
L'encroûtement superficiel des sols et la récolte du ruissellement

2.1. États de surface et croûtes superficielles

Les *états de surface*, éléments essentiels de la zone critique, comprennent le couvert végétal et la surface du sol [CAS 89]. Aux échelles larges, ils se caractérisent par télédétection spatiale [DHE 97]. Sur le terrain, les principaux paramètres de la végétation généralement pris en compte sont ceux qui ont une incidence sur la genèse du ruissellement et l'érosion des sols (chapitres 3 et 4) : pourcentage de couvert, hauteur de chute des gouttes, densité, nombre de strates. Il en est de même pour ceux de la surface des sols *stricto sensu* : la litière, les constructions et pores d'origine faunique (vers, fourmis, termites, etc. [JOU 08, JOU 12]), la rugosité naturelle aléatoire et la rugosité résultant du travail du sol, la présence d'agrégats et d'éléments grossiers, libres ou inclus dans une croûte (figure 2.1), les types de croûte. La plupart de ces variables sont exprimées sous forme de pourcentages.

Les *croûtes superficielles physiques* se caractérisent par une très faible macroporosité. Elles « scellent » la surface du sol, d'où le terme *seal* utilisé en anglais pour désigner les croûtes à l'état humide. Du fait de leur dureté à l'état sec, elles ont tendance à protéger les sols de l'érosion hydrique *in situ*. Toutefois, comme elles favorisent le ruissellement, elles augmentent le risque à l'aval d'érosion en rigoles ou ravines (voir chapitre 3). Plusieurs types de croûtes physiques peuvent être distinguées (figure 2.1 et paragraphe 2.2, [VAL 92a]), dont les croûtes structurales pour lesquelles les déplacements de particules sont limités à quelques centimètres et où la rugosité des agrégats d'origine est encore reconnaissable, les croûtes d'érosion lisses et souvent très dures, et les croûtes grossières qui incluent des éléments grossiers.

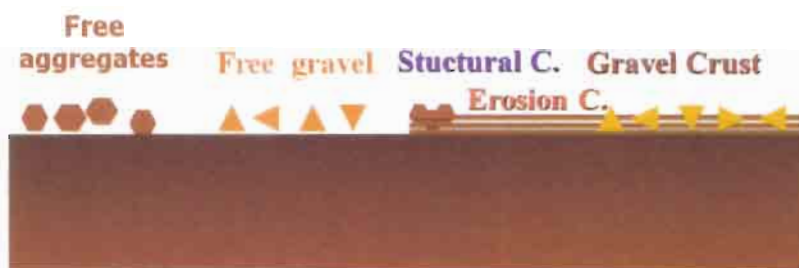


Figure 2.1. Agrégats et éléments grossiers libres, croûte structurale (agrégats inclus), croûte d'érosion et croûte grossière (éléments grossiers inclus)

Les croûtes superficielles sont caractérisées sur le terrain par leur morphologie : la nature et la succession verticale de leurs microhorizons, leur épaisseur et leur porosité. Du fait de leur très faible épaisseur, elles sont également examinées au laboratoire en utilisant des microscopes optiques ou électroniques à balayage (MEB) [VAL 92a] et de plus en plus fréquemment l'imagerie tomographique RX qui permet une reconstitution 3D [BAD 13, RIB 11]. Leur dureté, ou résistance à la pénétration, est mesurée à l'aide de pénétromètres, soit sur le terrain soit au laboratoire [MON 14]. Cette dureté, exprimée en résistance à la pénétration, s'oppose à la levée des semences [GAL 07] et provoque ainsi une hétérogénéité du peuplement végétal cultivé. L'étude de leur processus et facteurs de formation est facilitée par l'utilisation de simulateurs de pluies de terrain [POD 08, RIB 11] ou de laboratoire [MOR 14] qui reproduisent les conditions d'intensité, de durée et de hauteur de pluie ainsi que d'énergie cinétique, analogues à celles des pluies naturelles. Les facteurs de formation peuvent aussi être déduits de relevés successifs sur un même site ou de prospections cartographiques. En vue de prévoir la sensibilité des sols à la désagrégation et donc à l'encroûtement, de très nombreux tests de laboratoire ont été développés [AME 99, MON 14]. L'un des plus utilisés en France est celui proposé par Le Bissonnais [LEB 96], qui essaye de reconstituer les principaux facteurs de formation des croûtes structurales.

2.2. Types de croûtes et processus de formation

2.2.1. Croûtes structurales

En vue de prévoir leur infiltrabilité, c'est-à-dire leur capacité d'infiltration (paragraphe 2.4.1), il importe de distinguer plusieurs types de croûtes structurales [VAL 92a] :

- de *coalescence* : relativement épaisses (jusqu'à 1 cm), elles se forment sous un tassement progressif d'agrégats déjà humides sous l'effet de pluies (paragraphe 2.3.2) ;
- de *remplissage* : les limons fins détachés par la pluie de la surface des agrégats et illuviés comblent peu à peu la porosité interagrégats ;
- d'*éclatement*, qui se forment lors d'une brusque humectation d'agrégats limoneux du fait de la compression de l'air dans la porosité capillaire ;
- d'*agglomération* [RIB 11], qui apparaissent sous l'effet de pluies fortes sur des sols tropicaux micro-agrégés ;
- de *tamissage*, où l'impact des gouttes de pluie sur des sols sableux provoque une redistribution en microhorizons avec les sables les plus grossiers en surface, les sables fins au milieu, et les particules fines, très tassées, au fond, emprisonnant des vésicules d'air (figure 2.3).



