

Cartographie des états de surface

RESUMÉ

En Afrique de l'Ouest, l'utilisation de la télédétection pour la cartographie des états de surface permet d'envisager aisément une extension spatiale de la caractérisation de l'aptitude des sols à l'infiltration et au ruissellement. Les mesures hydrologiques effectuées sous pluies simulées dans cette région ont en effet montré l'influence déterminante de trois facteurs principaux sur le comportement hydrique des sols : le type de sol, le couvert végétal et l'organisation superficielle du sol (Casenave et Valentin, 1989). A partir des observations de terrain décrivant les états de surface, la procédure cartographique proposée (Lamachère et Puech, 1995) consiste à réaliser deux décodages des images satellite.

Un décodage primaire définit trois plans thématiques :

- un plan *végétation* élaboré sur la base de classes de densité du couvert végétal,
- un plan *sols*, différenciant les sols par leur granulométrie superficielle,
- un plan *occupation du sol*, séparant les zones cultivées des zones non cultivées.

Un décodage secondaire permet de caractériser chaque classe radiométrique résultant du traitement numérique des images, ou chaque unité hydrologique issue d'un croisement des trois plans thématiques dans un système d'information géographique, par leur composition en surfaces élémentaires types. Pour chaque classe radiométrique, ou chaque unité hydrologique, le passage des trois variables primaires (sol, végétation, occupation du sol) à la composition en types de surfaces élémentaires se fait par utilisation d'une liaison statistique établie à partir des observations de terrain. Cette liaison statistique permet de valider l'hypothèse forte selon laquelle les critères secondaires (composition en surfaces types élémentaires) sont corrélés de manière stable aux critères primaires. Au cas où elle ne le serait pas par la prise en compte des trois critères primaires, il faudrait y ajouter un autre critère suffisamment discriminant, par exemple le relief.

ABSTRACT

In West Africa, the use of remote sensing to map the surface types makes it possible to extend the soils runoff and infiltration capacities on small basins. Hydrological measurements under rain simulator conditions have shown that three main factors affect the hydrologic behaviour of the soils : type of soil, plant cover and surface soil structure (Casenave and Valentin, 1989). From ground observations of the surface types, the mapping procedure (Lamachère and Puech, 1995) consists of two decodings of the satellite images.

Jean-Marie Lamachère, Laboratoire d'hydrologie, ORSTOM, Montpellier
Christian Puech, LCT CEMAGREF/ENGREF, Montpellier, France

A first decoding which defines three thematic plans :

- a vegetation plan with classes of plant cover densities,
- a soil plan with grain size distribution classes,
- a land use plan separating the cultivated fields from the natural zones.

With a second decoding, it is possible to characterise the composition in elementary surface types of the radiometric classes resulting from the digital processing of the satellite images, or of the homogenous hydrologic units coming from the association of the three thematic plans in a Geographical Information System. For each radiometric class, or each hydrological unit, the composition in elementary surface types is obtained from the ground observations by a statistical relationship between these compositions and the three primary variables (soil, vegetation and land use). This statistical relationship makes it possible to validate the strong hypothesis from which the secondary criteria are correlated in a stable manner with the primary criteria. For cases in which this is not so, a more discriminating criteria such as relief must be added.

INTRODUCTION

A l'issue de la phase de description au sol des états de surface (cf. article 1), nous disposons d'un échantillon de points, de lignes ou de sections décrivant, à une date donnée, l'ensemble des zones apparaissant identiques sur l'image satellitaire.

La phase suivante consiste à réaliser une carte des états de surface avec sa légende, opération pour laquelle nous proposons une procédure bien adaptée à l'utilisation de l'imagerie satellitaire et à la cartographie numérique, mais qui peut également être utilisée pour la photo-interprétation.

Nous présentons successivement la cartographie des états de surface par photo-interprétation, en prenant comme exemple le bassin versant de la mare d'Oursi au Nord du Burkina Faso (Lamachère, 1987), puis la cartographie par traitement numérique des images satellitaires en prenant comme exemple le bassin versant du barrage de Louré dans la région de Manga au Centre-Sud du Burkina Faso (CIEH *et al.*, 1992).

La cartographie entièrement numérique aboutit à la création de classes radiométriquement homogènes. Chaque pixel de l'image satellitaire appartient à l'une des classes définies par l'analyse numérique. La carte des états de surface présente, dans ce cas, un aspect pointilliste. La légende de la carte et le fonctionnement hydrologique des états de surface sont alors définis pour chaque classe radiométrique.

La cartographie manuelle, même si elle s'appuie sur une analyse numérique préalable des images satellitaires, aboutit à la définition d'unités cartographiques ou d'unités hydrologiques "homogènes". La légende de la carte et le fonctionnement hydrologique des états de surface sont alors définis pour chaque unité cartographique.

Dans les deux cas, la modélisation hydrologique des écoulements à l'échelle des versants et des bassins versants pose des problèmes de saut d'échelle que nous aborderons dans la conclusion.

PRINCIPES FONDAMENTAUX

Les facteurs déterminants du comportement hydrologique des sols

Les mesures hydrologiques effectuées sous pluies simulées en Afrique de l'Ouest ont mis en évidence l'influence déterminante de trois facteurs principaux sur le comportement des sols à l'infiltration et au ruissellement (Casenave et Valentin, 1989) : le type de sol, le couvert végétal et l'organisation pédologique superficielle.

En zone de savane humide ($800 < P < 1\ 600\ mm$)

La couverture pédologique, la strate herbacée et les organisations superficielles du sol jouent des rôles équilibrés sur l'aptitude des sols au ruissellement et à l'infiltration. Le fonctionnement hydrique des sols y est donc complexe et sujet à des variations saisonnières importantes.

La couverture végétale étant souvent abondante, la cartographie des types de sols se fera souvent à l'aide d'un modèle numérique de terrain (MNT) auquel on associe une analyse de la répartition des sols selon des toposéquences judicieusement choisies sur le bassin versant pour tenir compte des principaux types de toposéquences.

En zone de savane sèche ($400 < P < 800\ mm$)

La strate herbacée et les organisations superficielles du sol semblent seules déterminer le comportement hydrodynamique superficiel des sols. Le pourcentage de couverture végétale est le principal facteur explicatif du ruissellement et de l'infiltration. Pour une pluviométrie inférieure à 800 mm, la couverture végétale étant de faible densité, la cartographie des sols pourra être établie sans utiliser un MNT.

En zone sahélienne sèche ($200 < P < 400\ mm$)

Le couvert végétal herbacé se raréfie; à la fois moins dense et plus fugace, il perd son rôle primordial au profit des organisations pédologiques superficielles.

En zone subdésertique ($P < 200\ mm$)

Seules les organisations pédologiques superficielles conditionnent l'infiltrabilité des sols.

La procédure cartographique

Dans une première étape, quelle que soit la zone considérée, la cartographie des états de surface consiste finalement à réaliser trois cartes distinctes :

- une carte des sols,
- une carte du couvert végétal,
- une carte de l'occupation des sols.

Dans une seconde étape, on procède à la caractérisation du fonctionnement hydrologique des classes radiométriques ou des unités cartographiques en réalisant un décodage secondaire de l'image. Ainsi, pour chaque pixel de l'image satellite, ou pour chaque unité cartographique définie par le traitement de l'image, le passage des trois variables primaires (sol, végétation, occupation

du sol) à la composition en types de surfaces élémentaires se fait par utilisation d'une liaison statistique établie à partir des observations de terrain. Ce faisant, nous partons de l'hypothèse que les critères secondaires (composition en surfaces types élémentaires) sont corrélés de manière stable aux critères primaires dans le contexte du bassin versant étudié. Cette hypothèse forte doit être validée. Au cas où elle ne le serait pas, un autre critère suffisamment discriminant devra être utilisé, par exemple le relief.

La légende cartographique

Les unités cartographiques sont définies par leurs caractéristiques qui résultent de la synthèse des observations de terrain (cf. article 1). Ces caractéristiques sont communes à des ensembles de points, de lignes ou de blocs dans les sections correspondant au mode d'échantillonnage utilisé. La première phase de traitement des données de terrain, exposée dans l'article 1, consiste à regrouper les points, les lignes ou des séries de blocs dans les sections, en fonction de critères correspondant à l'aptitude des sols au ruissellement et à l'infiltration.

La classification des observations de terrain

L'expérience acquise en Afrique de l'Ouest (CIEH *et al.*, 1990) nous permet de retenir l'ordre hiérarchique suivant :

- en zone sahélienne : le type de sol (1), les sols nus (2) puis la mise en culture (3) et le taux de couvert herbacé (4),
- en zone soudano-sahélienne : le type de sol (1), le taux de mise en culture (2), les sols nus (3) et le couvert ligneux (4),
- en zone soudanienne : le type de sol (1), le taux de mise en culture (2) et le couvert ligneux (3).

La légende

Chaque unité cartographique doit être définie par l'association des trois ou quatre caractéristiques précédentes et par leur composition moyenne en surfaces élémentaires.

