

TELEDETECTION, ETATS DE SURFACE ET OBSERVATIONS AU SOL

Jean-Marie LAMACHERE*, Christian PUECH**

*Laboratoire d'hydrologie, Centre ORSTOM, 911 avenue Agropolis, BP 5 045, 34 032 Montpellier

**L.C.T. CEMAGREF / ENGREF, 500 rue J.F. Breton, 34 093 Montpellier Cedex 5 - France

Résumé

En Afrique de l'Ouest, on pense généralement que l'amélioration de l'estimation des ruissellements à l'échelle des petits bassins versants viendra d'une meilleure connaissance des aptitudes des sols au ruissellement (Rodier et al., 1984). Les travaux des hydrologues et pédologues de l'ORSTOM en Afrique de l'Ouest (Casenave et Valentin, 1989) ont montré que l'aptitude des sols au ruissellement dépendait fortement de l'état de surface des sols, notion qui cumule l'observation de la végétation, du sol et de son organisation superficielle.

Or la télédétection satellitaire haute résolution propose actuellement des images au pas d'espace de 20 m (SPOT XS) ou 30 m (LANDSAT TM). La détection est limitée aux couches superficielles de la surface du sol en l'absence de nuages. L'accès aux couches inférieures ne peut se faire que par corrélation avec des éléments révélateurs en surface de la texture et de la structure du sol. L'utilisation de la télédétection pour la cartographie des états de surface nécessite donc la réalisation d'observations au sol permettant de préciser, aux échelles d'observation de l'appareil embarqué à bord du satellite, les principales caractéristiques des états de surface. Pour ce faire, nous présentons dans cet article une méthode d'observations au sol des états de surface bien adaptée à l'interprétation et à l'analyse numérique des images satellitaires.

La méthode proposée consiste, pour des bassins versants de superficie supérieure à 10 km², à réaliser la description au sol des états de surface par blocs contigus de 100*100 m, sur des distances de 2 à 3 km. Les repérages au sol sont effectués par l'emploi d'un GPS (Global Position System). Les observations sont ensuite normalisées et reportées sur des tableaux récapitulatifs permettant leur utilisation dans le traitement numérique des images. Pour des bassins versants de superficie inférieure à 10 km², les observations au sol sont effectuées sur des bandes rectilignes longues de 300 à 500 m, larges de 20 m qui procurent un taux de sondage équivalent et une meilleure précision dans la description des états de surface.

INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, pour améliorer l'estimation des apports et des crues des petits bassins versants des zones sahéenne et tropicale sèche en Afrique de l'Ouest, les nouvelles méthodes cartographiques, par analyse numérique d'images satellites, ont été associées à la caractérisation hydrologique des états de surface.

En effet, on pense généralement que l'amélioration de l'estimation des ruissellements de la zone sahéenne viendra d'une meilleure connaissance de l'aptitude des sols au ruissellement (Rodier et al., 1984). Une des manières de mesurer cette aptitude a été d'utiliser, dans toute l'Afrique de l'ouest, le simulateur de pluies sur des surfaces élémentaires (1 m²). Une description minutieuse de l'organisation superficielle des sols et de leur couvert végétal a permis de réaliser une typologie des surfaces élémentaires en y associant des relations hydro-pluviométriques issues des opérations de simulation de pluie. Un ouvrage intitulé "Les états de surface de la zone sahéenne" (Casenave et Valentin, 1989) synthétise l'ensemble des résultats.

Une autre réponse possible, complémentaire à la précédente, consiste à utiliser les nouveaux outils de représentation spatiale et en particulier la télédétection à haute résolution sur les petits bassins versants des zones sahéenne et tropicale sèche.

Dans cet article, nous développerons plus particulièrement une méthode de description au sol des états de surface, proche de celle proposée par Casenave et Valentin (1989), mais adaptée à l'analyse numérique et à la photo-interprétation des images satellites (Lamachère et Puech 1995). Dans un autre article, complémentaire à celui-ci, nous développerons la cartographie des états de surface par utilisation des images satellitaires. La cartographie des états de surface ouvre la voie à la modélisation du comportement hydrologique des sols à l'échelle d'un bassin versant.

TELEDETECTION ET HYDROLOGIE

La télédétection satellitaire haute résolution propose actuellement des images au pas d'espace de 20 m (SPOT XS) ou 30 m (LANDSAT TM). Chaque élément de l'image (pixel) est connu par sa radiométrie respectivement selon 3 ou 7 bandes spectrales. Dans le spectre visible, la détection est limitée à la surface du sol en l'absence de nuages. L'accès aux couches pédologiques ou géologiques inférieures ne peut se faire que par corrélation avec des éléments révélateurs, en surface, de la nature du sol ou du sous-sol.

Les informations satellitaires, potentiellement utilisables en hydrologie, concernent d'une part la répartition spatiale des types de surface à une date donnée et d'autre part la connaissance de l'évolution de l'état des surfaces au travers d'images multitudes. Le traitement des images consiste à définir soit des classes radiométriquement homogènes, auxquelles les pixels sont rattachés individuellement, soit des unités cartographiques formées d'agrégats de pixels différents organisés en structures identifiables à l'œil.

En zone sahélienne

En zone sahélienne, la pluviométrie moyenne interannuelle varie entre 600 et 200 mm. Cette zone peut être considérée a priori comme favorable à l'utilisation de la télédétection. On y note en effet :

Un contexte géographique et climatique caractérisé par :

- une bonne visibilité sur de longues périodes, due à la rareté du couvert nuageux, même en saison des pluies,
- une végétation peu abondante et dispersée qui limite l'extension des feux de brousse et permet d'observer la nature des sols.

Un contexte hydrologique marqué par :

- des pluies violentes et de courte durée qui conduisent à la formation de sols nus encroûtés, générateurs de forts ruissellements,
- des crues fortes où le ruissellement constitue l'essentiel des écoulements des marigots.