Figure 2.2. À gauche : croûte structurale (ST), croûtes de dépôt (SED), facilitant la formation d'une rigole (R), sol limoneux issu de lœss, pays de Caux, France. À droite : microprofil d'une croûte grossière, des éléments grossiers sont inclus (G) dans la croûte ponctuée de nombreuses vésicules (V), bassin du Tin Adjar, Gourma, Mali (photos : C. Valentin).

2.2.2. Croûtes grossières

Elles se définissent par des éléments grossiers inclus dans une croûte structurale [VAL 92b] (figures 2.1, 2.2 et 2.7). À l'inverse des éléments grossiers libres, ils ne peuvent pas être extraits facilement de la surface du sol. Dans les régions arides, ces croûtes grossières forment les pavages désertiques, appelés communément « regs ». Comme les croûtes structurales de tamissage, ces croûtes grossières emprisonnent des vésicules d'air (figure 2.2) qui reflètent une très faible infiltrabilité (figures 2.2 et 2.6).

2.2.3. Croûtes d'érosion

Ces croûtes se définissent par leur caractère lisse [VAL 92a]. Elles résultent de l'érosion par l'eau de croûtes structurales :

- limoneuses ou argileuses : la rugosité liée aux agrégats d'origine disparaît sous l'effet du tassement et du ruissellement ;
- sableuses : les deux microhorizons sableux superficiels sont érodés par l'eau et le vent, menant à l'affleurement du microhorizon où se sont concentrées les particules fines qui se trouvent encore plus tassées par la pluie. Dans ce dernier cas, les croûtes d'érosion très dures, et très peu perméables, peuvent être sujettes à l'abrasion par le sable environnant projeté par le vent (figure 2.4 et chapitre 3).

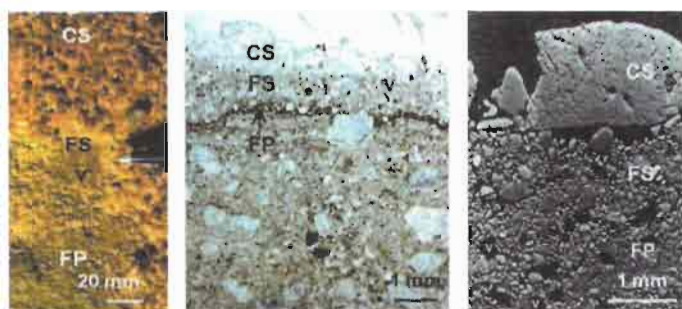


Figure 2.3. Croûte structurale de tamisage. À gauche, vue du dessus, les microhorizons ont été dégagés au pinceau : CS : sable grossier, FS : sable fin, FP : particules fines ($< 50 \mu\text{m}$), v : vésicule d'air. Au centre : vue en coupe verticale sur une lame mince. À droite : vue en coupe verticale, au microscope électronique à balayage (photos : C. Valentin).

2.2.4. Croûtes de dépôt

Il existe trois grands types de croûtes de dépôt selon les processus impliqués [CAS 89, VAL 92a] :

- *de ruissellement* : elles se forment dans un flux de ruissellement et se caractérisent par une alternance de microhorizons de granulométrie contrastée ;
- *de sédimentation* : dans des colonnes d'eau non turbulentes, selon la loi de Stokes, les particules les plus grossières se déposent en premier, puis les particules moyennes et enfin les plus fines. Il en résulte une distribution granulométrique inverse de celle observée dans les croûtes structurales de tamisage. Ce contraste granulométrique entraîne des tensions différentielles au cours de la dessiccation, ce

qui se traduit souvent par des fentes, voire par l'apparition de squames rebroussées ; ce type de croûte qui se forme dans toute flaque ou mare est devenue une des icônes préférées, mais discutables, des médias pour illustrer l'impact du changement climatique (figure 2.4) ;

– *éolien* : ces croûtes se manifestent par des alternances verticales de microhorizons constituées de particules fines (poussières) et de sable fin (généralement de l'ordre de 100 μm).

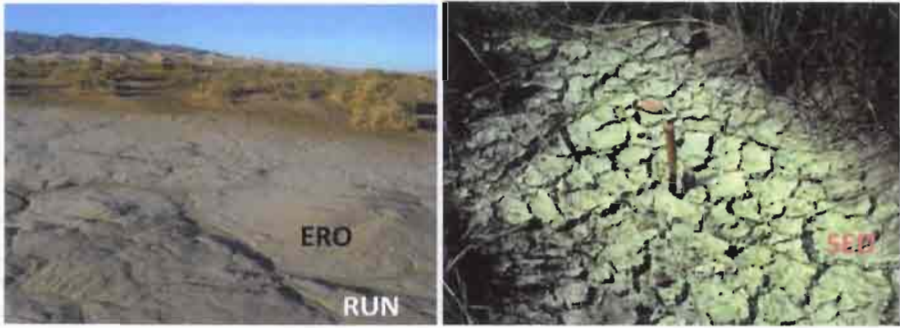


Figure 2.4. À gauche : croûte d'érosion (ERO) et croûte de ruissellement (RUN) soumises à une forte érosion éolienne, au pied des dunes de Khongor, désert de Gobi, Mongolie. À droite : croûte de sédimentation (SED), Banizoumbou, Niger (photos : C. Valentin).

2.2.5. Croûtes et efflorescences salines

Ce type de croûtes est traité au chapitre 5 de cet ouvrage.

