



HAL
open science

L'érosion : des mécanismes à une méthode générale de réduction

Frédéric Darboux, Arnaud Legout, Noémie Pousse, Baptiste Algayer

► **To cite this version:**

Frédéric Darboux, Arnaud Legout, Noémie Pousse, Baptiste Algayer. L'érosion : des mécanismes à une méthode générale de réduction. Rendez-vous Techniques de l'ONF, 2024, 79, pp.5-13. hal-04642977

HAL Id: hal-04642977

<https://hal.science/hal-04642977v1>

Submitted on 10 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'érosion : des mécanismes à une méthode générale de réduction

Lorsque l'on parle d'érosion, on imagine bien les particules de sols entraînées par l'eau ou le vent. Mais quels sont les facteurs qui déterminent si une particule va être entraînée ou non, et à quelle distance ? Si celle-ci se redépose quelques centimètres plus loin ou termine sa course dans l'océan, les conséquences ne sont pas les mêmes pour nos forêts. Alors tâchons de comprendre ce qui rend une eau plus érosive, un sol plus érodable, et le rôle fondamental du fameux effet splash.

L'érosion des sols est un problème bien identifié en domaine agricole, beaucoup moins en forêt. La présence d'un humus et d'une couverture arborée pérenne protectrice explique en partie la prise de conscience limitée du risque érosif en forêt. Pourtant les témoignages sont nombreux : des traces d'érosion sont observées, avec notamment des incisions (rigoles, ravines) dans les sols des parcelles et sur les dessertes. Les sols forestiers ne sont donc pas indemnes d'érosion, et peuvent même présenter des vulnérabilités spécifiques du fait de leur fragilité et de leurs problèmes de fertilité. Si la quantité de sol érodée est supérieure à la quantité de sol formée, la perte est irréversible à échelle humaine, avec des conséquences multiples sur la production forestière et la résilience des peuplements face aux changements globaux. En complément des zones où de la terre est érodée, il existe aussi des secteurs où les particules sont transférées ou se sont sédimentées, entraînant un comblement de fossés et de mares, et une turbidité dans les cours d'eaux. Ainsi, l'érosion en forêt n'est pas uniquement un problème pour la gestion durable des forêts et leur exploitation, mais aussi pour les milieux situés en aval.

L'effet des pratiques sylvicoles sur l'érosion des sols est encore peu étudié. Nous montrerons en fin d'article le peu de certitude que la science peut nous apporter à ce propos. Difficile, dans ces conditions, d'adapter nos pratiques de façon certaine. Heureusement, nous avons aujourd'hui une bonne compréhension du processus d'érosion en lui-même et nous allons voir que ces connaissances nous permettent d'établir une méthode générale de lutte contre ce phénomène.

Mais que se passe-t-il ?

Les pluies (mais aussi la fonte de la neige) peuvent créer du ruissellement. Cet écoulement peut être le moteur d'une érosion. En résumé :

Pluie → Ruissellement → Érosion

Cette succession, de type cause-conséquence (et assez évidente...), nous indique déjà des leviers d'action :

- Premier levier : les pluies. On ne peut certes pas empêcher la survenue des précipitations, mais on peut limiter la quantité d'eau arrivant au sol. Le couvert végétal (toutes strates confondues) va intercepter et stocker une partie de la pluie. Ce phénomène est surtout efficace pour les pluies de faibles intensités et durées (qui sont malheureusement, pour notre problème, celles les moins susceptibles de causer du ruissellement) et lorsque la végétation porte des feuilles (donc moins en hiver).
- Deuxième levier : le ruissellement. Si les précipitations arrivent au sol, on pourra essayer de limiter leur transformation en ruissellement : on favorisera soit l'infiltration dans le sol (très efficace), soit le stockage en surface dans des flaques (peu efficace).
- Troisième levier : l'érosion elle-même. Si du ruissellement se produit, on tentera de limiter sa capacité à créer de l'érosion. Mais pour ce faire, il faut en apprendre un peu plus sur l'érosion elle-même.

L'érosion hydrique est un transfert de particules organiques et minérales (mais aussi de fertilité chimique contenue dans ces particules). Pour qu'il y ait érosion, il faut tout d'abord que les particules soient détachées (on dit aussi « mise en mouvement » ou « arrachées »), puis transportées (on parle aussi de « transfert ») jusqu'à leur dépôt (ou « sédimentation »). On peut donc résumer l'érosion en :

Détachement → Transport → Dépôt

Comment la pluie se transforme en ruissellement

Trois types de ruissellement sont classiquement différenciés selon la cause de son apparition.

- **Le ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration.** C'est l'intensité de la pluie qui est le facteur déclenchant. Elle est trop importante pour que toute l'eau s'infilte. Autrement dit, la capacité d'infiltration du sol (mesurée en mm/h) est plus faible que l'intensité de la pluie. Localement (et pendant tout le temps où cette différence persiste), le refus à l'infiltration se transforme alors en ruissellement. Lorsque l'intensité de la pluie devient inférieure à la capacité d'infiltration, la génération du ruissellement s'arrête (et du ruissellement provenant de l'amont peut même s'infiltrer).
- **Le ruissellement par saturation.** La porosité du sol a été saturée par les pluies précédentes. La nouvelle averse qui arrive, même de faible intensité, ne pourra pas s'infiltrer puisque le sol est « gorgé » d'eau, ce qui va générer du ruissellement. Ce phénomène se produit alors même que la porosité du sol peut être importante : c'est le réservoir qui est plein.

