonnés et des mesures agro-environnementales peuvent être appliqués sur des surfaces réduites, à moindre coût, avec une efficacité optimale.

Les différentes méthodologies présentées, qui ont chacune leurs domaines d'appli-

cations et leurs limites, apparaissent complémentaires. Le choix de l'une d'entre elles et/ou leur couplage doit être fait en fonction de la problématique et des objectifs de recherche ■

Références

1. Fournier F. *Climat et érosion : la relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques*. Paris : PUF, 1960 ; 201 p.
2. Tricart J. *Géomorphologie applicable*. Paris : Masson, 1978 ; 204 p.
3. de Ploey J. La conservation des sols. *La Recherche* 1990 (suppl. 10) : 21-9.
4. Hénin S, Gobillot T. L'érosion en France. *Bull Technique d'Information* 1950 ; 50 : 431-3.
5. Bulletin de l'Association des Géographes Français (BAGF). Influences des modifications

des structures agraires sur l'érosion des sols. *Bull Asso Géogr Français* 1992 ; 2 : 82-184.

6. Auzet AV. *L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture : aspects agronomiques*. Paris : Ministère de l'Environnement et Ministère de l'Agriculture, Centre d'études et recherches éco-géographiques, 1987 ; 60 p.

7. Rémy JC, Le Bissonnais Y. Comparaison des phénomènes d'érosion entre le Nord et le Sud de l'Europe : ampleur des problèmes et nature des mécanismes. *Bull Réseau Erosion* 1998 ; 18 : 15-32.

8. Neboit R. *L'homme et l'érosion*. Publication de la faculté des Lettres et Sciences Humaines de l'Université de Clermont-Ferrand II, fascicule 17, 1983 ; 183 p.

9. Pihan J. *Risques climatiques d'érosion hydrique des sols en France*. Colloque sur l'érosion agricole en milieu tempéré non méditerranéen, Strasbourg, 20-23 septembre 1978, 1979 : 13-8.

10. Monnier G, Boiffin J, Papy F. Réflexions sur l'érosion hydrique en conditions climatiques et topographiques modérées : cas des systèmes de grande culture de l'Europe de l'Ouest. *Cah Orstom Sér Pédol* 1986 ; 22 (2) : 123-31.

11. Vogt H. Érosion des sols et techniques de culture en climat tempéré maritime de transition (France et Allemagne). *Rev Géom Dyn* 1953 ; 4 : 157-83.

12. Lefèvre P. Quelques phénomènes d'érosion en Picardie. *Annales Agronomiques* 1958 ; 1 : 91-129.

13. Meybeck M, de Marsily G, Fustec E. *La Seine et son Bassin. Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé*. Paris : Elsevier, 1998 ; 749 p.

14. Douay F, Masson F, Pelletier JL. *Érosion des terres agricoles dans le Nord-Pas-de-Calais*. Université de Lille, Rapport SRAE, 1980 ; 40 p.

15. Wicherek S, ed. *Farm land erosion in temperate plains environments*. Amsterdam : Elsevier, Agricultural Sciences Section, 1993 ; 598 p.

16. Poesen J. Conditions for gully formation in the Belgian Loam Belt and some ways to control them. *Soil Technology Series* 1989 ; 1 : 39-52.

17. Boardman J. Soil erosion on the South Downs: a review. In : Boardman J, Foster IDL, Dearing JA, eds. *Soil erosion on agricultural land*. Chichester : Wiley and Sons, 1990 : 87-106.

18. Govers G. Rill erosion on arable land in central Belgium. Rates, controls and predictability. *Catena* 1991 ; 18 : 133-55.

19. de Ploey J. Erosion systems and perspectives for erosion control in European loess areas. *Soil Technology Series* 1989 ; 1 : 93-102.

20. Bollinne A. *Étude et prévision de l'érosion des sols limoneux en moyenne Belgique*. Thèse de doctorat, Liège, 1982 ; 356 p.

21. Roose E. Érosion et conservation des sols : place de la recherche française en régions tempérées et tropicales. In : *Livre jubilaire du cinquantième de l'Association française pour l'étude du sol*. 1984 : 331-3.

22. Riser J. *Érosion et paysages naturels*, Collection Domino. Paris : Flammarion, 1995 ; 127 p.

23. Veyret Y. *L'érosion entre nature et société*. Dossiers des images économiques du monde, dossier 22. Paris : SEDES, 1998 ; 344 p.

24. Boiffin J. Place des bassins versants expérimentaux dans les études sur l'érosion hydrique

des sols. In : *Du concept de BVRE à celui de zone atelier dans les recherches menées en eaux continentales*. Actes du Séminaire national, hydrosystèmes. Paris : Cémagref, 1994 : 197-201.

25. Boiffin J. *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. Thèse de doctorat, INA-PG, 1984 ; 320 p + annexes.

26. Savat J, de Ploey J. Sheetwash and rill development by surface flow. In : Brian and Yair, eds. *Badland, Geomorphology and Piping*. Norwich : Geo Books, 1982 : 113-26.