2.2.6. Croûtes biologiques

Depuis une vingtaine d'années, l'essentiel des travaux sur les croûtes superficielles portent sur les assemblages de nombreux organismes (films microbiens, cyanobactéries, mousses, lichens, etc.) suffisamment cohésifs avec les premiers éléments minéraux pour être désignés également par le terme de « croûtes » [BEL 06]. Pour en comprendre le fonctionnement, il est essentiel de connaître le substrat [BER 14, MAL 11] de ces organismes : roches saines qu'ils contribuent à altérer en favorisant ainsi la pédogenèse, particules libres ou, comme c'est le plus souvent le cas dans les régions les plus sèches, croûtes physiques. En effet, la faible infiltrabilité des croûtes physiques permet une certaine accumulation d'humidité en surface, ce qui facilite leur colonisation par des cyanobactéries qui tendent à les consolider [MAL 11].

2.3. Facteurs d'encroûtement et principes d'amélioration de la stabilité structurale

2.3.1. Les sols

Aucun sol ne peut résister longtemps à l'impact direct des gouttes de pluies de forte intensité. Toutefois, certains sols sont plus vulnérables que d'autres à l'encroûtement superficiel. Ainsi, les deux principaux facteurs de contrôle du type de croûte structurale qui constituent les premières phases de l'encroûtement avec l'apparition des croûtes de dépôt, d'érosion et grossières sont les teneurs en limons et en carbone organique (figure 2.5).

Ainsi, la réduction des teneurs en C organique, liée à la monoculture motorisée sans apports d'engrais ou d'amendements organiques, favorise le développement des croûtes structurales, le ruissellement et l'érosion hydrique (chapitre 3), entraînant à son tour une baisse des stocks en C organique. Alors que les matières organiques consolident les agrégats, les fortes teneurs en sodium (Na) [ROB 01] et en magnésium (Mg) échangeables [ZHA 02] sont associées à de faibles stabilités structurales. Par ailleurs, les croûtes grossières s'observent davantage dans les régions à argiles de type 2:1 (smectites), souvent plus arides que dans les régions à sols kaolinitiques plus humides où les éléments grossiers restent libres en surface [VAL 94]. Les argiles de type 2:1 confèrent en effet des structures moins stables [LAD 04] que celles de type 1:1, plus grosses et moins gonflantes [NCI 16].

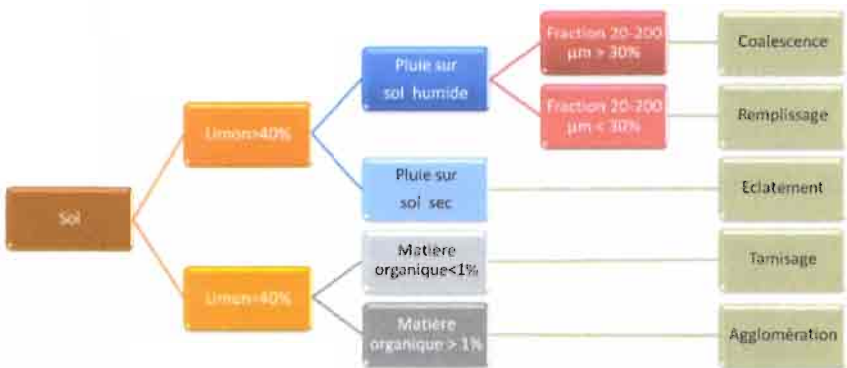


Figure 2.5. Clé de prévision des types de croûtes structurales en fonction de la teneur en limon total de l'échantillon, des conditions d'humidité précédant les pluies, des teneurs en limon grossier et sable fin et en matière organique (d'après [VAL 02])

2.3.2. La pluie

La désagrégation de la surface peut résulter de l'humectation soudaine de sols limoneux (croûte structurale d'éclatement). Le plus souvent toutefois, les croûtes structurales se forment sous l'effet de l'impact des gouttes de pluie. Les principaux facteurs à considérer sont la distribution de la taille des gouttes, leur vitesse d'impact, et donc leur énergie cinétique [LAC 15, PAT 11, VAL 87].

2.3.3. La pente

Du fait de l'importance de l'énergie cinétique reçue, l'inclinaison de pente influence l'encroûtement : il est d'autant plus généralisé que la pente est faible, et donc l'énergie cinétique reçue élevée. Celle-ci dépend en effet directement du cosinus de l'angle pluie/surface (1 pour un angle nul – sol horizontal –, 0 pour un talus vertical). Ainsi, sur les pentes très marquées, les croûtes se forment plus difficilement. Ceci explique pourquoi le ruissellement se manifeste rapidement sur des sols à pentes très faibles, donc à énergie cinétique maximale des pluies et ainsi facilement encroûtés (figure 2.2), alors que l'infiltration prédomine sur les sols très pentus [RIB 11].