Cette différence entre les causes permet de définir des types de pluies et des saisons propices à l'apparition de chacun de ces deux types de ruissellement. Le ruisselle-

ment par dépassement de la capacité d'infiltration est un phénomène qui apparaîtra plutôt lors d'une pluie (suffisamment) intense sur un sol sec. L'exemple typique est un orage. Le ruissellement par saturation demande que le sol soit préalablement saturé et l'intensité de la pluie n'est pas un facteur déclenchant. C'est plutôt une situation hivernale, apparaissant suite à un long train d'averses.

- **Le ruissellement par exfiltration.** L'eau s'est infiltrée en amont et s'est écoulée latéralement au sein du sol (ou le proche sous-sol). Les variations de la topographie, de l'épaisseur du sol ou de sa porosité permettent à l'eau de s'exfiltrer, formant ainsi du ruissellement en surface.

Le ruissellement par exfiltration est moins facile à caractériser (il ne suffit pas de « regarder » la chronique des pluies). Il faut cependant que les sols soient suffisamment humides pour que de l'eau soit transférée latéralement. On notera aussi, que pour des raisons de mécanique des sols, le ruissellement par exfiltration est prompt à générer des rigoles.

Dans tous les cas, il est relativement difficile d'estimer par des observations de terrain la cause d'un ruissellement qui a généré de l'érosion (et s'il n'a pas généré d'érosion, on ne saura probablement pas qu'il y a eu du ruissellement !).

- Le détachement. L'impact des gouttes d'eau et le ruissellement peuvent détacher des particules. Même si les particules sont déjà « libres » par rapport au sol (si elles y sont justes posées), il leur faut une force suffisante pour les mettre en mouvement. Bien sûr, s'il existe une cohésion (comme au sein de mottes de terre), il faudra une force plus importante.
- Le transport. Une fois détachée, une particule pourra être transportée par le ruissellement. La distance de transport sera très variable selon la masse volumique de la particule (débris de feuille ou particule minérale), sa taille (d'argile à gravier, voire au-delà), et le type d'écoulement (vitesse, profondeur, turbulence).
- Le dépôt. La particule va finir par rejoindre la surface du sol (ou le lit de la rivière) et s'y arrêter. Cela peut être du fait de la vitesse de sédimentation de la particule elle-même. Cela peut aussi être dû à la perte de capacité de l'écoulement à transporter les particules, stoppant ainsi leur mouvement vers l'aval. Par exemple, la pente diminuant, l'écoulement a ralenti ; ou l'eau s'infiltrant verticalement dans le sol, le débit d'eau en surface diminue et perd en vitesse.

À l'échelle locale, la survenue de l'érosion est liée à la fois aux propriétés du sol et aux propriétés du ruissellement. Ainsi, on va différencier la capacité du ruissellement à détacher et à transporter des particules (on parle d'« érosivité » du ruissellement) de la sensibilité des particules au détachement et au transport (on parle d'« érodabilité » du sol).

Érosivité et érodabilité : facteurs de contrôle

L'érosivité et l'érodabilité dépendent des conditions du milieu. Afin de pouvoir les réduire, voici une liste non exhaustive de leurs facteurs de contrôle :

- Érosivité des gouttes : taille des gouttes ; vitesse des gouttes ; intensité de la pluie ; vent ; végétation.
- Érosivité du ruissellement : débit (ou vitesse) de l'écoulement ; concentration en particules ; pente ; forme de la topographie ; végétation.
- Érodabilité du sol : teneurs en sable, limon et argile ; contenu en matières organiques ; taille des agrégats ; stabilité des agrégats ; éléments grossiers ; présence de racines ; taux d'infiltration ou d'exfiltration ; compaction ;

Érosion = Érosivité de l'eau × Érodabilité du sol

Pour qu'il y ait de l'érosion, il faut donc un ruissellement érosif et un sol érodable (voir encadré « Érosivité et érodabilité : facteurs de contrôle »). On pourra limiter l'érosion en jouant sur les deux leviers. Si le sol est très résistant (donc peu érodable), il n'y aura pas d'érosion (même si l'on a un écoulement érosif). De manière complémentaire, si le ruissellement est très peu érosif, il n'y aura pas non plus d'érosion (même si l'on a un matériau érodable). Bien sûr, en pratique, nous aurons intérêt à jouer sur ces deux leviers à la fois.

Selon la forme que prend l'érosion, on va en distinguer trois formes : (1) le splash, (2) le ruissellement diffus et l'érosion diffuse et (3) le ruissellement concentré et l'érosion concentrée.

Le splash

Le splash est le terme scientifique (si ! si !) pour qualifier les conséquences de l'impact des gouttes à la surface du sol. Une goutte d'eau, selon sa taille et sa vitesse, a une énergie cinétique très variable. Les plus petites n'ont pas assez d'énergie cinétique pour détacher et transporter des particules : leur érosivité est nulle. Leur seul effet est alors d'imbiber le sol. Au contraire, celles de plusieurs millimètres de diamètre sont capables de détacher et de transporter des particules (leur érosivité sera significative). Une goutte le fera si le matériau en surface est suffisamment érodable (« Érosion = Érosivité de l'eau × Érodabilité du sol »). Le splash peut être provoqué par les gouttes de pluie, mais aussi par les gouttes de ressuyage des arbres (qui pourront être plus grosses, mais n'auront pas forcément atteint leur vitesse de chute maximale).