De la zone sahélienne humide (400 à 600 mm) à la zone sahélienne sèche (200 à 400 mm), le couvert végétal se raréfie et l'organisation pédologique superficielle des sols (croûtes) prend de plus en plus d'importance dans la détermination de l'aptitude des sols au ruissellement et à l'infiltration. Dans ce contexte, le lien entre télédétection et hydrologie va donc se faire sur le constat que les états de surface, et plus particulièrement les organisations superficielles des sols, sont primordiaux pour la connaissance du ruissellement et la prédétermination des apports à l'échelle des petits bassins versants.

En zone tropicale sèche

En Afrique de l'Ouest, la zone tropicale sèche est comprise entre les isohyètes interannuelles 600 et 1000 mm. Moins favorable que la zone sahélienne à l'utilisation de la télédétection, elle présente néanmoins un certain nombre d'atouts :

Un contexte géographique et climatique caractérisé par :

- une longue période sèche (novembre à mars) avec une bonne visibilité sur cette période, mais une visibilité plus faible qu'en zone sahélienne au cours de la saison pluvieuse (avril à octobre),
- une végétation herbacée abondante en saison des pluies qui permet, en saison sèche, le développement des feux de brousse et leur propagation,
- des pourcentages de terres cultivées très variables d'une région à l'autre, qui peuvent être localement très importants (50 à 60 %).

Un contexte hydrologique marqué par :

- des pluies violentes et de courte durée, qui conduisent à la formation de sols encroûtés générateurs de forts ruissellements, mais aussi des pluies plus fréquentes et de faible intensité qui favorisent la croissance du couvert herbacé,
- des crues plus fréquentes qu'en zone sahéenne et des écoulements où l'importance du débit de base, dû à la remontée des nappes aquifères, commence à influencer significativement le régime des cours d'eau, principalement en fin de saison des pluies.

Le pourcentage de couverture végétale et de mise en culture sont ici les principaux facteurs explicatifs du ruissellement et de l'infiltration. Le couvert herbacé est susceptible de fortes variations sous l'effet des feux de brousse et de la sénescence périodique. Pour une pluviométrie annuelle inférieure à 800 mm, la couverture végétale ligneuse étant généralement de faible densité, la surface du sol et sa couverture herbacée sont directement accessibles à l'observation satellitaire. Dans le contexte tropical sec, le lien entre télédétection et hydrologie va donc se faire sur le constat que les états de surface, plus particulièrement le couvert végétal herbacé et la mise en culture des sols, sont primordiaux pour la connaissance du ruissellement. En ce qui concerne la prédétermination des apports à l'échelle des petits bassins versants, des informations sur l'écoulement de base des marigots devront compléter celles qui concernent le ruissellement.

Caractéristiques communes aux zones sahéenne et tropicale sèche

La faiblesse du relief est une caractéristique commune, en Afrique de l'Ouest, aux zones sahéenne et tropicale sèche. Elle entraîne une grande homogénéité climatique sur l'ensemble des deux zones et peu de déformations géométriques sur les images satellites.

Le contexte cartographique général est peu précis. Il existe encore très peu de cartes topographiques au 1/ 50 000, ce qui peut justifier l'achat d'images spatiales à haute résolution. La couverture aérienne est rarement renouvelée, ce qui légitime l'achat d'images satellites récentes.

METHODOLOGIE DE LA DESCRIPTION DES ETATS DE SURFACE

Dans les zones sahéenne et tropicale sèche, le paysage, souvent très humanisé, est un amalgame complexe d'entités dont la taille, la densité et la répartition varient de façon continue, ou discontinue, sur de faibles distances. Rares sont les endroits où les limites précises d'ensembles homogènes sont observées. On y rencontre des zones naturelles composées de savanes plus ou moins arborées, des zones de culture à faible couverture ligneuse, ou des ensembles à densité de végétation variable. Les zones totalement homogènes sur les images satellites (plans d'eau, dunes vives, brûlis, forêts denses) y sont rares.

Prétraitement de l'image satellitaire et choix de l'échantillon

L'image satellitaire et la carte topographique, associée à cette image, servent de guide au choix de l'échantillon des points, des lignes ou des sections pour la description de la surface des sols d'un bassin versant.

Un prétraitement de l'image permet de définir des classes radiométriquement homogènes, issues du traitement numérique des images, ou des unités cartographiques résultant d'une photo-interprétation. Cette opération conduit généralement à la définition de 10 à 20 unités cartographiques différentes qui seront échantillonnées en fonction de leur importance locale ou régionale. Les pistes et les chemins sont rarement visibles sur les images satellitaires. Pour se repérer avec précision sur les images satellitaires, on réalise un tirage sur film transparent de la carte topographique de la zone à cartographier, à la même échelle que l'image.

Le type d'échantillon retenu dépend du mode cartographique et de la précision souhaitée dans la description au sol. Pour une cartographie par analyse numérique des images satellitaires, on choisira l'échantillon sous la forme de lignes ou des sections. Pour une cartographie manuelle, l'échantillonnage par points suffit.

La description au sol des classes radiométriques ou des unités cartographiques doit tenir compte de la grande variabilité spatiale de la végétation et de l'occupation du sol. Elle comprendra donc l'estimation des proportions des différentes composantes de l'état de surface : strates arborée, arbustive et herbacée, types de sols, types d'organisation superficielle du sol et occupation du sol avec son état cultural.