Les tableaux de synthèse des observations (cf. article 1) regroupent déjà, dans des classes croisant les deux à quatre critères précédents, tous les points, lignes et sections présentant les mêmes caractères et ce regroupement des observations permet d'établir la composition moyenne d'une classe en surfaces types élémentaires. Cette composition moyenne équivaut à un diagramme de répartition. Cependant, pour qu'une classe ainsi définie corresponde à une unité cartographique, il est indispensable qu'elle puisse être identifiée sur les photographies aériennes ou sur les compositions colorées de l'image satellitaire.

CARTOGRAPHIE PAR PHOTO-INTERPRÉTATION

La cartographie des états de surface par interprétation des photographies aériennes a été développée par Valentin sur de nombreux bassins versants d'Afrique de l'Ouest. Il y consacre huit pages du *Catalogue des états de surface* (pages 147 à 154). La cartographie des états de surface par photo-interprétation des images satellitaires a été développée par Lamachère (1987) dans la région d'Oursi, au Nord du Burkina Faso, en zone sahélienne sèche. Celui-ci a établi

manuellement la carte des aptitudes au ruissellement et à l'infiltration des sols de la région d'Oursi, avant de procéder à une analyse numérique des images SPOT.

Synthèse des observations au sol dans la région d'Oursi

Le tableau 1 synthétise le regroupement des observations au sol effectuées dans la région d'Oursi au cours de l'année 1986 en prenant comme critères du regroupement des lignes :

1. les types de sols, associés à leur position géomorphologique,
2. le pourcentage de sol nu encroûté,
3. le taux de recouvrement herbacé.

TABLEAU 1

Classification générale des lignes observées dans la région d'Oursi

Géomorphologie		Buttes et massifs	Glacis arénacés	Formations éoliennes	Glacis argileux	Bas-fonds
Sols nus encroûtés à moins de 10 %	Couvert herbacé 0 à 10 %	Sols à éléments grossiers	Sols à sables grossiers	Sables fins Erg vif, C 2 C 3, C 4	Sols argileux	Sols vertiques
	Sup. à 50%			B6, B7, B9, B 10 O 1, O 2, O 10		B 4
de 10 à 20 %	30 à 50 %			O 7, D 1		
	Sup. à 50%			O 5, O 14, G 1		
20 à 30 %	30 à 40 %			O 11		
30 à 50 %	0 à 20 %			C 1, O 6		
50 à 60 %	30 à 40 %		B 3			
60 à 80 %	20 à 30 %		G 5, G 4	O 12	B 5	
80 à 90 %	10 à 20 %	K 11	G 2, D 2	B 8	K 3, K 2	
90 à 100 %	inf. à 10 %	O 13, K 12 D 10	D 5, B 2 D 7, D 8		K 6, G 3 B 1, D 3	

On distingue sur ce tableau 18 groupes d'états de surface qui peuvent être ramenés à 13 si on définit des classes de sols nus encroûtés qui correspondent à des écarts de 20% dans les pourcentages de recouvrement, au lieu de 10 % comme c'est le cas dans le tableau 1.

La figure 1 montre la localisation des lignes et des champs sur lesquels ont été réalisées les observations au sol. Le tableau 2 présente les 18 types de surfaces élémentaires de la région d'Oursi et la légende de la carte des états de surface (figure 2) détaille la composition des principales unités cartographiques par rapport à ces 18 types fondamentaux de surfaces élémentaires.

Le tracé des unités cartographiques

Le tracé des limites de chaque unité cartographique doit pouvoir être réalisé à partir des seuls documents disponibles : relevés de terrain, carte topographique, photographies aériennes, images satellitaires, etc. Il est facilité par les relations topographiques entre les différentes unités. Comme pour la couverture pédologique, la distribution des états de surface est spatialement ordonnée. La mise en évidence d'un tel ordre et sa compréhension phénoménologique limitent considérablement les risques d'erreurs.

FIGURE 1
Localisation des lignes et parcelles cultivées observées en 1986 dans la région d'Oursi

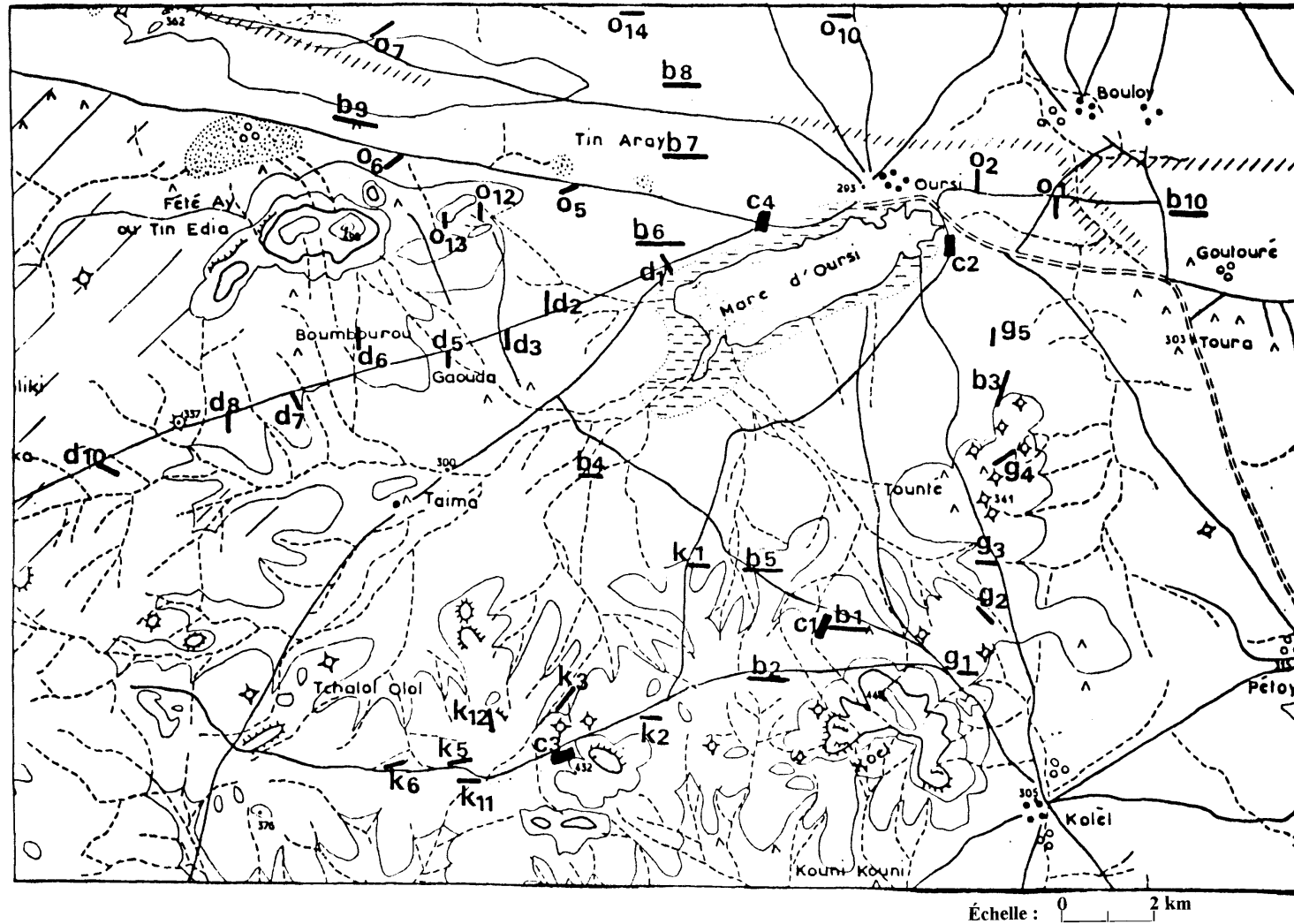


TABLEAU 2

Relations hydrodynamiques des types de surfaces élémentaires sur le bassin versant de la mare d'Oursi.

Types de surfaces élémentaires	Coefficients hydrodynamiques				Intensités limites de ruissellement		Principales caractéristiques des surfaces
	a	b	c	d	I_0	I_{min}	

Surfaces élémentaires cultivées

C 1	0,250	0,0050	- 00,042	2,5	50	25	Sols sableux fins après sarclage
C 2	0,390	0,0040	0,010	4,5	20	7	Sols sableux fins 50 mm après sarclage
C 3	0,900	0,0010	0,021	6,6	10	5	Sols sableux fins 100 mm après sarclage