Une goutte de pluie peut détacher une particule, et causer son transport (suivi de sa sédimentation). La chaîne « Détachement → Transport → Dépôt » est donc bien active. Vu son échelle très locale (une goutte d'eau de quelques millimètres de diamètre redistribuant des particules sur quelques décimètres aux alentours), on pourrait être tenté de ne pas considérer ce phénomène. À l'échelle d'une goutte, il n'y a qu'un transfert local et minuscule. Mais il y a des millions de gouttes... Si le splash d'une goutte est capable de désagréger quelques milligrammes d'une motte de terre, la désagrégation sous une pluie se chiffre en tonnes de terre par hectare. Certes, les particules n'ayant pas bien loin, il n'y aura pas d'exportation de terre, mais les particules mobilisées, en retombant, vont combler la porosité présente en surface et former une sorte de croûte. Cela peut faire significativement diminuer l'infiltration, et donc être un facteur d'apparition du ruissellement (et donc favoriser l'activation de la chaîne « Pluie → Ruissellement → Érosion »). On notera toutefois que si les gouttes de pluie arrivent sur des feuilles mortes ou de la litière, la désagrégation par le splash ne surviendra pas, les feuilles et la litière faisant « écran ». Ainsi un moyen simple de se prémunir des conséquences de l'effet splash est de limiter la présence de sol minéral nu en surface. Il faut pour cela conserver une couverture organique protectrice à la surface du sol minéral, notamment lors des opérations

d'exploitation ou de plantation, en privilégiant par exemple le broyage et la répartition homogène d'un mulch de rémanents plutôt qu'une mise en andains, et en évitant de devoir travailler le sol.

Le ruissellement diffus et l'érosion diffuse

Le ruissellement peut prendre la forme d'une lame d'eau peu épaisse (quelques millimètres) et s'écoulant lentement (quelques décimètres par seconde) à la surface du sol. Ce type de ruissellement peut concerner de très grandes surfaces, d'où le terme de « ruissellement diffus ». Du fait de sa faible vitesse, ce ruissellement n'est pas capable d'arracher des particules minérales (autrement dit son érosivité est nulle). Le ruissellement diffus serait donc un écoulement d'eau claire ? Pas si simple... Comme le ruissellement diffus se produit sous la pluie (on laisse le cas de fonte de neige de côté), il est impacté en permanence par des gouttes de pluie. Et c'est là que l'on reparle du splash ! Comme déjà vu, les gouttes de pluie peuvent assez facilement avoir une érosivité significative. Ainsi les gouttes de pluie vont détacher des particules, et ces particules vont retomber dans l'écoulement diffus. C'est ainsi que le ruissellement diffus se charge en particules et, en s'écoulant vers l'aval, crée une érosion diffuse. Les impacts des gouttes de pluie ont un second effet : du fait de l'agitation qu'ils causent dans la lame d'eau, ils vont perturber la sédimentation des particules. Celles-ci vont ainsi voir leur distance de transfert largement augmenter. Toujours est-il que cette érosion diffuse n'a rien de spectaculaire (mais attendez, on va bientôt parler d'érosion concentrée !). Elle peut cependant concerner de très grandes surfaces au sein des bassins versants. De plus, les particules organiques peuvent flotter à la surface du ruissellement diffus et avoir ainsi des distances de transferts très importantes, même si les particules minérales restent en place.

Le ruissellement concentré et l'érosion concentrée

Du fait de légères inflexions latérales de la topographie (pas besoin d'avoir de « vrais » talwegs), les lames d'eau ruisselantes (ruissellement et érosion diffuse) peuvent se concentrer localement. L'épaisseur de l'écoulement et sa vitesse augmentent alors, donnant à l'écoulement une érosivité significative. Ainsi, ce ruissellement concentré est capable de détacher par lui-même des particules minérales (même des particules grossières !). Cela crée de l'érosion concentrée. On notera que le terme « concentré » ne fait pas référence à la concentration des particules dans l'écoulement (que l'on mesure en g/l), mais au fait que ce ruissellement et cette érosion sont concentrés (« localisés ») sur une toute petite surface des versants. Ce sont des incisions dans la topographie : les rigoles et les ravines. Du fait de leurs formes allongées, on parle aussi d'érosion linéaire. Ce type d'érosion se voit facilement (on a des incisions sous les yeux), contrairement à l'érosion diffuse et au splash qui, eux, passent bien souvent inaperçus. On peut ainsi être amené à considérer qu'un secteur ne connaît pas d'érosion des sols, alors qu'en fait, on a juste diagnostiqué l'absence de la forme concentrée de l'érosion.

L'érosion concentrée est un phénomène majeur en termes de volume de sol érodé. Faut-il en oublier l'érosion diffuse ? Pas si vite ! D'où vient l'eau transportant les particules de l'érosion concentrée ? Du ruissellement diffus ! (hors le cas d'un ruissellement par exfiltration). Ainsi, le ruissellement diffus étant à l'origine du ruissellement concentré, les ravines ne sont qu'un symptôme. Si on les rebouche sans traiter sa cause — le ruissellement diffus — il y a fort à parier que la ravine réapparaisse.

Les 3 formes d'érosion sont liées entre elles. On peut ainsi écrire :

Splash seul → Ruissellement diffus et érosion diffuse (liée au splash) → Ruissellement concentré et érosion concentrée

Ainsi, pour limiter le ruissellement (et l'érosion) concentré, il faut lutter contre le ruissellement diffus. Et pour limiter ce dernier, on peut être amené à lutter contre le splash car le splash casse les mottes de terre, fait diminuer l'infiltration de l'eau, et favorise ainsi l'apparition du ruissellement diffus.