Choix méthodologiques

Pour transformer une description de la surface du sol en une lame ruisselée, plusieurs démarches sont possibles. Elles sont basées sur le choix préalable de l'échelle de modélisation hydrologique en relation avec la possibilité de transformer l'information spatiale en information de ruissellement. Elles suivent les étapes suivantes :

- 1 Choix d'un **modèle hydrologique** de fonction de production et de son échelle élémentaire d'application,
- 2 **Cartographie** des zones homogènes d'application d'une même fonction de production,
- 3 Choix d'un **modèle de transfert** permettant de reconstituer les volumes ruisselés et les hydrogrammes à l'exutoire du bassin versant.

Le mètre carré est l'échelle d'application des relations hydro-pluviométriques associées à la typologie des états de surface établie en Afrique de l'Ouest par Casenave et Valentin (1989). Nous avons donc choisi le mètre carré comme échelle élémentaire d'application des fonctions de production.

Le terme "état de surface" désigne, selon Casenave et Valentin, un système de surfaces élémentaires à un instant donné, système qui constitue un ensemble homogène au sein duquel les différentes parties entretiennent des relations fonctionnelles quant au ruissellement et à l'infiltration. L'état de surface servira donc d'unité pour la cartographie hydrologique à l'échelle des bassins versants.

Pour chaque état de surface, on peut définir une **fonction de production**, somme des lames ruisselées aux échelles élémentaires. Ce type de fonction de production ne définit pas le ruissellement qui sera réellement observé, mais plutôt un **potentiel de ruissellement** qui sera généralement inférieur au ruissellement réel.

Il importe donc, pour établir la fonction de production de chaque état de surface, de connaître avec une précision suffisante sa composition en surfaces élémentaires. La description des états de surface se fera donc sur le terrain avec ce souci permanent.

En ce qui concerne le modèle de transfert permettant de reconstituer les écoulements à l'échelle des bassins versants, ce problème sera abordé par Christian PUECH dans l'article *"Télédétection et hydrologie : quelle vision, quelle échelle, quels processus ?"*

La description des surfaces élémentaires

Le catalogue des états de surface de la zone sahélienne (Casenave et Valentin, 1989) fournit un inventaire exhaustif des différents types de surfaces élémentaires rencontrées à l'ouest du continent africain au sud du Sahara. Il fournit également une méthodologie détaillée pour leur description. Nous ne reprendrons ici que l'essentiel nécessaire à la compréhension du déroulement des opérations de terrain. Pour améliorer l'efficacité des descriptions d'états de surface d'un bassin versant ou d'un groupe de bassins versants, **il est indispensable de créer, pour chaque région étudiée, un inventaire des types de surfaces élémentaires rencontrés.**

La surface élémentaire (1 m^2) est définie comme un ensemble homogène constitué par le couvert végétal, la surface du sol et son organisation superficielle. L'organisation pédologique superficielle résulte de transformations subies par la surface du sol sous l'effet de facteurs météorologiques, phyto-écologiques, fauniques ou anthropiques.

Le couvert végétal

A l'échelle des surfaces élémentaires, seuls le couvert herbacé et le couvert cultural peuvent être observés facilement.

On distingue, en pourcentage de recouvrement, le couvert épigé, vert ou desséché, de la litière. Le complément à 100 du couvert végétal total représente le pourcentage de sol nu exposé directement à l'impact des gouttes de pluie.

Le microrelief

Le microrelief, d'amplitude comprise entre 5 et 50 cm, et le nanorelief, d'amplitude inférieure à 5 cm, sont évalués en fonction de leur degré d'obstruction par rapport au ruissellement. Ils interviennent principalement dans la classification des sols cultivés.

La mésofaune

L'activité mésofaunique influe sur la porosité des sols. On note essentiellement le pourcentage de la surface occupée par les turricules de vers, déjections rejetées à la surface du sol par les vers de terre, ou par les placages de termites, petits chenaux en terre construits par les termites en quête de nourriture, pour se prémunir de la lumière.

Le sol

On note la granulométrie du sol dans les 5 à 10 premiers centimètres de profondeur en estimant au toucher le pourcentage des cinq classes granulométriques suivantes : les blocs, cailloux et graviers de taille supérieure à 5 mm, les gravillons (2 à 5 mm), les sables grossiers (0,2 à 2 mm), les sables fins (50 à 200 microns), les limons et argiles de taille inférieure à 50 microns. La couleur du sol est notée à l'état sec et à l'état humide.

La porosité

On distingue :

- la porosité tubulaire résultant d'une activité biologique végétale ou animale,
- la porosité de fissure : fentes de dessiccation qui se referment après humectation,
- la porosité vésiculaire, formée de petites cavités sphériques enfermant des bulles d'air.

Contrairement aux deux autres, la porosité vésiculaire limite considérablement l'infiltration. Elle occupe donc une place de choix dans la description des organisations pédologiques superficielles.

Les principaux types de surfaces élémentaires

La typologie des surfaces élémentaires établie par C. VALENTIN correspond sensiblement à celle des microhorizons superficiels ou croûtes de surface. Leur clef de détermination est fournie à la figure 1.