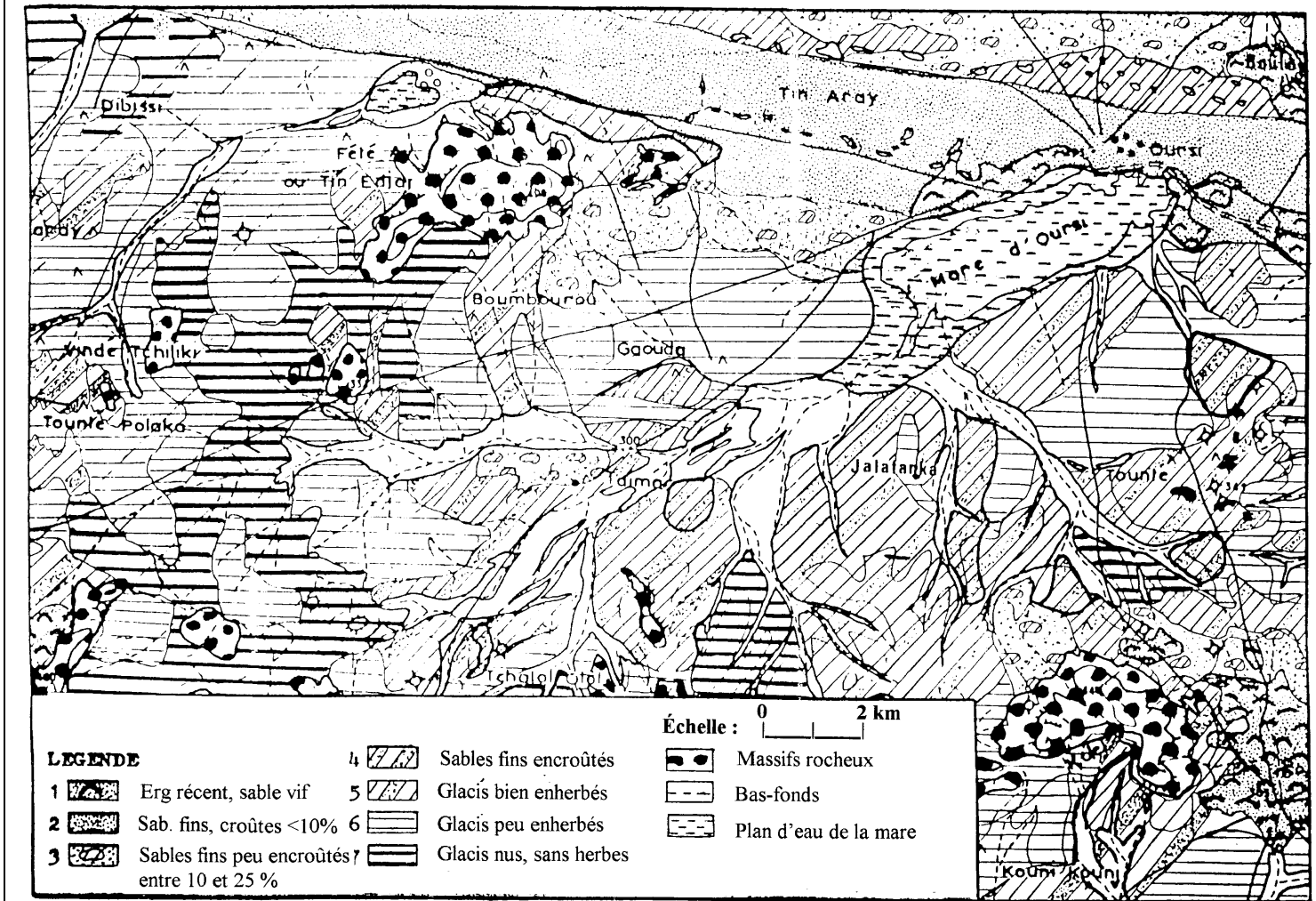
Surfaces élémentaires à faible activité faunique, sans charge grossière

DES 1	0,100	0,0030	0,010	5,0	50	30	Sols sableux bouillants (erg vif)
DES 2	0,300	0,0030	0,010	8,0	30	20	Sols sableux avec 80 % de couvert herbacé
DES 3	0,470	0	0,150	9,8	20	10	Sols sableux, moins de 50 % de couv. herbacé
ST 2	0,90	0,0005	0,020	6,6	15	2	2 micro-horizons
ST 3	0,85	0,0030	0,010	8,0	22	4	3 micro-horizons
DEC 1	0,861	0	0,154	11,6	10	2	Fort couvert herbacé
DEC 2	0,900	0,0010	0,040	8,1	10	2	Sans couvert herbacé
ERO 1	0,940	0	00,100	7,5	15	1	Sol nu argileux
ERO 2	0,950	0,0010	0,090	9,0	13	1	Sol nu sablo-argileux
ERO 3	0,970	0	0	2,1	2	1	Sol nu sablo-limoneux
ERO 4	0,82	0,0005	0,077	10,5	10	5	Sol nu des micro-buttes éoliennes

Surfaces élémentaires à faible activité faunique, avec charge grossière supérieure à 40 %

GRO 1	0,990	0	0	2,0	-	-	Granite
GRO 2	0,930	0,0060	0,0011	6,8	10	3	Cuirasse ferrugineuse
GRO 3	0,870	0	0,081	6,1	15	5	Pierres et graviers libres
GRO 4	0,990	0	0,0750	7,9	10	2	Pierres et graviers enchâssés

FIGURE 2
Carte des états de surface de la région d'Oursi



LEGENDE DE LA CARTE DES ÉTATS DE SURFACE DE LA RÉGION D'OURSIS

Unité 1 (H1) : Sable vif de l'erg récent et champs sarclés sur sables fins très épais.

Champ sarclés avec surfaces élémentaires de type C1.

Erg vif avec surfaces élémentaires de type DES1.

Unité 2 (H2) : Sables fins très épais couverts à moins de 10 % de sols nus encroûtés.

Champs C2 et C3, 100 mm de pluies après sarclage (Surfaces élémentaires : 0,7 C2 + 0,3 C3).

Lignes B6, B7, B9, B10, D1, G1, O1, O2, O10, O14.

Surfaces élémentaires : 0,80 DES2 + 0,15 DES3 + 0,05 ERO3, avec des proportions variables des types DES2 et DES3 mais une nette supériorité du type DES2.

Unité 3 (H3) : Sables fins de l'erg ancien ou des jupes sableuses, couverts à plus de 10 % et moins de 25 % par des sols nus encroûtés. Lignes O5, O7 et O11.

Surfaces élémentaires : 0,20 DES2 + 0,55 DES3 + 0,25 ERO3, avec des proportions variables des types DES2 et DES3 mais une nette supériorité du type DES3.

Unité 4 : Sables fins couverts à plus de 25 % et moins de 50 % par des sols nus encroûtés (H5), erg ancien ou jupes sableuses et glacis recouverts à plus de 30 % par des sables fins bien enherbés (H6). Lignes O6, B5, B8, O12 et champ C1.

Surfaces élémentaires sur sables (H5) : 0,10 DES2 + 0,56 DES3 + 0,34 ERO3

Sur glacis (H6) : 0,33 DES3 + 0,03 DEC1 + 0,50 ERO1 + 0,05 GRO2 + 0,09 GRO3

Sur sables, les sols nus encroûtés sont représentés par le type ERO3. Sur glacis, les types DES2 et DES3 correspondent aux buttes de sable fin éolien.

Unité 5 (H7) : Glacis couverts entre 15 % et 30 % de sables fins bien enherbés.

Lignes G4, G5, K11, D2 et B2.

Surfaces élémentaires G5 : 0,20 DES3 + 0,05 GRO1 + 0,35 ST3 + 0,30 ERO1 + 0,10 DEC1

Surfaces élémentaires K11 : 0,16 DES3 + 0,65 GRO3 + 0,19 ST3

Le type DES3 qui correspond à l'existence de buttes de sable éolien détermine l'aptitude du glacis au ruissellement et à l'infiltration.

Unité 6 (H8) : Glacis couverts à moins de 15 % de sables fins.

Lignes D5, D7, D10 et G2.

Surfaces élémentaires : 0,08 GRO3 + 0,10 GRO4 + 0,60 ST3 + 0,10 ERO2 + 0,12 ERO4

Unité 7 (H8) : Glacis argileux sur sols bruns sans végétation herbacée ou couvert à plus de 60 % par des gravillons ferrugineux enchâssés dans une pellicule structurale.