Contrairement à ce que l'on pouvait envisager avec le splash seul, l'érosion des sols n'est pas un processus simplement local : il s'agit d'un transfert de matières qui peut se faire sur des distances plus ou moins importantes. Si les transferts se font sur de courtes distances, les conséquences pourraient être limitées à l'intérieur d'une parcelle. L'enjeu sera alors essentiellement sur la redistribution de fertilités chimique, physique et biologique (voir encadré Fertilités). On est alors seulement sur une problématique de gestion durable de la production forestière. Si les transferts se font au-delà des parcelles, se rajoute alors la problématique de gestion des infrastructures (dessertes par exemple) et des milieux (écosystèmes aquatiques par exemple). Aussi, pour limiter l'érosion, aborder l'aspect spatial est déterminant. Dans le cas de l'érosion hydrique, le transfert se fait de l'amont vers l'aval (ce n'est pas le cas de l'érosion éolienne, par exemple) :

Amont → Aval

Globalement, ce sont les zones amonts qui vont alimenter les secteurs en aval. Les zones les plus amonts connaîtront des pertes en terre. Les zones les plus avals seront enrichies en sédiments. Quant aux zones intermédiaires, leur bilan peut être très variable, d'une perte nette à un gain net de terre selon les circonstances. Le ruissellement va s'écouler selon des directions prévisibles. On pourra donc chercher à identifier les chemins potentiels de l'écoulement. Ce peut être réalisé dans un SIG ou par des observations de terrain. Ces chemins potentiels seront des chemins réels d'écoulement si du ruissellement apparaît. En pratique, le ruissellement et l'érosion étant des phéno-

mènes très limités dans le temps, on les observe rarement en direct sur le terrain. Et quand on les observe, ce n'est que ponctuellement, car on ne peut pas être partout dans la forêt lors d'un épisode pluvieux ruisselant. En pratique, ce seront donc uniquement les traces qu'ils ont laissées que l'on pourra retrouver. Certaines seront tout à fait évidente (ravine) ; d'autres seront plus discrètes (griffures, dépôts de sédiments), voire invisibles (splash, ruissellement au sein des horizons du sol).

Pour comprendre l'enchaînement et mettre en place une lutte efficace, il est important de s'intéresser aux chemins pris par le ruissellement et les particules, à la localisation des ravines, aux points d'entrées des particules dans le réseau hydrographique, etc. Trois notions sont utiles pour aborder cet aspect spatial :

Chemins d'écoulement, connexion et distance de transferts

Limiter l'érosion va consister à limiter la longueur des chemins d'écoulement, car un chemin plus long signifie que, potentiellement, l'eau prend de la vitesse, les volumes d'eau et de particules emportées augmentent, les transferts se font loin de la source et la longueur d'incision est plus importante. On va donc tenter de diminuer les distances de transferts de l'eau et des particules. Afin de préserver la fertilité des sols dans les parcelles, on cherchera à créer les conditions pour que ces distances de transferts soient les plus faibles possibles, et en tout cas bien inférieure à la taille de la parcelle. Au mieux, il n'y aura plus de transferts latéraux (tout le ruissellement s'infiltrant sur place). À une autre échelle, on va identifier les connexions dans le paysage et tenter de les interrompre (par des aménagements spécifiques). Certains aménagements vont jouer à la fois sur les distances de transfert de l'eau et des particules (en ralentissant le ruissellement, ils piègent aussi les particules). D'autres n'auront un effet que sur la distance de transfert des particules (en favorisant la sédimentation, mais sans diminuer le débit d'eau). Cela peut paraître simple au premier abord ; il faut toutefois garder à l'esprit que les chemins d'écoulement dépendent des « détails » de la topographie (détails qui sont souvent invisibles dans un SIG : un fossé ou une légère contre-pente modifieront très fortement ces chemins alors qu'ils sont de taille très modeste par rapport aux autres éléments du paysage).

Les fertilités d'un sol

Par défaut, lorsque l'on parle de fertilité d'un sol, cela fait souvent référence aux nutriments qu'il contient. Or, pour croître, les arbres ont besoin de plus que des éléments minéraux du sol. Cela nous amène à considérer trois fertilités (on parle aussi de « composantes de la fertilité »).

La fertilité chimique

La fertilité chimique est celle qui vient le plus souvent à l'esprit. Elle fait référence aux éléments minéraux qui peuvent être extraits du sol par les racines pour faire croître la forêt. En effet, tous les éléments minéraux contenus dans un sol ne peuvent pas être extraits par les racines : une partie (parfois importante) des éléments minéraux sont prisonniers dans les roches ou dans la matière organique. Ils sont bien présents dans le sol, mais ne seront pas disponibles rapidement pour nourrir les arbres et les autres strates végétales. Les roches devront s'altérer et les matières organiques se minéraliser pour libérer et rendre disponible les éléments qu'elles contiennent. C'est pour cela que l'évaluation de la fertilité chimique d'un sol ne passe pas par des analyses totales (qui mesurent la totalité des éléments présents), mais par des analyses spécialisées qui miment les capacités d'extraction des racines. On notera que ces analyses sont imparfaites, amenant parfois à de mauvaises évaluations de la fertilité chimique.

La fertilité physique

La fertilité physique regroupe les propriétés physiques du sol permettant l'installation et la croissance de la végétation (comme l'accès à l'eau et les obstacles empêchant la croissance des racines). L'eau doit pouvoir circuler dans le sol depuis sa surface. Elle doit aussi pouvoir être retenue dans le sol et ne pas être drainée trop rapidement et entièrement en profondeur. De même, de l'oxygène doit être disponible pour la respiration des racines. Ces circulations et ce stockage sont assurés par la porosité des horizons du sol, qui dépend notamment de la structure du sol, c'est-à-dire de l'agencement des parties solides et des « trous », appelés pores. Pour qu'un sol ait une bonne fertilité physique, une partie de la porosité doit être capable de conduire l'eau et l'air (les pores de plus grandes tailles, connectés à la surface). Et il suffit parfois d'un horizon pour tout bloquer : soit un horizon en surface (prise en masse, tassement dû aux engins), soit en profondeur (très argileux par exemple). Une autre partie de la porosité doit pouvoir retenir l'eau. Il s'agit de pores ni trop gros (qui, dans ce cas, laisseraient l'eau s'écouler), ni trop petits (qui piègeraient l'eau avec tellement de force que les racines ne seraient pas capables de la prélever). Enfin, la structure du sol doit être suffisamment résistante pour conserver ces porosités, mais pas trop non plus pour que les racines puissent croître. La fertilité physique, bien qu'essentielle, repose sur plusieurs propriétés physiques des sols et elle s'avère ainsi relativement difficile à évaluer.