27. Ludwig B. *L'érosion par ruissellement concentré des terres cultivées du nord du Bassin parisien : analyse de la variabilité des symptômes d'érosion à l'échelle du bassin élémentaire*. Thèse de doctorat, Strasbourg I, 1992 ; 201 p.

28. Guérif J. Résistance en fonction des agrégats terreux : influence de la texture, de la matière organique et de la teneur en eau. *Agronomie* 1988 ; 8 : 379-86.

29. Roose E. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bulletin pédologique de la FAO* 1994 ; 70 : 420 p.

30. Ministère de l'Environnement (Direction de la prévention des pollutions et des risques/Direction de la nature et des paysages) et ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation (Direction de l'espace rural et de la forêt) français. *Les « coulées de boue » liées à l'érosion des terres agricoles*, Dossier national. Paris : Ministère de l'Environnement, Ministère de l'Agriculture, 1996 ; 97 p.

31. Farres JP. The dynamics of rainsplash erosion and the role of soil aggregate stability. *Catena* 1987 ; 14 : 119-30.

32. Le Bissonnais Y, Bruand A, Jamagne M. Laboratory experimental study of soil crusting: relation between aggregate breakdown mechanisms and crust structure. *Catena* 1989 ; 16 : 377-92.

33. Eimberck M. Facteurs d'érodabilité des sols limoneux : réflexions à partir du cas du Pays de Caux. *Cah Orstom Sér Pédol* 1990 ; 25 : 81-94.

34. Auzet AV, Boiffin J, Papy F, Ludwig B, Maucorps J. Rill erosion as a function of characteristics of cultivated catchments in the North of France. *Catena* 1993 ; 20 : 41-62.

35. Mathieu R, King C, Le Bissonnais Y. Contribution de données multitemporelles Spot à l'identification des risques d'érosion. L'exemple des sols limoneux du nord de la France. *Cah Orstom Sér Pédol* 1993 ; 28 (1) : 81-94.

36. Le Bissonnais Y, King D. Rôle des sols et des pratiques culturales dans les phénomènes de ruissellement et d'érosion : Exemple des sols limoneux en grande culture du nord de l'Europe. *PURPAN* 1993 ; 166 : 68-74.

37. Chaplot V, Le Bissonnais Y. Field measurements of interrill erosion under different slopes and plot sizes. *Earth Surf Process Landforms* 1999 ; 24 : 1-10.

38. Ouvry JF. Effet des techniques culturales sur la susceptibilité des terrains à l'érosion par ruissellement concentré : expérience du Pays de Caux (France). *Cah Orstom Sér Pédol* 1990 ; 25 : 157-69.

39. Boiffin J, Papy F, Eimberck M. Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. I - Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. *Agronomie* 1988 ; 8 : 663-73.

40. Le Bissonnais Y, Le Souder C. Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Étude et Gestion des Sols* 1995 ; 2 : 43-56.

41. Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility : I. Theory and methodology. *Eur J Soil Sci* 1996 ; 47 : 425-37.

42. Bonn, F, Escadafal G. La télédétection appliquée aux sols. In : Bonn F, éd. *Précis de télédétection*, vol. 2 (Applications), Chapitre 3. Paris : Puq/Aupelf, 1996 : 91-135.

43. King D, Le Bissonnais Y. Rôle des sols et pratiques culturales dans l'infiltration et l'écoulement des eaux : exemple du ruissellement et de l'érosion sur les plateaux limoneux du nord de l'Europe. *CR Acad Agric Fr* 1992 ; 78 : 91-105.

44. Blanchard E, King C, Le Bissonnais Y, et al. Paramétrisation du potentiel de ruissellement des bassins versants au moyen de la télédétection et des systèmes d'information géographique. Application à des bassins versants du Pays de Caux. *Étude et Gestion des Sols* 1999 ; 6 : 181-99.

45. King C, Delrout G. Spatial assessment of erosion: contribution of remote sensing, a review. *Remote Sensing Review* 1993 ; 7 : 223-32.

46. Bonn F. La spatialisation des modèles d'érosion des sols à l'aide de la télédétection et des SIG : possibilités, erreurs et limites. *Sécheresse* 1998 ; 9 : 185-92.

47. Papy F, Douyer C. Influence des états de surface du territoire agricole sur le déclenchement des inondations catastrophiques. *Agronomie* 1991 ; 11 : 201-15.

48. Wischmeier WH. Use and misuse of the Universal Soil Loss Equation. *J Soil Water Conserv* 1976 ; 31 : 5-9.

49. Fustec E, de Marsily G, eds. *La Seine et son bassin : de la recherche à la gestion*. Paris, Colloque Piren-Seine, 1993 ; 384 p.

50. Penven MJ, Gury M, Muxart T, Bartoli F, Mussot R. Les caractères du milieu physique conditionnant la mobilité des particules dans les bassins versants ruraux. In : Fustec E, de Marsily G, eds. *La Seine et son bassin : de la recherche à la gestion*. Paris, Colloque Piren-Seine, 1993 : 109-26.