2.3.4. Le couvert

Les différents types de couvert n'assurent pas la même protection de la surface du sol. Ils sont d'autant plus efficaces qu'ils réduisent l'énergie cinétique des gouttes qui tombent de leur feuillage. Les principales caractéristiques à prendre en compte sont ainsi le pourcentage de la pluie qui atteint le sol après avoir traversé le feuillage et la hauteur de chute, sachant que la vitesse maximale des gouttes les plus grosses (5-6 mm) est atteinte après seulement 10-12 m du fait de la résistance de l'air. Ainsi, des gouttes traversant un feuillage de cette hauteur pourront avoir une énergie cinétique au moins égale à celle de la pluie non interceptée. Le plus souvent, cette énergie cinétique est supérieure, du fait de gouttes plus grosses sous couvert végétal que sous pluie non interceptée. Ainsi, les hauts arbres ne protègent pas la surface du sol de la désagrégation si l'énergie cinétique des gouttes qui traversent leur feuillage n'est pas dissipée au niveau d'un couvert plus proche de la surface (sous-bois, litière) [LAC 15]. À pourcentage de couvert égal, une prairie ou un fourrage [HA 12] protégera ainsi mieux le sol qu'une plantation d'arbres dépourvue de sous-bois et de litières (voir chapitre 3, [PAT 12]).

2.3.5. Pratiques agricoles

La stabilité structurale des sols peut être améliorée par des amendements organiques et calciques [PAR 13], ces derniers étant particulièrement utiles pour les sols sodiques. La spirale de dégradation de la structure des sols : réduction des teneurs en C organique,

encroûtement, ruissellement, érosion du carbone organique peut être inversée par l'apport et le maintien de C organique dans l'horizon superficiel des sols par différents apports [FAT 06, PEN 16], notamment de résidus (chapitre 9). Ceci peut être obtenu par des cultures intermédiaires ou intercalaires, ou par une gestion mieux raisonnée des adventices qui peuvent contribuer à la protection des sols et à leur statut organique [DER 10].

Le travail du sol a deux effets antagonistes quant à l'encroûtement. D'une part, il détruit les croûtes, ce qui est souvent indispensable dans des régions semi-arides où celles-ci empêchent la levée des semences. D'autre part, le travail du sol peut favoriser la formation de croûtes dès lors qu'il produit des agrégats petits, plus rapidement détruits que de grosses mottes. Lors de la préparation du lit de semences, il importe dès lors de veiller à ne pas trop émietter les mottes [GAL 07].

Du fait du risque d'éclatement des agrégats limoneux au cours de leur humectation rapide, les apports d'eau par irrigation gravitaire doivent être suffisamment fréquents pour éviter la dessiccation de la surface du sol. Il en est de même pour l'irrigation par aspersion, pour laquelle il convient de s'assurer en plus que la pression des gicleurs, et donc la vitesse d'impact des gouttes, n'entraîne pas la formation de croûtes superficielles [VAL 87]. Une partie des apports serait alors perdue par ruissellement qui lui-même peut provoquer de l'érosion.

2.4. Conséquences de l'encroûtement superficiel

2.4.1. Hydrologiques : l'écoulement hortonien

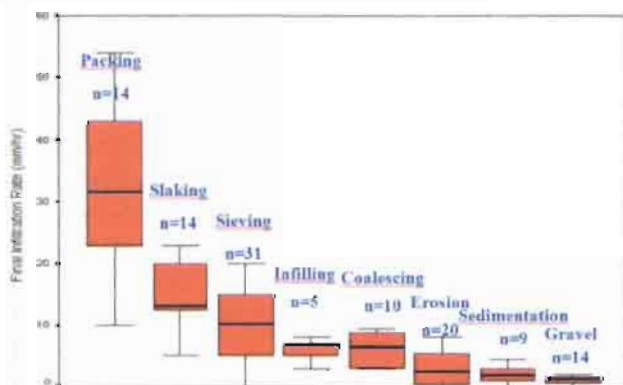


Figure 2.6. Intensité finale d'infiltration, mesurée sous pluie simulée pour différents types de croûtes, de gauche à droite : d'agglomération, d'éclatement, de tamisage, de remplissage, de coalescence, d'érosion, de sédimentation et grossière (d'après [VAL 02]).

Le ruissellement apparaît lorsque les sols sont saturés en eau jusqu'en surface. Il s'agit alors d'un écoulement sur surfaces saturées qui s'observe notamment dans les climats tempérés humides lorsque les nappes affleurent à proximité des bas-fonds en hiver. Le plus souvent toutefois, le ruissellement est généré sur les versants lorsque l'intensité de pluie est plus forte que l'infiltrabilité du sol. Or, cet écoulement appelé hortonien d'après R. E. Horton, un des fondateurs de l'hydrologie, est contrôlé par les horizons superficiels les moins poreux : croûtes et semelle de labour par exemple. Dans de très nombreuses situations cultivées [PAT 12], de jachères [VAL 04], pâturées [HIE 99], et même sous forêts plantées [LAC 15] ou dans le milieu naturel [VAL 92a, VAL 99a], cette infiltrabilité est d'abord contrainte par l'infiltrabilité des croûtes [CAS 92, PAT 12]. Celle-ci varie considérablement selon les types de croûtes, variant d'un peu plus de 30 mm h^{-1} pour les croûtes structurales d'agglomération à seulement 10 mm h^{-1} pour les croûtes structurales de tamisage (sur sols sableux), 8 mm h^{-1} pour les croûtes structurales de coalescence ou de remplissage (sur sols limoneux), et uniquement 1 mm h^{-1} pour les croûtes grossières (figure 2.6). Ceci explique pourquoi le ruissellement et l'érosion hydrique (chapitre 3) peuvent apparaître même dans des conditions de pentes très peu marquées et pour des intensités faibles aussi bien dans les plaines lœssiques du bassin parisien (figure 2.2.) que sur les dunes fixées sahéliennes (figure 2.7). Ainsi, les longues sécheresses au Sahel ont entraîné une réduction de la végétation, une extension des croûtes superficielles et une forte augmentation du ruissellement [CAS 89] et de la surface occupée par les mares [GAR 10]. Le fort ruissellement s'est également concentré dans des ravines à fond sableux et a alimenté les nappes dont le niveau s'est élevé au cours des sécheresses [LED 01]. Les croûtes grossières, et notamment les « regs » des régions désertiques, génèrent dès la moindre pluie des volumes de ruissellement très élevés du fait de leurs vastes surfaces. Surgissent ainsi des crues « éclairs » d'autant plus dangereuses qu'elles peuvent se manifester subitement bien en aval des zones de pluies. De nombreux campeurs ou automobilistes se laissent ainsi surprendre dans des oueds bien secs mais soudain submergés par une vague de crue dévastatrice [FOO 04] (figure 2.7).