La fertilité biologique

Les nutriments présents dans la matière organique du sol ne sont pas directement disponibles pour la végétation et il faut donc qu'ils soient préalablement libérés par des décomposeurs (champignons, bactéries, insectes, etc.).

Il en est de même pour les éléments minéraux piégés dans les roches, qui devront s'altérer (entre autres grâce à des bactéries) pour les libérer. La porosité d'un sol ne se crée pas non plus « par elle-même » : la faune du sol y contribue, notamment les lombrics qui sont bien connus pour les galeries qu'ils creusent et qui pourront ensuite servir à la circulation de l'eau et de l'air. La végétation contribue également à la fertilité biologique, au travers notamment des retours au sol de matières (feuilles, branches...) ou des interactions avérées avec les organismes du sol. Une bonne activité biologique repose sur le bon fonctionnement de chaînes alimentaires et du recyclage des éléments au sein de l'écosystème (qualifié de cycle biologique). En forêt, la forme d'humus indique les acteurs biologiques présents dans le sol et à sa surface. La fertilité biologique d'un sol peut être également évaluée via des inventaires des différents organismes vivants dans le sol, de manière directe (extraction et identification) ou indirecte (par exemple avec l'ADN environnemental).

Ainsi, la fertilité d'un sol est une notion plus complexe qu'il n'y paraît. Elle inclut trois composantes qui interagissent entre elles. Aucune n'est simple à évaluer et chacune nécessite des méthodes particulières. La fertilité ? Tout sauf élémentaire !

La fertilité des sols forestiers

Si les facteurs de formation des sols sous forêt sont les mêmes que sous les cultures annuelles, les sols forestiers sont chimiquement plus pauvres que les sols agricoles. En effet, depuis un siècle, la surface forestière française a doublé et les surfaces colonisées par la forêt sont celles présentant les sols les plus difficiles à cultiver ([Observatoire des forêts françaises \(ign.fr\)](http://observatoire-des-forets-francaises.ign.fr)), soit très acides, soit très carbonatés, soit très superficiels, soit davantage soumis à un engorgement temporaire par une nappe asphyxiante (Badeau et al. 1999 ; Ranger et al. 2000). Les écarts de fertilité chimique entre sols forestiers et sols agricoles ont été creusés par des pratiques anciennes en forêt comme le soutrage (export de litière depuis le milieu forestier vers le milieu agricole) et les récoltes intensives de bois pour l'énergie. Les pratiques agricoles entretiennent cet écart via la fertilisation des sols ou les chaulages réguliers pour corriger leur acidité.

Les sols forestiers sont plus riches en matières organiques que les sols agricoles, de par le couvert végétal permanent ou quasi-permanent des forêts, leur enracinement pérenne et la très faible occurrence du travail du sol. Les sols forestiers étant plus riches en matière organique et étant très rarement perturbés mécaniquement, ils sont moins denses et présentent une plus faible résistance à la prospection racinaire que les sols agricoles (Blanco-Canqui et al 2005).

La gestion forestière ne cherche en général pas à modifier les sols pour produire une essence en particulier. En effet, les forêts ne sont pas irriguées et ne sont pas fertilisées (en dehors de la culture du peuplier et du pin maritime qui bénéficient d'une gestion agronomique). Aussi, il est nécessaire de trouver les essences adaptées aux contraintes et potentialités de chaque situation pour maintenir durablement les fonctions et services associés à la forêt.

Méthode générale de lutte contre l'érosion

La méthode générale de lutte contre l'érosion se veut comme un ensemble d'actions hiérarchisées visant à limiter l'érosion des sols ou ses conséquences. Bien sûr, il sera à adapter en fonction de chaque contexte et de la problématique. Ainsi, ce texte n'est pas un manuel de lutte contre l'érosion des sols en milieu forestier : il ne s'agit pas de définir les actions à réaliser sur le terrain. Ceux-ci sont toujours le résultat de choix spécifiques, dans des conditions particulières. Nous visons plutôt à favoriser une démarche se basant sur la connaissance des processus d'érosion des sols. Cette démarche doit permettre de s'interroger sur les phénomènes se produisant sur le terrain et de s'assurer de ne pas avoir fait d'impasse sur certains aspects. Elle se place en amont de la liste des actions à mener et aide à les préciser. Les exemples donnés servent à illustrer la méthode et ne constituent pas des prescriptions.

La méthode générale se base sur les connaissances fondamentales des processus érosifs mentionnées dans la partie « Mais que ce passe-t-il ? ». Pour rappel, les principes généraux mentionnés sont les suivants :

Pluie → Ruissellement → Érosion

Splash seul → Ruissellement diffus et érosion diffuse (liée au splash) → Ruissellement concentré et érosion concentrée

Détachement → Transport → Dépôt

Érosion = Érosivité du ruissellement × Érodabilité du sol

Chemins d'écoulement, connexion et distance de transferts

Amont → Aval

Un aspect essentiel dans la démarche proposée — mais un peu troublant — est de s'extraire du constat de terrain (rigoles, turbidité des cours d'eau, etc.) : ce n'est pas parce qu'on a noté le ravinement d'une piste que la première chose à faire est de combler l'incision. Ici, on propose plutôt de réfléchir à la cause du problème pour, dans un second temps, proposer une gamme de solutions.