51. Penven MJ, Muxart T. Le drainage agricole : un rôle fondamental dans les transferts d'eau et de matière, l'exemple du plateau briard. *Annales de Géographie* 1995 ; 581-2 : 88-104.

52. Angélique A. *Ruissellement, érosion et qualité des eaux en terre de grande culture : étude comparée de deux bassins versants du Laonnais et du Soissonnais*. Thèse de doctorat, Lille I, 1996 ; 588 p + annexes.

53. Schwing JF, Vogt H. An attempt at a large scale non experimental cartographic approach to the variability of erosion features and land sensitivity to erosion in the Alsace vineyards (France). In : de Boodt, Gabriels, eds. *Assessment of erosion*. Chichester : Wiley and Sons, 1980 : 207-14.

54. Bernard C, Mabit L, Laverdière MR, Wicherek S. Césium 137 et érosion des sols. *Cahiers Agricoles* 1998 ; 7 : 179-86.

55. Mabit L, Bernard C, Wicherek S, Laverdière MR. Les retombées de Tchernobyl, une réalité à prendre en compte lors de l'utilisation de la méthode du Césium 137. In : CNRS, ed. *Paysages agraires et environnement. Principes écologiques de gestion en Europe et au Canada*. Paris : CNRS, 1999 : 285-92.

56. Mabit L. *Estimation de l'érosion hydrique des sols par la méthode du ¹³⁷Cs. Application aux bassins versants de Vierzy (France) et Lennoxville (Québec)*. Thèse de doctorat, Paris I Panthéon-Sorbonne, 1999 ; 257 p.

57. Sogon S. *Érosion des sols cultivés et transport des matières en suspension dans un bassin versant de Brie. Application des traceurs radioactifs naturels et magnétiques*. Thèse de doctorat, Paris I Panthéon-Sorbonne, 1999 ; 304 p.

58. Demangeot J. *Les milieux « naturels » du globe*. Paris : Masson, 1992 ; 276 p.

59. Mabit L, Bernard C, Laverdière MR, Wicherek S. Assessment of soil erosion in a small agricultural basin of the St. Lawrence River watershed. *Hydrobiologia* 1999 ; 410 : 263-8.

60. Bernard C, Mabit L, Wicherek S, Laverdière MR. Long-term soil redistribution in a small French watershed as estimated from ¹³⁷Cs data. *J Environ Qual* 1998 ; 27 : 1178-83.

61. Mabit L, Bernard C, Laverdière MR, Wicherek S. Spatialisation et cartographie des risques érosifs à l'échelle d'un bassin versant agricole par un radio-isotope (¹³⁷Cs). *Etude et Gestion des Sols* 1998 ; 5 : 171-80.

62. Mabit L, Bernard C. Relationship between soil inventories and chemical properties in a small intensively cropped watershed. *CR Acad Sci, Sciences de la terre et des planètes* 1998 ; 327 : 527-32.

63. Wischmeier WH, Smith DD. A universal soil-loss estimating equation to guide conservation farm planning. *Soil Science* 1960 ; 1 : 418-25.

64. Godard A, Rapp A. *Processus et mesure de l'érosion*. Paris : CNRS, 1987 ; 576 p.

65. Le Bissonnais Y, Benkhadra H, Gallien E, Eimberck M, et al. Genèse du ruissellement et de l'érosion diffuse sur sols limoneux : analyse du transfert d'échelle du m² au bassin versant élémentaire agricole. *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 1997 ; 3 : 51-64.

66. Bernard C. La mesure de l'érosion hydrique en parcelles, une image partielle de la réalité ? *Agrosol* 1992 ; 5 : 63-8.

67. Tardy Y. *Le cycle de l'eau : climats, paléoclimats et géochimie globale*. Paris : Masson, 1986 ; 338 p.

Résumé

Depuis plusieurs décennies, la modernisation et l'intensification de l'agriculture ont accentué la dégradation des sols agricoles du Nord de la France. Les sols des régions de grandes cultures de milieu tempéré subissent de façon variable les effets de l'érosion hydrique, principal facteur de la dégradation qualitative et quantitative de cette ressource. Après une définition succincte des différents processus d'érosion hydrique, les auteurs présentent les principales recherches réalisées et en cours dans les terres de grandes cultures du Nord de la France. Cette synthèse démontre les avantages, les limites mais aussi les complémentarités des approches pour appréhender l'érosion hydrique en sols cultivés. La méthode du césium 137 (¹³⁷Cs), radiotracteur d'origine anthropique, constitue un moyen efficace de quantification et de spatialisation de l'érosion des sols cultivés tant à l'échelle de la parcelle qu'à celle des bassins versants pluri-kilométriques. Cette technique apparaît ainsi complémentaire des méthodes traditionnelles (mesures en parcelles, mesures de flux liquide et solide à l'exutoire des bassins versants, modélisation) et particulièrement bien adaptée pour la cartographie de la résultante de l'érosion hydrique.