Figure 2.7. À gauche : ruissellement sur dune fixée, dû aux croûtes structurales de tamisage, nord du Burkina Faso. À droite : crue éclair due aux croûtes grossières du bassin versant, dans le désert de Gobi, Mongolie (photos : O. Ribolzi, C. Valentin)

2.4.2. Écologiques : exemple de la brousse tigrée

Les brousses tigrées, et plus largement les formations végétales en bandes dans les régions arides et semi-arides illustrent le rôle essentiel des croûtes superficielles dans la récolte du ruissellement, clé de fonctionnement de ces écosystèmes [Val 99a]. Ceux-ci se définissent comme la succession dans l'espace de zones nues et de bandes de végétation. Vues d'avion, ces « brousses » évoquent le pelage d'un tigre, d'où leur nom (figure 2.8 ; la photo aérienne oblique a été prise à 70 km à l'est de Niamey, Niger). L'aval d'une bande de végétation se caractérise par des arbres morts, des croûtes structurales de tamisage et un ruissellement de 80 % ; la zone nue par des croûtes d'érosion et grossières, un ruissellement de 90 % et un front d'infiltration inférieur à 1 m ; l'aval de la zone nue par des croûtes de sédimentation colonisées par des cyanophycées, donc recouvertes par des croûtes biologiques, et une accumulation superficielle d'eau et de sédiments ; enfin, la bande de végétation par des grands arbres de zone de régions plus humides, une litière, une forte activité des termites, une absence de croûte, une infiltration annuelle de 95 % et un front d'humectation dépassant 7 m (figure 2.8, d'après [GAL 99, LUD 05, VAL 99b]).

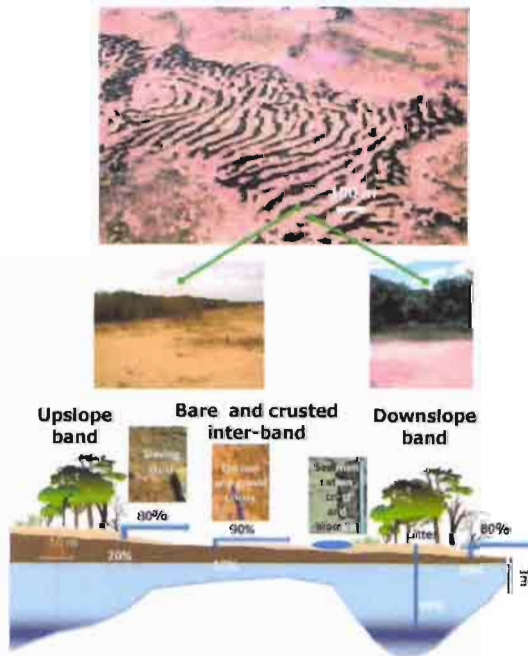


Figure 2.8. Vue aérienne d'une brousse tigrée, Niger. Détail des états de surface, des croûtes, du pourcentage de ruissellement annuel et des profondeurs d'infiltration (photos : C. Valentin)

2.4.3. Agronomiques : la récolte du ruissellement

Comme vient de le montrer l'exemple précédent, les croûtes superficielles constituent ainsi une des composantes essentielles des écosystèmes des régions arides et semi-arides. Elles permettent de recueillir l'eau de pluie sur des surfaces plus ou moins étendues (zones sources) et de les concentrer dans des zones d'infiltration privilégiées (zones puits) [ROC 97] où, une fois stockées dans les sols, elles échapperont davantage à l'évaporation que dans des retenues. Dans ces régions, les pluies sont en effet insuffisantes en quantité et trop concentrées dans le temps pour assurer un couvert végétal continu. Dès lors, les zones nues amont qui servent à la collecte du ruissellement pour les zones aval de végétation ne doivent pas être plantées. En particulier, les agronomes et les forestiers, souvent prompts à rechercher la mise en place de peuplements uniformes, doivent tenir compte de cette nécessaire hétérogénéité spatiale. S'inspirant de l'exemple de la brousse tigrée, ils peuvent aussi tirer des leçons de pratiques à différentes échelles. La figure 2.9 fournit deux exemples de gestion optimale de croûtes superficielles : les croûtes d'érosion peuvent faciliter elles-mêmes leur propre réhabilitation par la technique du *zaï* [FAT 06] : des cultures ou des ligneux sont plantés dans des trous dans lesquels est apporté du fumier. Ainsi se trouvent concentrées les ressources en eau et en éléments fertilisants. L'important ruissellement produit par les croûtes grossières dans les régions subdésertiques peut être capté par des levées de terres et de pierres qui retiennent également les sédiments produits par les ravines et thalwegs [SEN 13]. C'est ainsi qu'une production agricole (olives, amandes, voire blé dur) est possible sous des pluviosités très faibles (figure 2.9 montrant l'exemple de jessour dans le Sud tunisien). Des agronomes sud-africains ont bien compris qu'en milieu semi-aride la distribution des plantes cultivées devait être hétérogène, alternant rangs plantés et interrangs laissés nus [WOY 06]. Des programmes de reforestation de plateaux très désertifiés au Niger s'inspirent de l'exemple de la brousse tigrée pour ne planter qu'en bandes, laissant entre ces bandes de larges zones nues encroûtées.