En premier lieu, on va chercher à ne pas avoir de ruissellement (ou tout le moins à le limiter). Cela peut se faire par interception de la pluie (gestion du couvert forestier, notamment en évitant les coupes rases et l'exportation des menus bois) ou par une favorisation de l'infiltration (en limitant le compactage des sols par exemple). Et si l'on pense que l'on peut tout de même avoir du ruissellement, on cherchera alors à limiter l'érosion.

Au niveau de l'érosion, on s'intéressera d'abord au splash (est-ce que, dans le contexte particulier, ce processus est actif ?), puis à l'érosion diffuse, et enfin à l'érosion concentrée. Dans chaque cas, on commencera par viser une limitation du détachement (en évitant le travail du sol par exemple), puis du transport (en évitant par exemple l'andainage dans le sens de la pente et en favorisant le dépôt des particules). Pour cela, on pourra mettre en place des actions limitant l'érosivité des écoulements comme des actions diminuant l'érodabilité des sols. Si du ruissellement et de l'érosion se produisent, il faudra que des actions soient mises en place le long des chemins d'écoulement. On mènera la réflexion depuis l'amont, vers l'aval. On cherchera à limiter les connexions amont-aval et les distances de transferts. En complément, on pourrait être amené à aménager des chemins d'écoulement et des connexions : on redirige les flux venant de l'amont (avec des fossés ou des revers d'eau pour protéger les pistes) vers des zones moins sensibles, ou en favorisant l'infiltration et la sédimentation.

Quels effets des pratiques sylvicoles sur le ruissellement et l'érosion ?

Une expertise collective a été réalisée sur les coupes rases et le renouvellement des peuplements forestiers en contexte de changement climatique (Lien [ici](#)). Elle comportait un volet sur l'érosion des sols. Deux cas opposés ont été comparés : la réalisation d'une coupe rase face à un témoin non récolté. Grâce à un passage en revue de la littérature scientifique, cette sélection de cas opposés devait permettre de mettre en évidence assez facilement les effets d'une coupe rase.

Une coupe rase augmente le risque de ruissellement et d'érosion car elle fait disparaître le couvert forestier (diminution de la protection des sols face aux précipitations) et crée un tassement des sols liés au passage des engins (diminution de l'infiltration, orniérage créant des collecteurs à ruissellement). Toutefois, le ruissellement et l'érosion n'apparaissent pas systématiquement ! Certaines études montrent une augmentation du risque, d'autres un risque comparable (et aucune ne montre un risque diminué). Pourquoi une réponse non unanime ? Les modalités de réalisation d'une coupe rase sont très diverses (engins de débardage, mise en place de cloisonnement, devenir des menus bois, etc.), tout comme les conditions du milieu (type de sol, pentes, humidité au moment de la coupe, présence d'une strate herbacée). De plus, selon certaines études, les capteurs de mesure sont très en aval de la zone coupée, les sédiments pouvant alors être piégés avant d'arriver aux capteurs. Malheureusement, les articles scientifiques ne mentionnent que trop rarement tous ces paramètres. Il est donc difficile d'expliquer pourquoi certaines études observent une augmentation du ruissellement et de l'érosion alors que d'autres ne le font pas. Quelques pistes peuvent être envisagées, mais elles ne sont basées que sur un faible nombre d'études, comme celle d'Edeso

et al. (1999) qui montre que le taux d'érosion hydrique des sols augmente considérablement avec l'intensité des perturbations. D'un taux d'érosion inférieur à 1 tonne par hectare et par an (t/ha/an) sous une forêt mature avant sa coupe, on passe à 7 t/ha/an après enlèvement du couvert mais avec restitution des rémanents. L'enlèvement du couvert associé à l'exportation des rémanents amène à un taux d'érosion de 35 t/ha/an. Le taux d'érosion atteint même 70 t/ha/an lorsque l'enlèvement du couvert est associé à une exportation des menus bois et à l'usage du travail du sol. Soixante-dix t/ha/an, cela représente environ 7 millimètres de sol de perdu en une année. Or, la production naturelle de sol est inférieure à 1 t/ha/an, soit une augmentation d'épaisseur de sol de moins d'un dixième de millimètre chaque année. Autant dire que la perte est définitive ! Il est à noter que dans la modalité la plus respectueuse, l'érosion de 7 t/ha/an (soit 7 dixièmes de millimètre

par an) est déjà bien au-delà du taux de production naturelle du sol, et n'est donc pas durable.

En fait, le phénomène érosif est mal quantifié et assez peu étudié en forêt (il est mieux quantifié en domaine agricole, quoique très imparfaitement). Cela limite ainsi notre capacité à proposer des solutions opérationnelles basées sur des connaissances scientifiques. Si de nouvelles expérimentations ont démarré, il faudra du temps pour en extraire de nouvelles connaissances (voir encadré « Mesurer l'érosion en forêt »). En attendant, des précautions et des bonnes pratiques doivent continuer à être mises en œuvre, sur les bases des connaissances générales sur l'érosion et en appliquant des règles simples.

Protéger les sols ou les milieux et infrastructures en aval : la lutte contre l'érosion, une histoire de compromis ?

Il peut y avoir plusieurs raisons de vouloir limiter l'érosion des sols. La plus évidente est probablement de garder les sols en place, et ainsi préserver entre autres leurs fertilités chimique, physique et biologique. On assure ainsi une croissance pérenne des peuplements sur le long terme. Il s'agit donc de préserver le patrimoine « sol », capital de production pour les forestiers à des échelles de temps supérieures à celles d'un individu (humain). La formation des sols est très lente (plutôt des millénaires que quelques siècles), et si l'on laisse « partir » le sol, il ne faut pas espérer le récupérer. On peut aussi vouloir préserver les infrastructures de circulation en milieu forestier : il s'agit alors de limiter, par exemple, le comblement des fossés ou l'incision des pistes. Il peut aussi s'agir de préserver les milieux situés en aval des zones érodées : des zones humides que l'on ne veut pas voir comblées de sédiments, ou des cours d'eau dont l'augmentation de turbidité ou de la charge en matières organiques dégrade l'écosystème aquatique. Enfin, on peut aussi vouloir préserver les infrastructures et les populations des coulées boueuses (voir article sur le risque torrentiel).