Lignes B1, D3, G3, K1, K2, K6

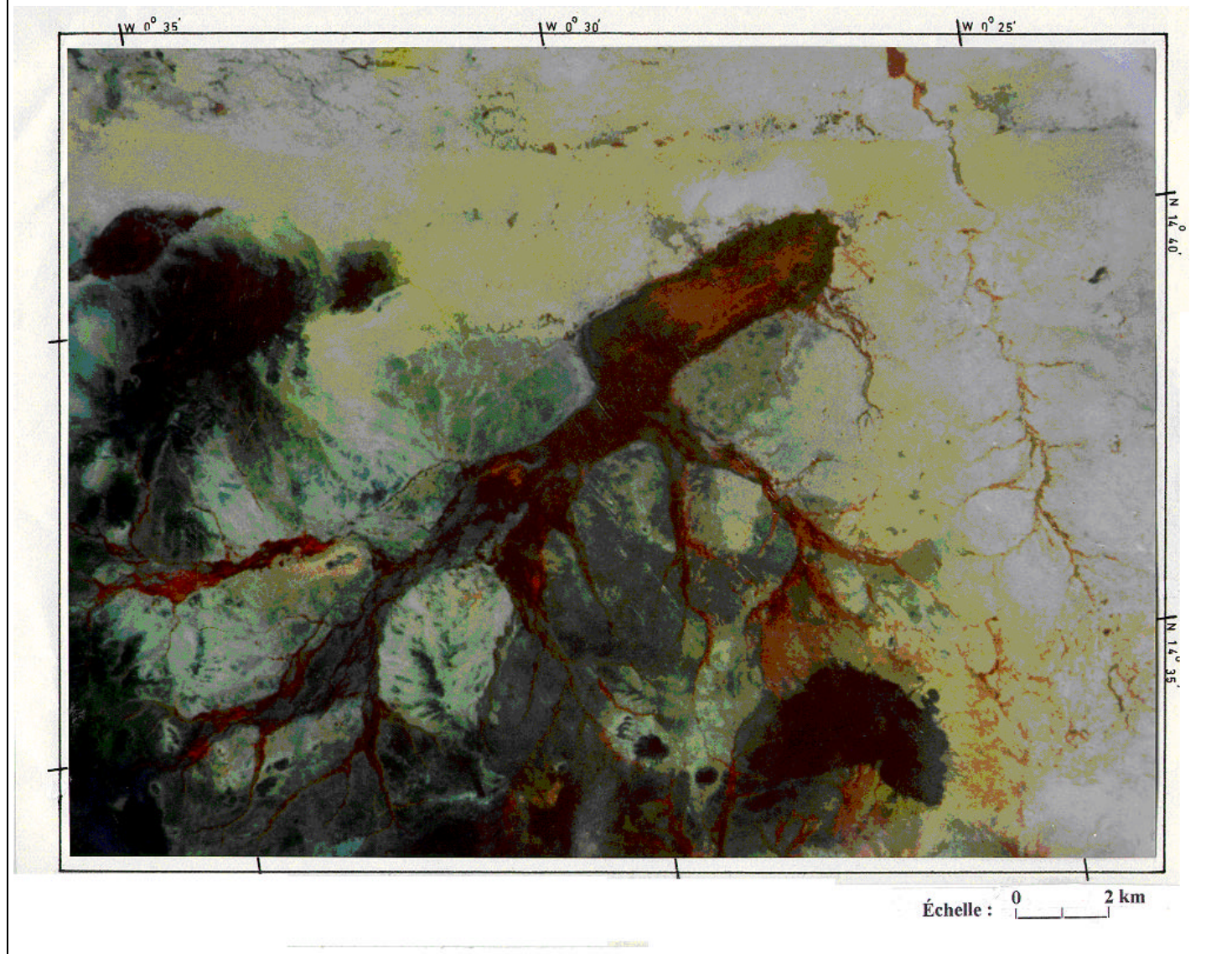
Surfaces élémentaires : 0,10 DES3 + 0,15 GRO3 + 0,30 ST3 + 0,40 ERO1 + 0,05 DEC1

Unité 8 (H10) : Les massifs rocheux sont formés de surfaces très hétérogènes constituées de blocs rocheux et de dépôts éoliens ou limono-argileux entre les blocs rocheux.

Unité 9 (H9) : Les bas-fonds sont formés de sols vertiques au comportement hydrologique très particulier. Ces sols sont caractérisés en saison sèche par de larges fentes de retrait (forte perméabilité) qui se referment au cours de la saison des pluies (imperméables). Ligne B4.

Unité 10 : La mare d'Oursi est caractérisée par son plan d'eau très souvent couvert d'une végétation hygrophile (nénuphars, cypéracées, graminées).

FIGURE 3
Composition colorée de l'image SPOT du 4/09/1986 de la région d'Oursi



Dans la phase de photo-interprétation, il est nécessaire de s'imposer certaines règles rigoureuses. Les relations établies entre les points d'observation, les lignes ou les sections, et les types de grisés ou l'agencement des couleurs de la composition colorée doivent être énoncées. Cette clef d'interprétation permet de dresser le document cartographique.

Exemple du bassin versant de la mare d'Oursi

Le paysage de la région d'Oursi (figure 3) se subdivise en quatre grands ensembles géomorphologiques qui définissent le type de sol (critère 1):

- le système dunaire qui comprend l'erg ancien, l'erg récent et les jupes sableuses,
- les massifs rocheux, buttes cuirassées et inselbergs granitiques,
- les glacis qui se distinguent les uns des autres par la nature et la taille de leur recouvrement minéral (pierres, graviers, gravillons, sables),
- les bas-fonds, les thalwegs et les mares formant le réseau hydrographique.

La caractérisation visuelle des unités cartographiques

L'examen visuel de l'image SPOT (figure 3), prise dans la région d'Oursi au cours de l'hivernage 1986, montre que les grands ensembles géomorphologiques peuvent être décomposés en zones visuellement homogènes par leur forme, leur composition colorée et la taille et l'agencement des éléments qui les constituent. Dix unités cartographiques ont été finalement définies par photo-interprétation de l'image SPOT du 4 septembre 1986 (Lamachère, 1987). Elles sont présentées à la figure 2 (unités 1 à 10) sous une forme symbolique et leurs caractéristiques sont consignées dans la légende associée à cette carte. Cette légende fournit un bref descriptif des unités et les compositions moyennes en types de surfaces élémentaires des lignes et champs associés à ces unités.

La caractérisation des unités cartographiques peut être énoncée de la manière suivante :

Unité 1 (H1) : La couleur de l'image est homogène, jaune très clair à blanche.

Unité 2 (H2) : La couleur de l'image est jaune rosé avec de petites taches, rouges à grises, dispersées qui représentent le couvert végétal ligneux réparti en petits îlots conférant à l'ensemble un aspect moutonné.

Unité 3 (H3) : La couleur de l'image varie du jaune clair au rouge foncé selon la position topographique de la surface et l'abondance du couvert végétal herbacé. L'unité est caractérisée par une ébauche de réseau hydrographique et l'apparition de lignes rouges discontinues.

Unité 4 : Sur l'erg ancien ou sur les jupes sableuses (H5), la couleur dominante de l'image reste jaune rosé mais des plaques vertes apparaissent correspondant sur le terrain à l'existence de sols rubéfiés très encroûtés. Sur les glacis (H6), la couleur de l'unité est verte, parcourue de nombreuses taches jaunes et roses unies les unes aux autres.

Unité 5 (H7) : Sur les glacis arénacés, aux sols issus de la décomposition des granites, l'image est jaune très clair, légèrement teintée de rose ou parsemée de quelques taches roses discontinues. Sur les glacis argileux, aux sols issus de roches métamorphiques ou de roches vertes, elle est vert sombre, parsemée de quelques taches jaunes et roses discontinues.

Unité 6 (H8) : Les taches roses sur les glaciers arénacés, jaunes et roses sur les glaciers argileux, sont ici d'importance plus limitée que sur l'unité 5 et les couleurs tendent à s'uniformiser : jaune clair pour les glaciers arénacés et vert sombre pour les glaciers argileux et pierreux.

Unité 7 (H8) : L'image est vert sombre uniforme, rayé de traits rouges et continus marquant le réseau de drainage.

Unité 8 (H10) : La couleur est ici presque noire. Les formes sont massives et leurs bords festonnés.

Unité 9 (H9) : L'image est rouge foncé à gris foncé. Les formes sont linéaires et filamenteuses, de largeur croissante en direction de la mare d'Oursi près de laquelle elles s'épanouissent en larges bandes.

Unité 10 (H10) : L'image est rouge foncé, localement noire ou bleue. La forme est compacte, allongée avec une orientation Sud-Ouest à Nord-Est.

CARTOGRAPHIE PAR TRAITEMENT NUMÉRIQUE

Méthodologie générale

Chaque objet au sol réfléchit, absorbe ou retransmet une partie de l'énergie solaire qu'il reçoit. La télédétection passive analyse l'énergie lumineuse réémise par ces objets en fonction de leurs caractéristiques propres. Les capteurs des satellites d'observation de la terre transforment en nuances de gris l'énergie échantillonnée en chaque point de l'image. Cette énergie dépend du domaine spectral de sensibilité de chaque capteur, et chaque point élémentaire de l'image (pixel) représente une tache au sol dont la dimension est fonction de la résolution géométrique du capteur (100 à 400 m² pour le satellite SPOT, 900 m² pour LANDSAT TM).

Les différences d'émission des objets au sol, en qualité spectrale et en intensité radiométrique, permettent de les distinguer. Par référence aux objets reconnus et localisés au sol avec précision, il est possible de réaliser une cartographie thématique en supposant que les mêmes objets provoquent le même type d'émission. Une cartographie thématique peut ainsi être élaborée. Par exemple, des objets tels que le sol et la végétation présentent des réflectances (énergie rayonnée / énergie incidente) particulières selon la longueur d'onde incidente, leur état d'humidité, leur couleur et leur rugosité. En télédétection, le but du traitement d'image est d'utiliser au mieux les différences caractérisant chaque objet pour améliorer sa lisibilité.

Une cartographie thématique doit s'astreindre au respect de certaines contraintes :

- une première contrainte d'indépendance de la méthode vis-à-vis de la région étudiée,
- une contrainte d'optimisation du traitement (utilisation de l'ensemble des informations disponibles),
- une contrainte de validation de la cartographie par la reconnaissance des objets,
- une contrainte d'évaluation de la validité spatiale de la cartographie (précision et extrapolation hors de la zone à cartographier).

La contrainte de validation par la reconnaissance des objets au sol nous impose une localisation très précise des observations de terrain sur l'image satellitaire. Nous allons donc commencer par décrire cette première opération.

Localisation des lignes et sections

La carte topographique reste un document de base indispensable à toute cartographie par télédétection. Il convient donc de rassembler les cartes topographiques les plus récentes de la zone à cartographier. Lorsqu'une carte à grande échelle (1/50 000) n'existe pas, il est parfois nécessaire, pour les bassins versants de superficie inférieure à 50 km², d'en faire établir une par photo-restitution. Les photographies aériennes sont elles-mêmes très utiles pour la localisation des observations au sol.