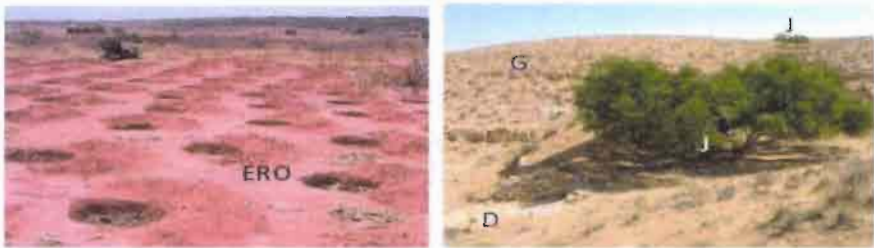


Figure 2.9. À gauche : cuvettes enrichies en fumier (*zaï*) destinées à réhabiliter un sol couvert de croûte d'érosion (ERO), Banizoumbou, Niger, pluviosité annuelle 550 mm. À droite : succession de « jessour » (J) le long d'un thalweg, doté d'un déversoir (D), drainant un bassin couvert de croûtes grossières, monts de Matmata, sud de la Tunisie, pluviosité annuelle 240 mm (photos : C. Valentin).

2.5. Conclusions

Les états de surface constituent une sorte d'épiderme au sein de la zone critique qui contrôle les échanges entre les sols, la végétation et l'atmosphère. En particulier, les croûtes déterminent très largement la part des précipitations qui s'infiltre dans les sols, et peut constituer les réserves pour les racines ou alimenter les nappes, et celle qui ruisselle, le devenir du ruissellement étant lui-même déterminé par la distribution des états de surface à l'aval.

Bien qu'encore largement ignorés par la plupart des modèles hydrologiques et d'évaporation, les différents types de croûtes permettent d'éclairer un certain nombre de paradoxes comme les forts ruissellements sur des pentes très faibles, sur des sols sableux ou des sols très secs et désertiques. Les croûtes physiques sous-jacentes expliquent également pourquoi des croûtes biologiques peuvent être associées à une faible infiltrabilité. Alors que les croûtes physiques génèrent du ruissellement et souvent de l'érosion hydrique non souhaitée, notamment dans les régions tempérées et tropicales humides, elles constituent une composante essentielle des écosystèmes semi-arides et arides. La gestion des sols et des eaux dans ces régions sèches doit tenir compte de la nécessité de maintenir l'hétérogénéité des états de surface entre des zones sources, nues et encroûtées qui servent à la récolte du ruissellement et des zones puits qui bénéficient de la concentration des ressources en eau et en sédiments, et permettent ainsi le développement de la végétation.

QUESTIONS DE RECHERCHE

1. Quelles sont les interactions entre croûtes biologiques et le milieu sur lequel elles se développent : roches, sols structurés et croûtes physiques, avec quelles conséquences sur le bilan altération/érosion (hydrique et éolienne), le stockage de l'eau, du carbone organique et de l'azote [BER 14] ?
2. Dans quelle mesure la surface du sol, et particulièrement les croûtes, concentrent-elles des contaminants et pendant combien de temps [MAL 14] ?
3. Quelles sont les meilleures pratiques (travail ou non-travail du sol, types d'amendement, etc.) pour assurer une meilleure stabilité structurale [PEN 16] ?

RECOMMANDATIONS

1. Maintenir, dans les régions tempérées et tropicales humides, une couverture permanente directement sur, ou à très faible hauteur au-dessus de la surface du sol pour limiter l'énergie cinétique des pluies (et de l'irrigation par aspersion).

2. Éviter l'émiettement de la surface du sol lors de la préparation du lit de semences et maintenir, voire renforcer le statut organique des sols (production de biomasse et amendements).

3. Conserver des zones nues encroûtées dans les régions arides et semi-arides pour permettre une récolte du ruissellement et la concentration des ressources dans les îlots ou les bandes de végétation.