Ces différents enjeux vont faire appel à des moyens potentiellement différents. Et parfois, les moyens de protéger un enjeu vont aller à l'encontre de la protection d'un autre...

Prenons le cas d'un bassin versant avec deux secteurs pédo-logiques : un secteur a des sols profonds, riches et peu

caillouteux, l'autre a des sols minces, pauvres et caillouteux. Si les moyens disponibles pour lutter contre l'érosion sont limités, il faut faire des choix :

- Si l'on cherche à préserver la productivité, on pourrait avoir intérêt à protéger d'abord les sols pauvres, car ils pourraient rapidement devenir improductifs à la suite d'une érosion, même limitée. Les sols riches, eux, vont le rester longtemps, même en cas d'érosion significative.
- Si l'on cherche à limiter les conséquences en aval, on aurait plutôt intérêt à focaliser la lutte contre l'érosion sur les sols riches. En effet, ces sols sont capables de produire une très grande quantité de particules, et donc leur érosion peut entraîner de grandes conséquences. Au contraire, l'érosion des sols pauvres, qui n'ont déjà plus beaucoup de particules disponibles, peuvent n'avoir que des effets limités sur les milieux en aval.

Ainsi, protéger les sols ou les milieux en aval peut amener à des décisions opposées en termes de priorité de lutte contre l'érosion. Il est donc crucial de bien identifier les enjeux auxquels on s'intéresse à l'échelle d'un massif ou d'un bassin versant. Il faut ensuite fixer des priorités, puis réfléchir à l'ensemble des actions à conduire. Dans le meilleur des cas, on arrive à trouver des synergies, permettant de préserver à la fois la ressource en sol, les milieux et les infrastructures en aval.

Mesurer l'érosion en forêt

Mesurer l'érosion en forêt peut avoir plusieurs objectifs : étudier les processus d'érosion, étudier les conséquences des pratiques ou évaluer des méthodes de lutte contre l'érosion. Pour chacun de ces objectifs, des méthodes différentes existent. Nous vous présentons ici deux méthodes mises en œuvre par l'unité de recherche BEF (Biogéochimie des Écosystèmes Forestiers) du centre INRAE Grand-Est Nancy.

Un dispositif INRAE-ONF de suivi du ruissellement et de l'érosion en forêt domaniale de Senones (Vosges)

Consciente du manque de connaissances sur le ruissellement, l'érosion et les transferts latéraux de nutriments en domaine forestier, l'unité de recherche BEF et l'ONF ont mis en place un site expérimental permettant de mesurer ces phénomènes sur une parcelle forestière localisée en forêt domaniale de Senones (Vosges). Le site a tout d'abord été caractérisé pour assurer que la topographie, l'orientation, le peuplement et le sol étaient similaires sur les trois placettes expérimentales installées.

Chaque parcelle expérimentale (300 m²) est délimitée par une barrière étanche (photo 1) afin que le ruissellement et l'érosion collectés en aval ne proviennent pas d'ailleurs. Cette précaution permet d'étudier le lien entre l'érosion diffuse et les manipulations expérimentales réalisées sur chaque placette. À l'exutoire, des mesures de turbidité, d'oxygénation, de conductivité et de température sont effectuées en continu (photo 2). Lors d'un événement ruisselant, un échantillonneur automatique prélève un volume d'un litre, pour analyse ultérieure. Les débits sont ensuite mesurés par un auget basculeur (photo 3), puis un partiteur permet de collecter 10 % des flux d'eau et de particules dans un bidon totalisateur. Une visite de terrain est effectuée tous les deux mois pour ramener les échantillons au laboratoire et vérifier le fonctionnement du dispositif (dont une station météo).

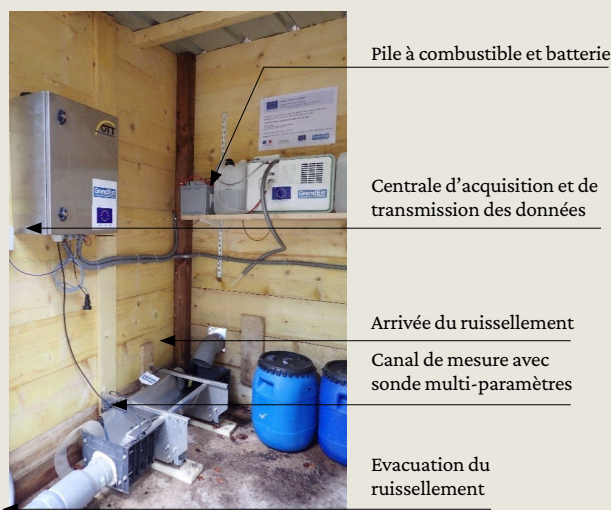
Entre 2017 et 2022, les trois parcelles n'ont pas été exploitées. Cette période a permis de fiabiliser le fonctionnement des instruments et de s'assurer que les parcelles se comportaient sensiblement de la même manière en termes de ruissellement et d'érosion.