Le protocole des observations de terrain est construit de telle sorte que les points et lignes sont localisés à proximité de pistes ou de chemins identifiables sur les photographies aériennes et dessinés sur les cartes topographiques. Les sections sont implantées sur des pistes carrossables (cf. figure 1) dont certains tronçons peuvent être reconnus directement sur les images satellitaires.

Le début, ou la fin, d'une ligne ou d'une section est le plus souvent localisé à partir d'un repère facilement identifiable sur la carte topographique, la photographie aérienne et l'image satellitaire (croisement de pistes, d'une piste et d'un marigot, bâtiment, construction).

Après un calage de l'image satellitaire d'après la carte topographique, pour tenir compte de la déformation des pixels due à une inclinaison de l'angle de vue et pour situer le Nord géographique et le Nord magnétique, il est possible, à partir des coordonnées géographiques relevées au GPS (Global Position System), et des directions relevées à la boussole, de faire tracer automatiquement les lignes et les sections sur l'image satellitaire. Les traçages manuel ou automatique nécessitent un contrôle de la localisation des lignes et sections par confrontation avec la carte topographique et les photographies aériennes.

Décodage primaire des images

Technique

La technique de classification des images est maintenant très classique. Elle comprend les étapes suivantes :

- *La création de néocanaux* (indice de végétation, indice de brillance, indice de couleur des sols) permet d'éliminer les effets de paramètres perturbateurs tels que l'effet atmosphérique ou l'humidité. A partir des observations au sol, l'indice de végétation peut être directement relié au couvert végétal ou à la biomasse végétale (figures 4 et 5).
- *La constitution de classes radiométriques* ayant une signification thématique. Dans ce but, chaque section et chaque ligne sont caractérisées par leur signature spectrale à l'aide des néocanaux. Les classes radiométriques sont ensuite constituées en fonction du thème qui doit être dégagé. La vérification de la cohérence des classes est réalisée sur des nuages bidimensionnels (figures 6 et 7). La classification proprement dite est faite avec des logiciels de traitement d'image proposant diverses techniques (maximum de vraisemblance, nuées dynamiques, centres mobiles).

FIGURE 4
Régression entre l'indice de végétation (IV) et le recouvrement total de la végétation (RTT)

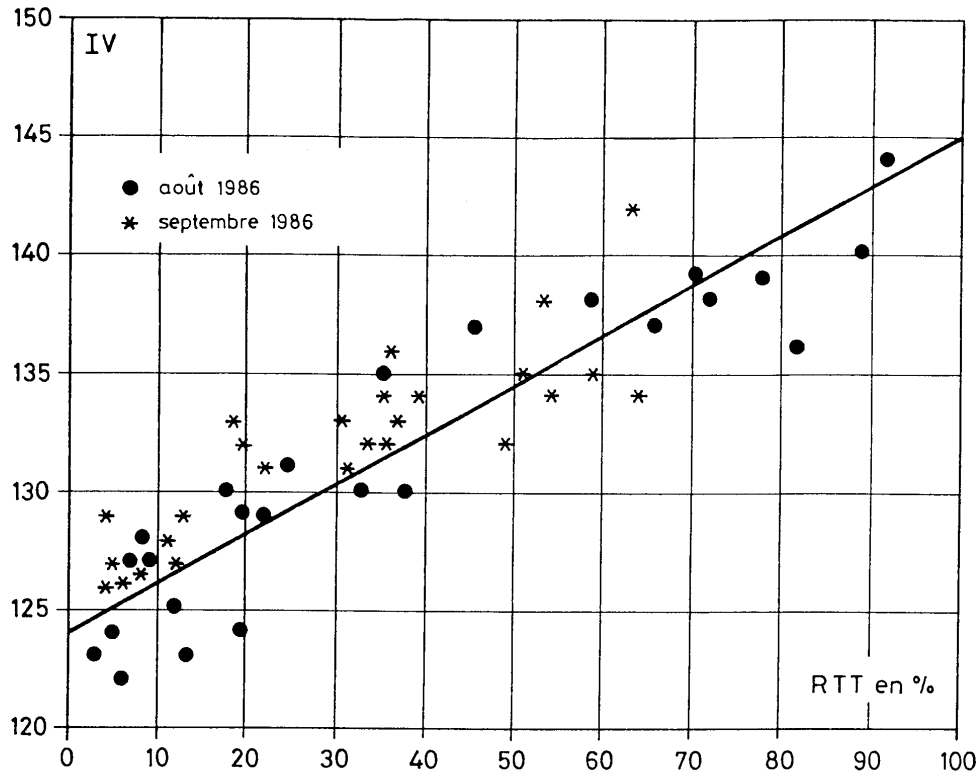


FIGURE 5
Régression entre la phytomasse herbacée (Bio) et l'indice de végétation (IV)

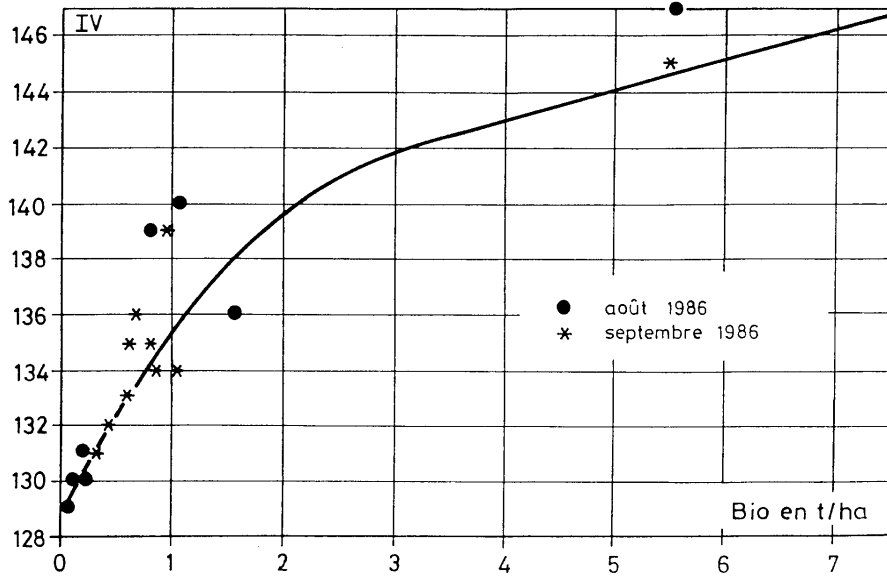


FIGURE 6
Représentation numérique des lignes dans le plan des indices de brillance et végétation

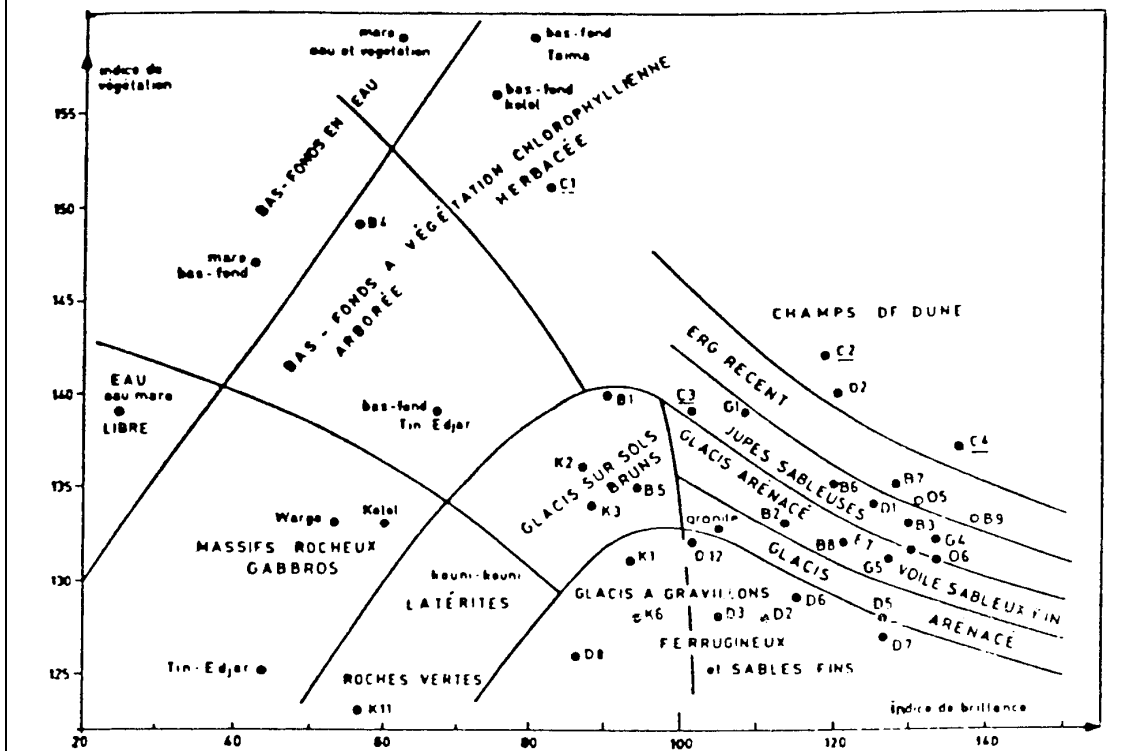


FIGURE 7
Représentation numérique des lignes dans le plan des indices de brillance et de couleur