2.6. Bibliographie

- [AME 99] AMEZKETA E., « Soil aggregate stability : a review », *Journal of Sustainable Agriculture*, vol. 14, n° 2-3, p. 83-151, 1999.
- [BAD 13] BADORRECK A., GERKE H.H., HÜTTL R.F., « Morphology of physical soil crusts and infiltration patterns in an artificial catchment », *Soil and Tillage Research*, n° 129, p. 1-8, 2013.
- [BEL 06] BELNAP J., « The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles », *Hydrological processes*, vol. 20, n° 15, p. 3159-3178, 2006.
- [BER 14] BERTRAND I., EHRHARDT F., ALAVOINE G., *et al.*, « Regulation of carbon and nitrogen exchange rates in biological soil crusts by intrinsic and land use factors in the Sahel area », *Soil Biology and Biochemistry*, n° 72, p. 133-144, 2014.
- [CAS 89] CASENAVE A., VALENTIN C., *Les États de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*, ORSTOM, Marseille, disponible à l'adresse : http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers08-01/27816.pdf, 1989.
- [CAS 92] CASENAVE A., VALENTIN C., « A runoff capability classification system based on surface features criteria in the arid and semi-arid areas of West Africa », *Journal of Hydrology*, n° 130, p. 231-249, 1992.
- [DER 10] DE ROUW A., HUON S., SOULILEUTH B., *et al.*, « Possibilities of carbon and nitrogen sequestration under conventional tillage and no-till cover crop farming (Mekong valley, Laos) », *Agriculture, Ecosystems & Environment*, n° 136, p. 148-161, 2010.
- [DHE 97] D'HERBÈS J.M., VALENTIN C., « Land surface conditions of the Niamey region (Niger) : ecological and hydrological implications », *Journal of Hydrology*, n° 188-189, p. 18-42, 1997.
- [FAT 06] FATONDI D., MARTIUS C., BIELDERS C.L., *et al.*, « Effect of planting technique and amendment type on pearl millet yield, nutrient uptake, and water use on degraded land in Niger », *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, vol. 76, n° 2-3, p. 203-217, 2006.
- [FOO 04] FOODY G.M., GHONEIM E.M., ARNELL N.W., « Predicting locations sensitive to flash flooding in an arid environment », *Journal of Hydrology*, vol. 292, n° 1, p. 48-58, 2004.

- [GAL 07] GALLARDO-CARRERA A., LÉONARD J., DUVAL Y., *et al.*, « Effects of seedbed structure and water content at sowing on the development of soil surface crusting under rainfall », *Soil and Tillage Research*, vol. 95, n° 1, p. 207-217, 2007.
- [GAL 99] GALLE S., EHREMAN M., PEUGEOT C., « Water balance in a banded vegetation pattern : a case study of tiger bush in western Niger », *Catena*, vol. 37, n° 1, p. 197-216, 1999.
- [GAR 10] GARDELLE J., HIERNAUX P., KERGOAT L., *et al.*, « Less rain, more water in ponds : a remote sensing study of the dynamics of surface water from 1950 to present in pastoral Sahel (Gourma region, Mali) », *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 14, n° 2, p. 309-324, 2010.
- [HA 12] HA H.A.P., HUON S., DES TUREAUX T.H., *et al.*, « Impact of fodder cover on runoff and soil erosion at plot scale in a cultivated catchment of North Vietnam », *Geoderma*, n° 177, p. 8-17, 2012.
- [HIE 99] HIERNAUX P., BIELDERS C.L., VALENTIN C., *et al.*, « Effects of livestock grazing on physical and chemical properties of sandy soils in Sahelian rangelands », *Journal of Arid Environment*, n° 41, p. 231-245, 1999.
- [JOU 08] JOUQUET P., PODWOJEWSKI P., BOTTINELLI N., *et al.*, « Above-ground earthworm casts affect water runoff and soil erosion in Northern Vietnam », *Catena*, n° 74, p. 13-21, 2008.
- [JOU 12] JOUQUET P., JANEAU J.L., HAI TRAN SY, *et al.*, « Soil engineers influence runoff, soil detachment and the transfer of nutrients in tropical steep slope ecosystems. A case study in Northern Vietnam », *Applied Soil Ecology*, n° 61, p. 161-168, 2012.
- [LAC 15] LACOMBE G., RIBOLZI O., DE ROUW A., *et al.*, « Afforestation by natural regeneration or by tree planting : examples of opposite hydrological impacts evidenced by long-term field monitoring in the humid tropics », *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, n° 12, p. 12 615-12 648, 2015.
- [LAD 04] LADO M., BEN-HUR M., « Soil mineralogy effects on seal formation, runoff and soil loss », *Applied Clay Science*, vol. 24, n° 3, p. 209-224, 2004.
- [LEB 96] LE BISSONNAIS Y., « Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility : I. Theory and methodology », *European Journal of Soil Science*, vol. 47, n° 4, p. 425-437, 1996.
- [LED 01] LEDUC C., FAVREAU G., SCHROETER P., « Long-term rise in a Sahelian water-table : The Continental Terminal in south-west Niger », *Journal of hydrology*, vol. 243, n° 1, p. 43-54, 2001.
- [LUD 05] LUDWIG J.A., WILCOX B.P., BRESHEARS D.D., *et al.*, « Vegetation patches and runoff-erosion as interacting ecohydrological processes in semiarid landscapes », *Ecology*, vol. 86, n° 2, p. 288-297, 2005.