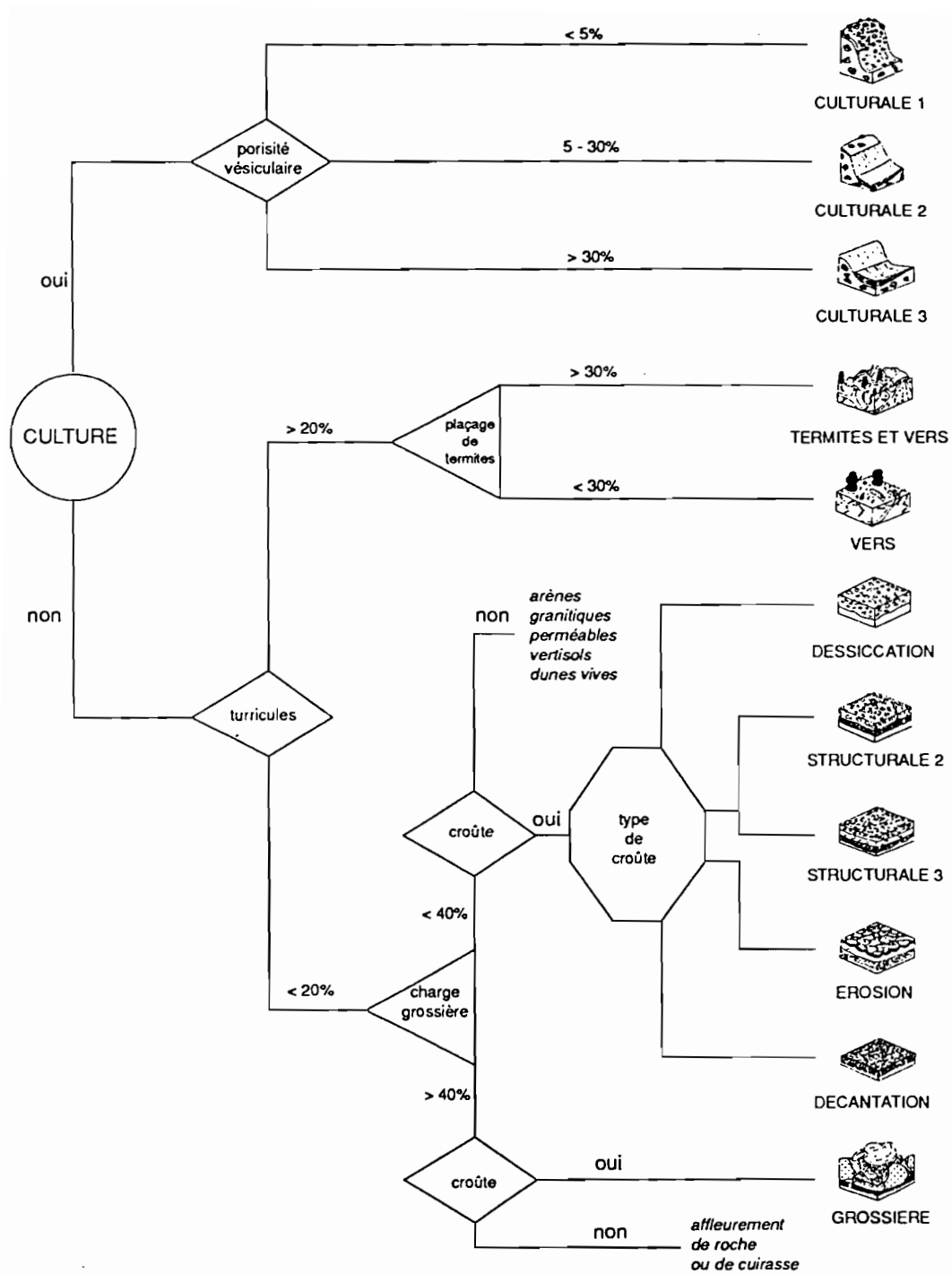


Figure n° 1 : Clef de détermination des surfaces élémentaires (A. Casenave et C. Valentin, 1989)

La description des états de surface

Deux types d'observations sont effectuées :

- *Les observations primaires*, qui sont constituées par la nature et la densité de la **végétation**, le type et la couleur des **sols**, ainsi que par l'**occupation du sol**. Ces observations servent au décodage primaire des images en 3 plans élémentaires : "végétation", "sols" et "occupation du sol".

- *Les observations secondaires*, qui sont constituées par les **pourcentages de recouvrement en surfaces élémentaires types**. Elles servent à déterminer la composition statistique des unités cartographiques en surfaces-types élémentaires.

Pour les bassins de taille supérieure à 10 km², nous proposons que les observations au sol soient effectuées par blocs contigus de 100*100 m, sur des sections longues de 2 à 3 km. On étudie de 10 à 20 sections par bassin versant, soit un taux de sondage de 10 à 1 % pour des bassins de 20 à 400 km².

Pour des bassins versants de superficie inférieure à 10 km², nous proposons d'effectuer les observations au sol sur des bandes rectilignes longues de 300 à 500 mètres, larges de 20 mètres, qui procurent un taux de sondage équivalent et une meilleure précision dans la description des états de surface. Les observations sont alors faites sur des blocs contigus homogènes de longueurs variables.

Le repérage au sol des observations

Le positionnement des lignes et des sections est facilité par l'emploi d'appareils de positionnement par satellite (GPS, Global Position System). On repère l'origine et la fin des lignes ou des sections par leurs coordonnées géographiques. La direction générale de la ligne est lue à l'aide d'une boussole; des jalons servent à y séparer les blocs homogènes et les longueurs des blocs y sont mesurées à la chaîne d'arpenteur. Sur les sections, les directions de chaque bloc de longueur 100 m sont prises à la boussole. Les observations sont réalisées à partir de pistes carrossables pour des véhicules tout terrain, par des arrêts tous les 200 m repérés au compteur hectométrique du véhicule.

Le couvert végétal

On observe successivement la strate arborée, la strate arbustive, la strate herbacée puis le tapis végétal et les résidus végétaux à la surface du sol. Les strates arborée et arbustive sont observées de manières différentes selon la densité du couvert. La strate herbacée est observée par son taux de recouvrement et son type (dense, dispersé, en touffes ou en plaques). Les observations complémentaires portent sur les espèces végétales dominantes, la hauteur et le diamètre du couvert, les distances entre individus, touffes ou plaques.

Le relief

L'observation du mésorelief, d'amplitude supérieure à 50 cm, vient s'ajouter à celle du microrelief et du nanorelief effectué à l'échelle élémentaire. Le mésorelief est constitué de bombements, de dépressions, de pointements rocheux ou cuirassés, de ravines ou de grandes termitières. On note chaque type de relief, son diamètre basal pour les formes circulaires, sa longueur et sa largeur pour les formes rectangulaires, sa hauteur et sa profondeur par rapport à la surface du sol qui l'entoure, la distance moyenne entre les formes, sa répartition spatiale (bandes, stries, réseaux, répartition aléatoire) et leur degré d'obstruction par rapport au ruissellement.