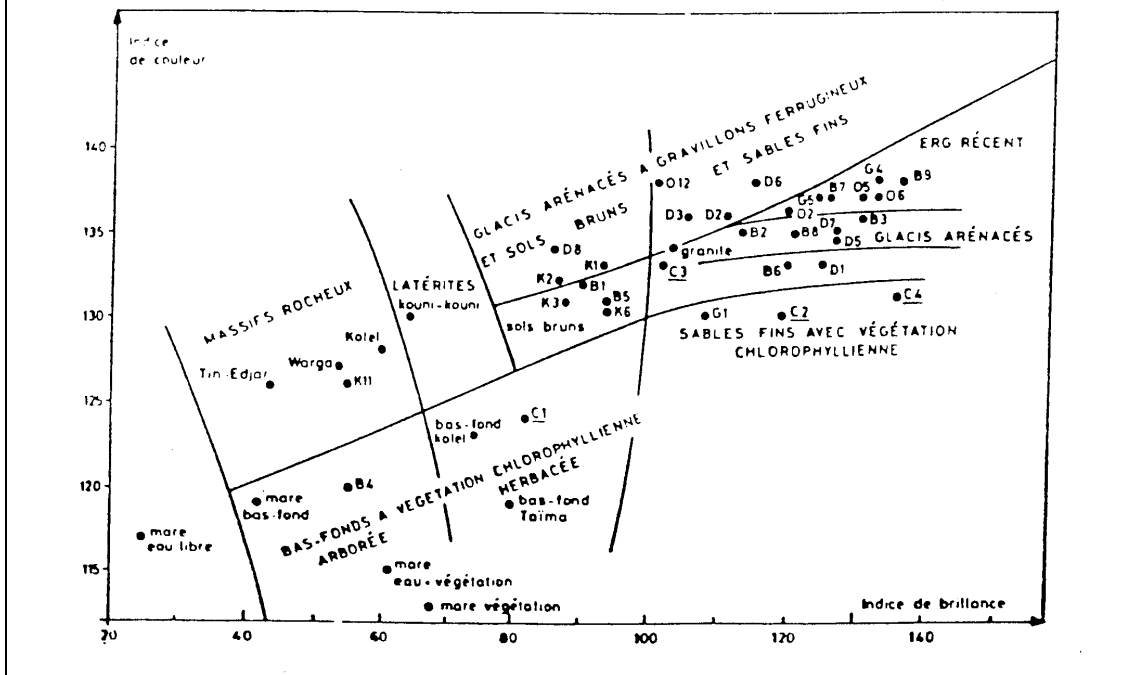
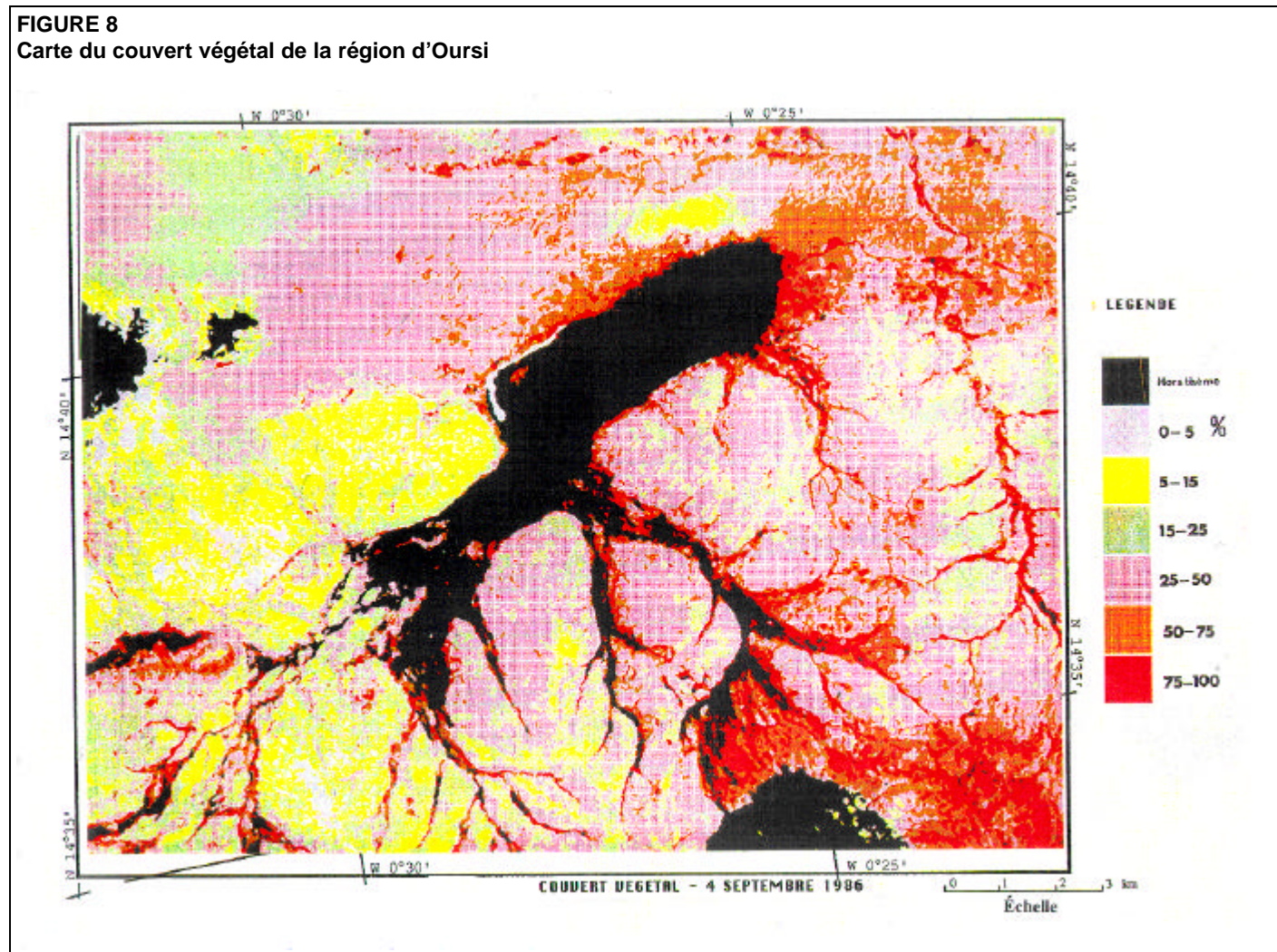


FIGURE 8
Carte du couvert végétal de la région d'Oursi



- *La validation des résultats* est effectuée sur des matrices de confusion. Cette opération critique peut conduire à une redéfinition des échantillons et à une nouvelle classification. Elle peut également conduire à une redéfinition des néocanaux.

Pour la cartographie des états de surface, on réalise successivement trois classifications thématiques qui définissent trois plans:

- un plan "végétation" élaboré sur la base de classes de densité du couvert végétal,
- un plan "sols" différenciant les sols par la taille et la nature des éléments à la surface du sol : cuirasses, affleurements rocheux, blocs, graviers, sables grossiers, sables fins, limons et argiles,
- un plan "occupation du sol" séparant les zones cultivées des zones non cultivées.

Le plan "végétation"

Il est généralement possible de définir cinq ou six classes de couvert végétal. En zones sahélienne et tropicale sèche, le seuil de perception de la végétation est très bas. Dans ces régions, il est possible de subdiviser les faibles couverts végétaux (0 à 25 %) en sous-classes à très faible pourcentage de recouvrement (0 à 5 % et 5 à 15 %). Des classes complémentaires (eau, brûlis, massifs rocheux) doivent être définies pour tenir compte des pixels qui sortent de la classification générale propre à la végétation. Ainsi, pour le bassin versant de la mare d'Oursi, sur l'image SPOT du 4 septembre 1986 nous avons défini les classes suivantes (figure 8) :

- A0, classe hors thème sur laquelle la classification ne peut être appliquée,
- A1 avec un taux de recouvrement végétal inférieur ou égal à 5 %,
- A2 avec un taux de recouvrement végétal compris entre 5 et 15 %,
- A3 avec un taux de recouvrement végétal compris entre 15 et 25 %,
- A4 avec un taux de recouvrement végétal compris entre 25 et 50 %,
- A5 avec un taux de recouvrement végétal compris entre 50 et 75 %,
- A6 avec un taux de recouvrement végétal supérieur à 75 %.

Le plan "sols"

Les types de sols, au nombre de six d'après la codification utilisée pour la description des états de surface, décrivent essentiellement la granulométrie superficielle. Or, sur les relevés de terrain, la description de la granulométrie des sols sur les lignes et les sections se présente sous la forme de mélanges aux pourcentages connus (75 % de sables fins et grossiers, 20 % de limons et argiles, 5 % de gravillons). Des groupes de types de sols ont donc été constitués en conservant les deux éléments dominants de la description. Dans l'exemple précédent, la codification du groupe serait la suivante : 75 S - 20 L.