- [MAL 11] MALAM ISSA O., VALENTIN C., RAJOT J.L., *et al.*, « Runoff generation fostered by physical and biological crusts in semi-arid sandy soils », *Geoderma*, n° 167-168, p. 22-29, 2011.
- [MAL 14] MALLMANN F.J.K., DOS SANTOS RHEINHEIMER D., CERETTA C.A., *et al.*, « Soil tillage to reduce surface metal contamination—model development and simulations of zinc and copper concentration profiles in a pig slurry-amended soil », *Agriculture, Ecosystems & Environment*, n° 196, p. 59-68, 2014.
- [MON 14] MONCADA M.P., GABRIELS D., LOBO D., *et al.*, « A comparison of methods to assess susceptibility to soil sealing », *Geoderma*, n° 226, p. 397-404, 2014.
- [MOR 14] MORENO-RAMÓN H., QUIZEMBE S.J., IBÁÑEZ-ASENSIO S., « Coffee husk mulch on soil erosion and runoff: experiences under rainfall simulation experiment », *Solid Earth*, vol. 5, n° 2, p. 851, 2014.
- [NCI 16] NCIIZAH A.D., WAKINDIKI I.I., « Physical crust formation and steady-state infiltration rate in soils dominated by primary minerals in some South African ecotopes », *South African Journal of Plant and Soil*, vol. 33, n° 1, p. 43-50, 2016.
- [PAR 13] PARADELO R., VAN OORT F., CHENU C., « Water-dispersible clay in bare fallow soils after 80 years of continuous fertilizer addition », *Geoderma*, n° 200, p. 40-44, 2013.
- [PAT 12] PATIN J., MOUCHE E., RIBOLZI O., *et al.*, « Analysis of runoff production at the plot scale during a long-term survey of a small agricultural catchment in Lao PDR », *Journal of Hydrology*, n° 426-427, p. 79-92, 2012.
- [PEN 16] PENG X., ZHU Q.H., XIE Z.B., *et al.*, « The impact of manure, straw and biochar amendments on aggregation and erosion in a hillslope Ultisol », *Catena*, n° 138, p. 30-37, 2016.
- [POD 08] PODWOJEWSKI P., ORANGE D., JOUQUET P., *et al.*, « Influence of land use changes on runoff and erosion from micro-plots and a catchment in northern Vietnam », *Catena*, n° 24, p. 109-118, 2008.
- [RIB 11] RIBOLZI O., PATIN J., BRESSON L.M., *et al.*, « Impact of slope gradient on soil surface features and infiltration on steep slopes in northern Laos », *Geomorphology*, vol. 127, n° 1, p. 53-63, 2011.
- [ROB 01] ROBINSON D.A., PHILLIPS C.P., « Crust development in relation to vegetation and agricultural practice on erosion susceptible, dispersive clay soils from central and southern Italy », *Soil and Tillage research*, vol. 60, n° 1, p. 1-9, 2001.
- [ROC 97] ROCKSTRÖM, J., VALENTIN, C., « Hillslope dynamics of on-farm generation of surface water flows : The case of rainfed cultivation of pearl millet on sandy soil in the Sahel », *Agricultural Water Management*, n° 33, p. 183-210, 1997.
- [SEN 13] SENGE M., « The development of water harvesting research for agriculture », *Reviews in Agricultural Science*, n° 1, p. 31-42, 2013.

- [VAL 02] VALENTIN C., BRESSON L.M., « Predicting structural crust types from soil land climatic factors », *COST Symposium on Soil Erosion Patterns : Evolution, Spatio-Temporal Dynamics and Connectivity*, Müncheberg, Allemagne, 10-12 octobre 2002.
- [VAL 04] VALENTIN C., RAJOT J.L., MITJA D., « Responses of soil crusting, runoff and erosion to fallowing in the sub-humid and semi-arid regions of West Africa », *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 104, n° 2, p. 287-302, 2004.
- [VAL 87] VALENTIN C., RUIZ FIGUEROA J.F., « Effects of kinetic energy and water application rate on the development of crusts in a fine sandy loam soil using sprinkling irrigation and rainfall simulation », tiré de la rencontre *Micromorphologie des soils/Soil micromorphology : proceedings of the 7th International Working Meeting on Soil Micromorphology*, p. 401-408, Association Française pour l'Étude des Sols (AFES) Publications, Plaisir, disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/profile/Christian_Valentin/publication/32983791_Effects_of_kinetic_energy_and_water_application_rate_on_the_development_of_crusts_in_a_fine_sandy_loam_soil_using_sprinkling_irrigation_and_rainfall_simulation/links/0deec5238337e7ec23000000.pdf, 1987.
- [VAL 92a] VALENTIN C., BRESSON L.M., « Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils », *Geoderma*, vol. 55, n° 3, p. 225-245, 1992.
- [VAL 92b] VALENTIN C., CASENAVE A., « Infiltration into sealed soils as influenced by gravel cover », *Soil Science Society of America Journal*, vol. 56, n° 6, p. 1 167-1 673, 1992.
- [VAL 94] VALENTIN C., « Surface sealing as affected by various rock fragment covers in West Africa », *Catena*, vol. 2, n° 1-2, p. 87-97, 1994.
- [VAL 99a] VALENTIN C., D'HERBÈS J.M., « Niger tiger bush as a natural water harvesting system », *Catena*, vol. 37, p. 231-256, 1999.
- [VAL 99b] VALENTIN C., D'HERBÈS J.M., POESEN J., « Soil and water components of vegetation patterning », *Catena*, n° 37, p. 1-24, 1999.
- [WOY 06] WOYESSA Y.E., HENSLEY M., VAN RENSBERG L.D., « Catchment management in semi-arid area of central South Africa : Strategy for improving water productivity », *Water SA*, vol. 32, n° 5, p. 648-654, 2006.
- [ZHA 02] ZHANG X.C., NORTON L.D., « Effect of exchangeable Mg on saturated hydraulic conductivity, disaggregation and clay dispersion of disturbed soils », *Journal of Hydrology*, vol. 260, n° 1, p. 194-205, 2002.

Valentin Christian (2018)

L'encroûtement superficiel des sols et la récolte du ruissellement

In : Valentin Christian (ed.). *Les sols au coeur de la zone critique 5 : dégradation et réhabilitation*

Londres : ISTE, p. 37-52. (Système Terre - Environnement : Série Les Sols ; 5)

ISBN 978-1-78405-383-3