L'érosion

L'érosion éolienne se manifeste par la présence de microrides d'éolisation et par le déchaussement de ligneux. A l'échelle des lignes ou des sections, l'érosion hydrique se manifeste par des micromarches, produites par le ruissellement en nappe, des protogriffes, des griffes ou des ravineaux formés par le ruissellement concentré. L'intensité de l'érosion sera estimée en fonction de la nature et de l'amplitude des traces d'érosion.

Le sol et son organisation superficielle

Les proportions granulométriques du sol sont estimées à l'oeil et au toucher en humectant l'échantillon avec une pissette. La fraction limoneuse est souvent associée à la fraction argileuse. Les affleurements rocheux sont notés à part avec leur taux de recouvrement. Les profondeurs du sol sont estimées à partir de profils relevés dans les ravines, les marigots, les fosses ou les puisards villageois.

La répartition des types de surfaces élémentaires est notée par segment homogène de longueur variable sur les lignes, par segment de longueur fixe (100 m) pour les sections. La reconnaissance des surfaces élémentaires est associée à la description du couvert herbacé, du couvert minéral et du microrelief. Lorsque la distribution spatiale des surfaces élémentaires revêt un caractère particulier, propre à influencer sur le ruissellement, il est recommandé de schématiser cette distribution en dégagant le motif élémentaire et son mode de reproduction (damiers, îlots, couronnes, bandes).

Les activités humaines et biologiques

L'activité humaine se manifeste principalement par la mise en culture et les travaux cultureux : défrichage, labour, billonnage, sarclage, récolte. Elle se manifeste également par des aménagements hydro-agricoles : diguettes en terre ou en pierres, haies, bandes végétalisées. Hors des champs, elle s'exprime par les brûlis, la coupe de bois d'oeuvre ou de chauffage, la construction de cases, d'écoles, de pistes, de routes ou de terrains de jeux.

Le matériel nécessaire à l'observation des états de surface

Quatre types de matériel sont nécessaires pour réaliser une observation des états de surface d'un bassin versant : un matériel cartographique, un matériel de repérage sur le terrain, un matériel pour la description des états de surface et un matériel de vie en brousse.

Le matériel cartographique

- Les photographies aériennes et les cartes topographiques correspondant à la taille du bassin versant. Pour un bassin versant de superficie inférieure à 100 km² on utilisera des cartes topographiques au 1/50 000^{ème}. Jusqu'à 400 km² on pourra utiliser les cartes topographiques au 1/100 000^{ème}.
- Une composition colorée d'une image satellitaire à la même échelle que la carte topographique.
- Des crayons gras rouge et bleu pour écrire sur les photographies aériennes, des crayons de couleur, des crayons à mine en graphite, une gomme, un aiguiser-crayon.
- Une règle graduée pour les repérages sur cartes et photographies aériennes, un rapporteur.

Le matériel de repérage sur le terrain

- Un véhicule tout terrain avec un compteur hectométrique (précision d'une centaine de mètres).
- Un G.P.S. permettant un repérage au sol avec une précision d'une dizaine de mètres.
- Une boussole, une montre, un carnet de route.
- Un décamètre, une chaîne d'arpenteur ou un topo fil, une vingtaine de jalons, un niveau de géomètre (ou un tachéomètre) avec son pied et sa mire et un carnet topographique pour les levés topographiques de précision si ces levés sont prévus dans le cadre des observations.

Le matériel de description des états de surface

- La partie du catalogue des états de surface de A. Casenave et C. Valentin consacrée à la description des surfaces élémentaires et des états de surface, sous pochettes en plastique transparent.
- Une flore locale pour nommer les arbres, les arbustes et la strate herbacée.
- Un marteau de pédologie, un couteau à large lame, un pinceau, une pissette.
- Plusieurs cahiers d'écolier avec gomme, crayons.
- Un appareil photographique.

Le matériel de vie en brousse

- Un matériel de campement: lit de camp, sac de couchage, moustiquaire et accessoires, tables, chaises, lampes à gaz, torches.
- Un matériel de cuisine : réchaud, bouteilles de gaz, caisse popote, bidons d'eau, ravitaillement.
- Une pharmacie avec les produits indispensables aux premiers soins.

PRESENTATION DES OBSERVATIONS

Dans le dépouillement des observations de terrain et leur présentation, on retient celles qui sont susceptibles d'être utilisées dans les travaux de cartographie et dans l'établissement de la légende de la carte des états de surface.

Le dépouillement

Les observations au sol sont dépouillées relativement au mode d'échantillonnage : points, lignes ou sections :

- Les points sont des aires dont la superficie correspond à des cercles de 10 à 20 mètres de rayon et correspondent approximativement à un seul pixel d'une image satellitaire.
- Les lignes sont des bandes rectilignes longues de 300 à 500 mètres, larges de 20 mètres qui couvrent des groupes de 15 à 25 pixels.
- Les sections correspondent à des bandes brisées longues de 1,5 à 2 km, larges de 100 m couvrant des ensembles de 300 à 400 pixels.

Les observations de terrain utilisables dans les travaux de cartographie et de légende des unités hydrologiques sont d'une part le repérage des points, des lignes ou des sections, avec la direction des lignes et les changements de direction des sections, et, d'autre part, les informations suivantes pour chaque point, chaque segment de ligne (2 à 50 m) et chaque bloc de section (100m) :

- les taux de recouvrement du couvert végétal (strates arborée, arbustive et herbacée),
- les types de sol avec leurs composantes granulométriques et leurs couleurs,
- Le taux de recouvrement des cultures et les modes d'occupation du sol,
- la répartition des types de surfaces élémentaires.