Sur les sections, l'homogénéité des sols a été recherchée sur des longueurs supérieures à 200 mètres avec des différences inférieures à 10 % dans les pourcentages granulométriques. La classification des observations de terrain conduit généralement à distinguer une dizaine de classes parmi lesquelles un certain nombre seront conservées à l'issue du traitement numérique de l'image.

La classification de l'image Landsat du 18 décembre 1988 sur le bassin versant du barrage de Louré (CIEH *et al.*, tome 7, 1990) a permis de distinguer sept classes de types de sols avec quatre classes supplémentaires non reliées directement à un type de sol :

1. les brûlis,
2. le plan d'eau en amont du barrage de Louré,
3. les cultures irriguées,
4. la forêt,
5. les sols grossiers, à plus de 70 % de couverture grossière,
6. les sols limono-argileux,
7. les sols sablo-limoneux (S50 - L50),
8. les sols sableux à éléments grossiers (S50 - G50),
9. les sols gravelo-limono-argileux avec blocs de cuirasse (BLG),
10. les sols gravelo-limono-argileux sans blocs de cuirasse (GL),
11. les sols sableux à plus de 70 % de couverture sableuse.

Le plan "occupation du sol"

Dans la description des lignes et des sections, l'occupation du sol est caractérisée par trois termes différents : culture, jachère ou nature. La définition théorique des classes est réalisée en combinant ces trois termes deux à deux et en créant des classes à un seul terme si celui-ci couvre au moins 70 % de la surface du sol. On aboutit ainsi à définir neuf classes d'occupation du sol auxquelles on peut ajouter la classe habitat si celui-ci occupe des superficies importantes du bassin versant.

A l'issue de la classification numérique de l'image, on ne retient généralement qu'un nombre limité de quatre à cinq classes différentes qui tiennent compte du type dominant d'occupation du sol. Sur le bassin versant situé en amont du barrage de Louré, quatre classes d'occupation du sol ont été retenues (CIEH *et al.*, tome 7, 190):

1. cultures,
2. nature,
3. brûlis,
4. plan d'eau en amont du barrage de Louré.

Décodage secondaire des images

Cette étape vise à caractériser la composition des classes radiométriques, résultant du traitement numérique des images, en types de surfaces élémentaires caractérisant le fonctionnement hydrologique superficiel des sols. En partant de l'hypothèse selon laquelle les critères secondaires (composition en types de surfaces élémentaires) sont corrélés de manière stable aux critères primaires (sol, végétation, occupation du sol), deux procédures peuvent être utilisées pour le décodage secondaire de l'image : une utilisation des classifications numériques en combinant les trois plans élémentaires pixel par pixel ou une cartographie d'unités hydrologiques homogènes, en associant manuellement ou automatiquement les pixels aux propriétés hydrologiques très voisines.

Classification numérique

Pour chaque pixel de l'image, le passage des trois variables primaires (sol, végétation, occupation du sol) à la composition en types de surfaces élémentaires se fait par utilisation d'une liaison statistique établie à partir des observations de terrain. Cette procédure conduit à caractériser le fonctionnement hydrologique de chaque pixel indépendamment des pixels qui l'entourent.

Cartographie des unités d'états de surface

Cette procédure diffère de la précédente dans la mesure où l'opérateur définit des unités cartographiques spatialement homogènes au niveau de la restitution cartographique. L'opération peut être réalisée manuellement et, dans ce cas, ressemble à une photo-interprétation. Elle peut être réalisée avec un logiciel de traitement numérique des images en associant des classes radiométriques aux caractéristiques voisines, comme c'est le cas pour la carte des états de surface de la région d'Oursi de la figure 9. Elle peut aussi être réalisée en associant les trois plans "végétation", "sols" et "cultures" dans un système d'information géographique (figure 10). Des opérations de dégradation de l'information permettent d'éliminer les pixels isolés, ou les petits groupes de pixels, et de rassembler dans une même classe les unités dont les caractéristiques d'état de surface sont identiques.

Les corrélations définies entre critères primaires et critères secondaires conduisent, à l'issue de cette étape, à associer une composition en surfaces types élémentaires à tout pixel ou à toute unité cartographique. La cartographie des états de surface peut alors être considérée comme terminée. Cependant, l'hypothèse forte selon laquelle les caractères secondaires sont corrélés aux caractères primaires doit être validée.

Validations

On peut effectuer deux types de validation :

- une validation géographique sur les parcelles d'entraînement, en vérifiant si chaque pixel des parcelles d'entraînement (lignes et sections) se trouve ou non dans la bonne classe,
- une validation statistique sur les parcelles d'entraînement en comparant les histogrammes des parcelles d'entraînement aux histogrammes des classes.

Le tableau 3 présente la matrice de confusion des classes de sols sur le bassin versant de Manga au Burkina Faso. Cette matrice montre une excellente identification des unités 1, 2, 3, 4 et 8, une assez bonne identification des unités 6, 7 et 10 mais une définition difficile pour les unités 9 et 11 et très difficile pour l'unité 5 qui se confond avec les unités 7 et 8.

Une bonne validation géographique entraîne généralement une bonne validation statistique, l'inverse n'étant pas vrai. Lorsque l'échantillon des observations au sol est suffisant, on valide également la classification, ou la cartographie, sur des parcelles de contrôle non utilisées comme parcelles d'entraînement. L'utilisation des parcelles de contrôle permet de juger des possibilités d'extension de la cartographie.

FIGURE 9
Carte des états de surface de la région d'Oursi (voir légende de la figure 2)

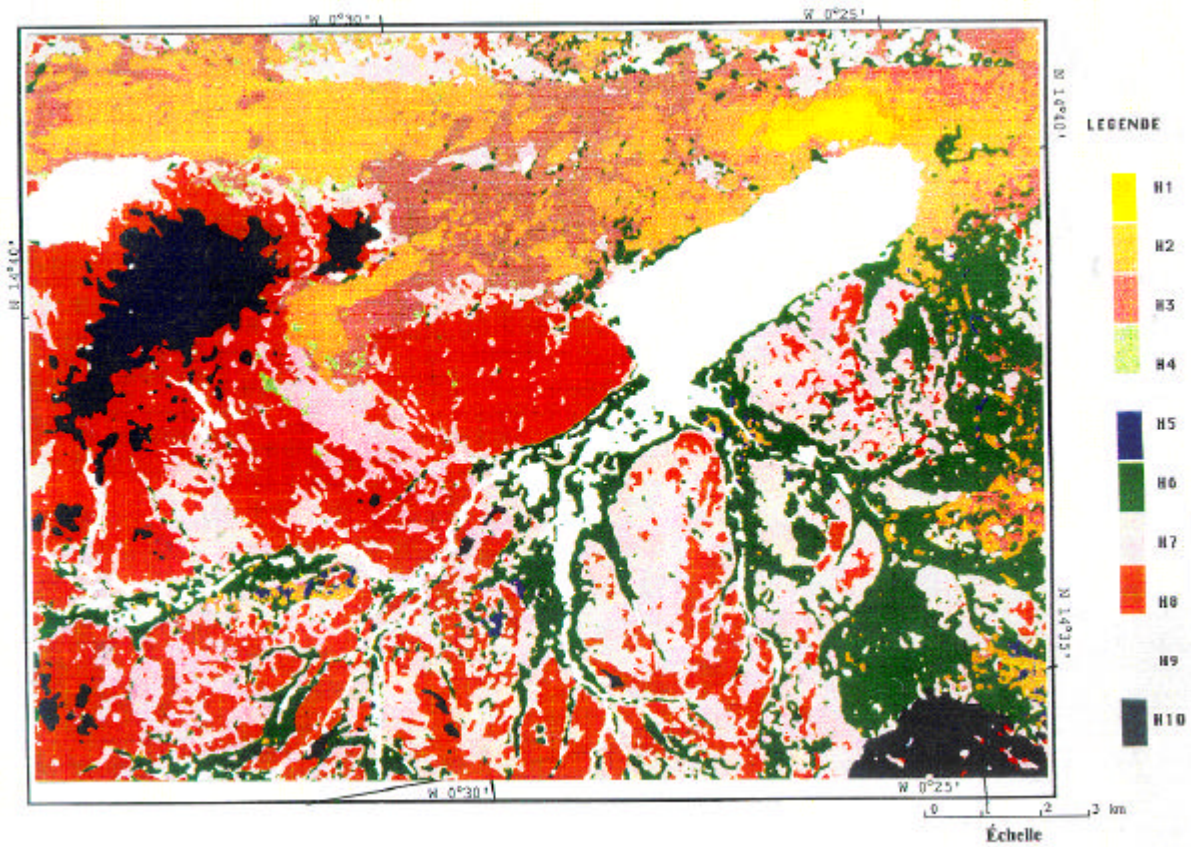


FIGURE 10
Cartographie des états de surface (unités hydrologiques) par association dans un SIG de cartes des sols, du couvert végétal et des zones cultivées (Estèves, com. Pers.)