En janvier 2023, tous les arbres et tous les résidus ont été enlevés sur deux des trois placettes et dans une zone tampon de 25 m autour d'elles. La quantité de sédiment collectée ne correspondra qu'aux 300 m² de chaque placette, imitant ainsi l'impact de coupes de faible ampleur sur l'érosion diffuse. Une des deux placettes a fait l'objet de deux allers-retours d'un débusqueur de 10 tonnes dans le sens de la pente (soit un pourcentage de surface circulée d'environ 10 %). La troisième parcelle a été gardée intacte pour servir de référence (c'est le témoin).

Il ne s'agit pas, dans ces travaux de recherche, de reproduire les pratiques des forestiers ONF en forêt vosgienne, mais d'être en mesure, à terme, de mieux comprendre comment fonctionne le ruissellement et l'érosion en forêt : l'effet du couvert végétal arboré, celui d'un tassement modéré et partiel du sol, etc. Les mesures se poursuivront quelques années avant que des conclusions soient tirées.



↑ Photo 1 : Vue de l'aval vers l'amont de l'une des placettes de Senones. La cabane contient les instruments de mesures. Une barrière étanche, installée verticalement, permet de délimiter la placette et de collecter le ruissellement.



↑ Photo 2 : Vue de l'intérieur de la cabane, par où le ruissellement transite pour les mesures de qualité de l'eau.

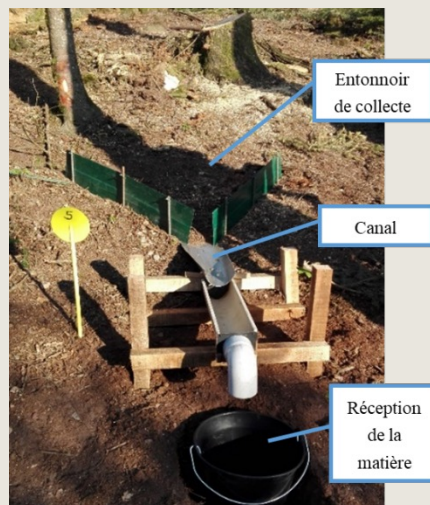


↑ Photo 3 : A la suite de la mesure de la qualité de l'eau effectuée dans la cabane, la quantité de ruissellement est évaluée dans un auget basculeur. Les particules sont ensuite piégées dans un partiteur (non figuré sur la photo).

Mesurer l'érosion en forêt (suite)

Un dispositif léger de suivi du ruissellement et de l'érosion en forêt

Consciente que les dispositifs tels que celui de Senones sont lourds et coûteux à mettre en place et à gérer, l'unité de recherche BE, en partenariat avec le CNPF, a testé un dispositif léger pour suivre le ruissellement et l'érosion en forêt. Il permet de multiplier les mesures en contexte opérationnel, et donc d'améliorer la quantification des effets de différentes pratiques forestières. Avant l'installation, un diagnostic de la situation avec un relevé de l'état de surface du sol (végétation, rugosité, etc.) et des conditions du milieu est effectué. Pour le dispositif proprement dit (Photo 4), du matériel léger, bon marché et facilement transportable a été choisi. Il s'installe simplement et peut persister plusieurs mois sans modifications. Il demande toutefois des passages réguliers (mensuel ou après des événements majeurs) pour évaluer l'occurrence de ruissellement et mesurer les pertes en terre.



↑ Photo 4 : Vue d'un dispositif léger

Simuler l'érosion des sols pour la limiter ?

Il est aujourd'hui courant d'utiliser des modélisations numériques pour simuler les phénomènes et tenter de les atténuer. Actuellement, il n'y a pas d'outil général faisant référence pour les problèmes d'érosion des sols en forêt. Des outils existent bien (tels ceux du USDA Forest Service : Lien [ici](#)), mais ils sont à manier avec précaution. La paramétrisation des simulations est difficile (du fait d'un manque de données combinées à des processus complexes), et les résultats des modèles d'érosion pour le moins imprécis même dans des contextes relativement simples (Jetten et

al., 1999). Aussi, on se gardera de « croire » aux sorties des modèles. Il ne s'agit pas ici de dissuader le lecteur d'utiliser de la modélisation, mais d'attirer son attention sur le fait que ces modèles sont des outils d'aide à la décision, et ne sont que cela. Ils servent à réfléchir à des scénarios d'aménagement et à des combinaisons d'actions, mais ne proposent pas par eux-mêmes de solutions. Ainsi, le modélisateur est toujours amené à exercer une réflexion critique sur les résultats des modèles.

Frédéric Darboux

INRAE – Institut des Géosciences de l'Environnement

Arnaud Legout

INRAE – Unité de recherche Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers

Noémie Pousse

ONF - Département Recherche, Développement et Innovation

Baptiste Algayer

INRAE - Bureau d'études : Au fil du sol - Expertise et formations

RÉFÉRENCES

- Badeau, V., Dambrine, E., Walter, C., 1999. Propriétés des sols forestiers français : résultats du premier inventaire systématique. *Etude et Gestion des Sols*, 6(3), pp. 165-180. Blanco-Canqui H., Lal R., Owens LB., Post WM., Izaurralde RC., 2005. Strength properties and organic carbon of soils in the North Appalachian region. *Soil Science Society of America Journal*, 69 (3), pp. 663-673.
- Edeso JM., Merino A., González, MJ., Marauri, P., 1999. Soil erosion under different harvesting managements in steep forestlands from northern Spain. *Land Degradation and Development*, 10, pp. 79-88.

- Jetten V., de Roo A., Favis-Mortlock D., 1999. Evaluation on field-scale and catchment-scale soil erosion models. *Catena*, 37, pp. 521-541.
- Ranger J., Badeau V., Dambrine E., Dupouey JL., Nys Claude, et al., 2000. Evolution constatée des sols forestiers au cours des dernières décennies. *Revue forestière française*, 52 (sp), pp.49-70.