Des tableaux, dont les modèles sont fournis en annexe de cet article, regroupent l'essentiel des observations : tableau 1 pour les lignes, tableau 2 pour les sections. Les symboles utilisés sur le tableau 2 sont regroupés sur une même page qui suit ce tableau.

La synthèse

La synthèse des observations de terrain vise à rendre ces informations utilisables dans la cartographie des états de surface et dans la modélisation hydrologique à l'échelle des unités cartographiques ou des unités radiométriques de l'image satellitaire.

L'expérience acquise en Afrique de l'Ouest nous permet de proposer comme **principaux critères de classification**, dans l'ordre de leur présentation et par zone climatique :

- **en zone sahélienne**, le type de sol, les sols nus et le taux de couverture herbacée,
- **en zone soudano-sahélienne**, le type de sol, le taux de mise en culture, les sols nus et le couvert ligneux,
- **en zone soudanienne** le type de sol, le taux de mise en culture et le couvert ligneux.

Pour réaliser cette classification, il faut tout d'abord procéder à la rédaction de **résumés sur les lignes et les sections**, ou par groupe de points présentant des caractéristiques à peu près identiques. Les sections étant rarement homogènes sur toute leur longueur, il sera souvent nécessaire de couper les sections en ensembles homogènes. Pour chaque ligne et chaque section homogène, ou chaque groupe de points, on réalisera un résumé regroupant l'essentiel des observations avec le détail de la répartition des surfaces élémentaires. Deux exemples de résumés sont associés à la description de la ligne n° 2 et de la section n° 4 dans la région de Manga au Burkina Faso.

Des tableaux regroupent ensuite les observations à l'échelle des régions et des bassins versants et fournissent la répartition des types de surfaces élémentaires pour chaque état de surface en fonction des principaux critères de la classification retenue. Un exemple de ce type de tableau est fourni pour les sols sableux fins et grossiers de la région de Manga (Tableau 3).

Un tableau de synthèse regroupe l'ensemble des lignes et sections d'une même région dans la classification générale des états de surface. Le tableau 4 ci-joint regroupe ainsi l'ensemble des lignes observées dans la région de Manga en fonction des deux critères principaux qui sont le type de sol et le pourcentage de sol cultivé.

Tableau 1 : Région de Manga Ligne n° 2 Observations du 27/02/1990

| Limites | Distances | Couvert ligneux | | Couvert herbacé | | Types de surfaces élémentaires | | | | |
|----------|-----------|--------------------------|----------------------------|-----------------|--------------|--------------------------------|------------|-----------|------------|------------|
| | | Arbres en m ² | Arbustes en m ² | Herbes en % | Litière en % | C 1 en % | DES 1 en % | VERS en % | GRO 1 en % | GRO 2 en % |
| 1 - 2 | 47 | 155 | 78 | 0 | 10 | 100 | | | | |
| 2 - 3 | 34 | 154 | 12 | 100 | 100 | | 100 | | | |
| 3 - 4 | 18 | 0 | 16 | 100 | 100 | | | 100 | | |
| 4 - 5 | 17 | 20 | 28 | 100 | 100 | | 100 | | | |
| 5 - 6 | 20 | 0 | 6 | 70 | 80 | | | | 100 | |
| 6 - 7 | 17 | 0 | 0 | 80 | 90 | | 100 | | | |
| 7 - 8 | 25,5 | 0 | 64 | 90 | 90 | | 43 | | 57 | |
| 8 - 9 | 31 | 50 | 56 | 60 | 60 | | | | 70 | 30 |
| 9 - 10 | 26 | 50 | 0 | 20 | 20 | | | | | 100 |
| 10 - 11 | 40 | 118 | 0 | 100 | 100 | | | 100 | | |
| Totaux | 275,5 | 547 | 260 | | | | | | | |
| Moyennes | | 10 | 4,7 | 67 | 69 | 17 | 29 | 21 | 20 | 13 |

Région de Manga

RESUME

Ligne n° 2

Savane arborée claire sur sols sableux gravillonnaires avec un couvert herbacé très dense.

Couvert arboré : 10 % Couvert herbacé : 67 % Cultures : 17 %
 Couvert arbustif : 5 % Litière : 69 %