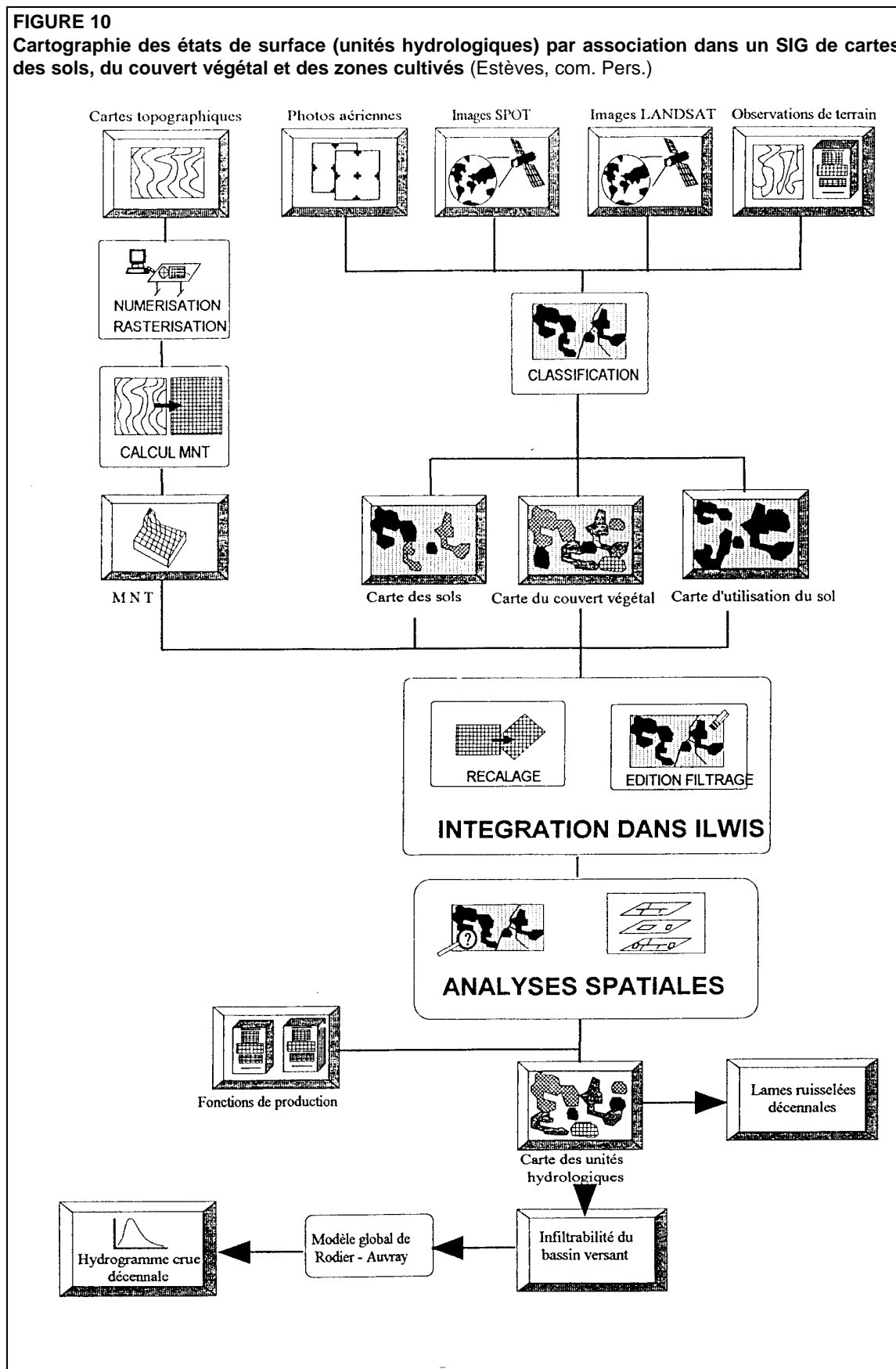


TABLEAU 3

Matrice de confusion des classes de types de sols sur le bassin versant de Manga, Burkina Faso (CIEH *et al.*, tome 7, 1990).

Thèmes	Composition	Pourcentages de pixels bien classés radiométriquement										Effec.	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		11
1	Brûlis	97,9	0,1	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	703
2	Eau	0,5	98,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	382
3	Cult. irri.	0,0	0,0	86,3	0,4	0,4	8,4	0,0	0,0	0,0	1,3	0,0	227
4	Forêt	0,0	0,0	0,0	92,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	6,0	2,0	50
5	G	0,0	0,0	0,7	0,7	16,1	10,9	36,5	22,6	2,9	6,6	2,0	137
6	L	0,0	0,0	6,1	0,0	2,4	77,4	3,0	2,4	1,2	6,7	0,6	164
7	SL	0,0	0,0	0,9	0,9	2,4	1,3	67,7	7,5	5,1	5,4	8,6	467
8	GS	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	3,2	4,8	87,1	0,0	1,6	1,6	62
9	BLG	0,0	0,0	0,0	0,0	5,5	1,4	16,4	1,4	53,4	16,4	4,1	73
10	GL	0,0	0,0	6,7	0,0	4,4	4,4	8,9	1,5	6,7	62,2	5,2	135
11	S	0,0	0,0	0,2	0,4	1,0	2,0	26,2	3,5	1,5	8,9	55,4	202

CONCLUSION

Les résultats obtenus sur la validation des trois plans "sols", "végétation" et "occupation du sol" montrent qu'en zone sahélienne les taux d'erreur sont faibles sur les plans "sols" et "végétation". Par contre, il peut subsister des confusions gênantes sur certains types de sols, comme les sols sableux fins éoliens et les sols sableux arénacés de la région d'Oursi, qui n'ont absolument pas les mêmes aptitudes au ruissellement et à l'infiltration. Sur le bassin versant de la mare d'Oursi, ceux-ci n'ont pu être séparés que par localisation visuelle des nuages de points dans l'espace des néocanaux à partir d'une image de fin de saison des pluies.

Lorsque la végétation est abondante, la confusion entre classes de végétation, dont le recouvrement est supérieur à 40 %, est forte; mais elle ne prête généralement pas à conséquence pour la reconnaissance des états de surface. En zone tropicale sèche, sur les bassins fortement cultivés, ce sont les plans "sols" et "occupation du sol" qui présentent les taux d'erreur les plus faibles. Sur les bassins peu cultivés, le plan "sols" n'est plus utilisable, car le couvert végétal recouvre totalement les sols et il faut faire appel au relief, moyennant un MNT (modèle numérique de terrain), pour la reconnaissance des sols.

Afin de cartographier avec une bonne fiabilité les états de surface, il semble nécessaire de procéder, de manière systématique, à un décodage primaire des images satellite en trois plans : "sols", "végétation" et "occupation du sol". La fusion de ces trois plans permet généralement d'établir une carte des états de surface avec une bonne précision. En zone tropicale sèche, lorsque le couvert végétal est abondant sur le bassin versant, le recours au relief et à la description de toposéquences pour la cartographie des sols devient indispensable.

La cartographie des états de surface constitue la première étape d'une modélisation spatialisée des ruissellements à l'échelle d'un bassin versant. La seconde étape consiste à tenir compte de la variabilité spatiale et temporelle des averses. La troisième étape comprend la prise en compte de l'évolution temporelle saisonnière des états de surface : développement de la végétation herbacée, travaux culturaux et enroulement des sols cultivés, engorgement des sols de bas de pente à proximité des bas-fonds. La dernière étape consiste à modéliser d'une part le transfert des ruissellements de l'amont des versants jusqu'aux drains, et d'autre part l'écoulement et les pertes dans le réseau hydrographique.

Au vu des résultats déjà obtenus, on peut soutenir avec raison qu'une meilleure compréhension et une meilleure modélisation des processus hydrologiques à l'échelle des bassins

versants viendront d'observations sur l'évolution des états de surface et de leur comportement hydrodynamique, d'observations à l'échelle des versants aux sols relativement imperméables, perméables et très perméables et de l'analyse des conditions de rétention, d'écoulement et d'infiltration dans les réseaux hydrographiques. La généralisation du traitement des images satellite et l'emploi de modèles d'agrégation spatiale utilisant les SIG devraient faciliter la modélisation de ces processus.

BIBLIOGRAPHIE

Casenave, A. et Valentin, C. 1989. *Les états de surface de la zone sahélienne*. Ed. ORSTOM, Collection Didactiques, 227 p.

CIEH, LCT CEMAGREF-ENGREF, ORSTOM et BUNASOLS 1990. *Utilisation de la télédétection satellitaire pour la caractérisation hydrologique de neuf bassins versants au Burkina Faso*.

Tome 1 : Bassin versant de Tiébélé.

Tome 2 : Bassin versant de Boukouma.

Tome 3 : Bassins versants de Gha et Sian.

Tome 4 : Bassin versant de Zéguédéguin.

Tome 5 : Bassin versant d'Ytenga.

Tome 6 : Bassin versant de Nagbangré et oued Bila.

Tome 7 : Bassin versant de Louré (Manga).

CIEH, LCT CEMAGREF-ENGREF, ORSTOM et 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. 1987. Cartographie des aptitudes au ruissellement et à l'infiltration des sols d'un bassin versant sahélien par interprétation des images SPOT : le bassin versant de la mare d'Oursi, Burkina Faso. In : *SPOT1, utilisation des images, bilan, résultats*, Paris, novembre 1987, CEPADUES-EDITIONS . p. 41-51.

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-soudanienne. 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.

Puech, C. 1993. *Détermination des états de surface par télédétection pour caractériser les écoulements des petits bassins versants*. Thèse Université Joseph Fourier, Grenoble, 215 p.