Répartition des surfaces élémentaires

C 1 : 17 % GRO 1 : 20 % DES 1 : 29 % VERS : 21 %
 GRO 2 : 13 %

Tableau 2 : Région de Manga

Section n° 4

Observations du 12/04/1990

| Distances | Azimut | G | Couvert végétal | | | Occup. | Pente | Type | Couleur | Type |
|-------------|--------|---|-----------------|-----------|--------|------------------|-------|--|--------------------------|--|
| | | | en mètres | en grades | D | | | | | |
| 000 - 100 | 155 | | 1 | 1 | Gh 20 | Nat 20 Cu 80 | ↑ | 3(30)+4(35)+5(35) Fentes 2 à 5 mm | 2(100) | C 2.1(80) DES 1 (20) |
| 100 - 200 | 145 | | 1 | 10 | Rh 70 | Nat 90 Cu 10 | ↑ | 1(25)+2(10)+3(30) +4(20)+5(15) | 1(50) 4(50) | DES 1 (100) |
| 200 - 300 | 140 | | 2 | 1 | Rh 80 | Nat 100 | + ↑ | 1(10)+3(30)+4(30) +5(30) | 1(100) | DES 1 (100) Fe. 2-5 mm |
| 300 - 400 | 135 | | 8 | 0 | | Nat 50 Cu 50 | - ↑ | 1(15)+2(10)+3(30) +4(20)+5(25) | 1(100) 2(50) 4(50) | DES 1 (50) Fe. 2-5 mm C 3 (50) Bi. |
| 400 - 500 | 147 | | 8 | 0 | | Cu 100 | + ↑ | 1(5)+2(15) 3(30)+4(40) | 2(50) 4(50) | C 3 (100) Billons |
| 500 - 600 | 160 | | 12 | 0 | | Cu 100 | ↑ | 1(5)+2(30) 3(40)+4(25) | 2(50) 4(50) | C 2 1 (100) Billons |
| 600 - 700 | 162 | | 13 | 0 | | Hab 10 Cu 90 | - ↑ | 1(15)+3(25) 5(60) | 2(50) 4(50) | C 1 (50) Bi. C 3 (50) Sa. |
| 700 - 800 | 175 | | 5 | 0 | Pa. 30 | Hab 10 Cu 90 | - ↑ | 1(15)+3(25) 5(60) | 2(50) 4(50) | C 3 (100) Sar. à plat |
| 800 - 900 | 175 | | 12 | 0 | Gh 10 | Cu 100 | - ↓ | 1(5)+3(50) 4(30)+5(15) | 2(100) | C 3 (70) . C 1 (30) Bi. |
| 900 - 1000 | 175 | | 1 | 3 | | Nat 60 Cu 40 | - ↓ | 1(30)+2(30)+3(10) +4(15)+5(15) 1(30)+2(20)+4(25) +5(25) | 4(50) 5(50) 5(100) | GRO 1 (60) C 1 (40) Billons |
| 1000 - 1100 | 175 | | 21 | 1 | | Nat 100 BF 20 | ↔ | 1(40)+2(20)+4(20) +5(20) 1(5)+3(15)+5(80) | 4(50) 5(50) | DES 2 (100) Fe. 2-5 mm Term. (20) |
| 1100 - 1200 | 180 | | 6 | 25 | | Nat 100 BF 10 | - ↑ | 1(40)+2(20)+4(20) +5(20) 1(5)+3(15)+5(80) | 4(50) 5(50) | DES 2 (100) Fe. 2-5 mm Term. (20) |
| 1200 - 1300 | 180 | | 6 | 15 | | Nat 70 Cu 30 | + ↑ | 1(15)+2(5)+3(20) +4(20)+5(40) | 4(50) 5(50) | C 3 (30) Bu. DES 2 (70) |
| 1300 - 1400 | 160 | | 3 | 7 | | Cu 100 | - ↑ | 1(20)+2(10)+3(10) +4(30)+5(30) | 4(50) 5(50) | C 2.1 (50) C 3 (50) |

SYMBOLES ET ABREVIATIONS UTILISES

Sur les tableaux récapitulatifs décrivant les sections on utilise les codes, symboles et abréviations suivants :

Colonne n° 6 : h : herbes Li : litière Gh : grandes herbes Rh : herbes rases
Pa : paille

Colonne n° 7 : Nat : zone naturelle Cu : zone de culture Ja : jachère Hab : habitations
Jar : jardins Mar : marigot Car : carrière B F : bas-fond Bru : brûlis

Les taux d'occupation du sol sont exprimés en pourcentage de la surface du segment : Nat (50)

Colonne n° 8 : Les symboles utilisés sont assez explicites : ↑ = montée ↓ = descente
+ ↓ = descente à pente moyenne - ↓ = descente à pente faible
++ ↓ = descente à pente forte ↔ = terrain plat

Colonne n° 9 : Types de sols. 0 : affleurement rocheux 1 : blocs, cailloux, graviers
2 : gravillons 3 : sables grossiers 4 : sables fins 5 : limons et argiles

$1(15) + 2(30) + 3(30) + 4(25) =$ Sol à 15 % de cailloux et graviers, 30 % de gravillons, 30 % de sables grossiers et 25 % de sables fins.

Colonne n° 10 : Couleur du sol en surface 1 : blanc 2 : rose à brun clair
3 : rouge brique 4 : brun foncé, rouille 5 : noir 6 : vert
 $2(50) + 4(50)$ Sol brun clair et brun foncé en égales proportions.

Colonne n° 11 : Type de surface. Les abréviations figurant dans cette colonne correspondent à celles qui ont été définies au paragraphe intitulé "*Les types de surfaces élémentaires*", pages à , ou lors de la description des surfaces élémentaires du bassin versant étudié. Quelques abréviations supplémentaires peuvent être utilisées : Bi : billons, Bu : buttes de sarclage, To : toiture en tôle, Co : cour de concession, etc..

REGION DE MANGA RESUME Section n° 4

Cultures sur sols sableux fins et grossiers sous un faible couvert arboré et arbustif.

Couvert arboré : 7 % Cultures : 56 % Habitat : 1 %
Couvert arbustif: 4,4 % Jachères : 43 %

Sols argileux dans les dépressions et les petits bas-fonds.
Couvert arbustif et arboré très inégalement réparti.

Répartition des surfaces élémentaires

C 1 : 08 % DES 1 : 21 % GRO 1 : 04 %
C 2.1 : 15 % DES 2: 18 % C 3: 34 %

Tableau 3 : Etats de surface des sols sableux fins et grossiers de la région de Manga

| Types de surfaces élémentaires | Sols sableux fins et grossiers cultivés | | | | | | | |
|--------------------------------------|---|------|-------|----------------------------------|------|-------|------------------|-------|
| | à plus de 75 % de leur surface | | | entre 50 et 75 % de leur surface | | | entre 25 et 50 % | |
| | KS 1 | KS 2 | KS 14 | KS 4 | LS 4 | LS 11 | KS 10 | KS 13 |
| C 1.1 | 2 | | | | | | 1 | |
| C 2.1 | 73 | 42 | 16 | 20 | 23 | 63 | 2 | 11 |
| C 3.1 | 20 | 55 | 60 | 38 | 34 | | 37 | 23 |
| DES 1 | 3 | | 4 | | | 37 | 5 | 33 |
| DES 2 | | | | 5 | 18 | | | |
| DES 3 | | 3 | 18 | 22 | 21 | | 36 | 15 |
| GRO 1 | | | | 1 | | | | |
| GRO 3 | | | | | 4 | | | |
| ST 2 | | | | | | | 1 | |
| ERO | 2 | | 2 | 2 | | | 3 | 5 |
| VERS 1 | | | | 12 | | | 15 | 13 |
| Couvert ligneux | 7 | 6 | 3 | 8 | 11 | 12 | 4 | 9 |
| Jachère | 4 | 3 | 33 | 42 | 43 | 30 | 60 | 68 |
| Couvert cultural | 96 | 97 | 77 | 58 | 56 | 45 | 40 | 32 |

Tableau 4 : Classification générale des lignes et sections observées dans la région de Manga.

| Superficie cultivée | Sols gravillonnaires à graveleux | | Sols sableux fins et grossiers | Sols sablo- limoneux | Sols limono- argileux | Sols argileux vertiques |
|------------------------|-------------------------------------|--------------------|--|-------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| | sableux | argileux | | | | |
| Supérieure à 75 % | KS 13 LL 17 | | KS 1, KS 2 KS 14 | | | LS 6 |
| Entre 50 et 75 % | LS 1 | | KS 14, LS 7 LS 4, KS 4 LS 9, LS 14 | KS 12, KS 9 LS 10, LS 3 LS 13 | LS 18 | KS 11 |
| Entre 25 et 50 % | | KS 3, KS 7 LS 5 | KS 10 KS 13 | LS 3 | LS 8 KS 8 | LL 1 LS 2 |
| Entre 0 et 25 % | KS 6, KS 13 LL 2 | KL 7 LS 14 | | KL 16, KS 16 LS 16 | KL 4, KS 5 KL 15, LL 12 | |

CONCLUSION

L'observation des sols et de leurs états de surface est une phase descriptive indispensable au développement de nouvelles technologies utilisant, à des fins hydrologiques, la télédétection et les nouveaux outils de représentation géographique que sont les Systèmes d'Information Géographique.

Par état de surface, il faut comprendre la couverture végétale, le type de sol, son organisation pédologique superficielle et son état d'humectation. La procédure d'observation des états de surface proposée, inspirée des travaux d'A. Casenave et C. Valentin (1989), a été normalisée et adaptée à une utilisation pour la cartographie numérique des images satellites, cette cartographie devant elle même permettre de caractériser la réponse des sols aux chutes de pluie.

L'expérience acquise en Afrique de l'Ouest (CIEH et al., 1992) nous permet d'émettre quelques recommandations pour la réalisation de ces observations.

Les observations pédologiques ne peuvent être effectuées correctement qu'en saison sèche, tant pour les profils pédologiques que pour les organisations superficielles. Sur les sols cultivés, celles-ci doivent être complétées par des observations de l'évolution des surfaces, pendant la saison des pluies, au cours du cycle cultural. A défaut d'observations en saison des pluies, on procédera à des enquêtes sur les techniques culturales et sur le calendrier des travaux agricoles.

Les observations de la couverture végétale devraient être effectuées à différentes périodes végétatives, de manière à quantifier les modifications de la strate herbacée en fonction de sa localisation dans le paysage. Elles sont généralement couplées avec les observations pédologiques et effectuées en cours de saison sèche. Cependant, les observations effectuées en saison sèche ne suffisent pas à donner un aperçu de la variabilité temporelle du couvert herbacé, variabilité qui peut être très forte en zone tropicale sèche suffisamment humide (800 à 1000mm).

Au cours de la saison des pluies, l'humidité des sols varie en fonction de la chronique des pluies et de la position topographique du sol sur le versant. Elle est rarement observée mais il serait utile qu'elle le soit, plus particulièrement dans les bas-fonds susceptibles d'engorgement, par submersion pour les bas-fonds sahéliens, par remontée des nappes aquifères pour les bas-fonds soudaniens.

Enfin l'état de surface d'un sol est rarement figé une fois pour toute. Pour être utilisée à des fins de modélisation hydrologique, la cartographie des états de surface, généralement établie à partir d'observations effectuées en saison sèche à une date donnée, devra être complétée par des informations portant sur la variabilité des états de surface au cours de la saison des pluies, ou au fil des ans sous l'influence des hommes. Cette variabilité qui devra être introduite dans la modélisation hydrologique.

BIBLIOGRAPHIE

Casenave A. & Valentin C. (1989) - Les états de surface de la zone sahélienne. Ed. ORSTOM, Collection Didactiques, 227 p.

CIEH, LCT CEMAGREF-ENGREF, ORSTOM, BUNASOLS (1992) - Etude hydrologique avec traitement d'images de neuf bassins versants de petits barrages au Burkina Faso.

Tome 1 : Rapport général, 1^{ère} partie, 71 p. et 54 annexes.

Tome 2 : Rapport général, 2^{ème} partie : 72-107, 74 annexes.

Tome 3 : Annexes méthodologiques : 191 p.

Lamachère J.M. et Puech C. (1995) - Télédétection et régionalisation de l'aptitude au ruissellement et à l'infiltration des sols en Afrique sahélienne et nord-soudanicenne. In : Régionalisation en hydrologie, application au développement; édit. scient. L. Le Barbé et E. Servat. Actes des VIII^{es} journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, 22-23 septembre 1992; ORSTOM Editions, colloques et séminaires : 205-228.

Rodier J., Meunier M., Puech C. (1984) Le point sur les méthodes de calcul des débits de crues décennales en Afrique de l'Ouest et Centrale. Bull. de liaison du CIEH n°58, Ouagadougou, 2-9.