

TELEDETECTION ET CARTOGRAPHIE DES ETATS DE SURFACE

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

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 en Afrique de l'Ouest. 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 Pucch, 1995) consiste à réaliser deux décodages des images satellites.

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, par leur composition en surfaces élémentaires types. Pour chaque classe radiométrique, le passage des trois variables primaires (sol, végétation, occupation du sol) à la composition en surfaces types élémentaires se fait par utilisation d'une liaison statistique établie à partir des observations de terrain.

Le croisement, dans un Système d'Information Géographique, des trois plans thématiques issus du décodage primaire permet également, selon une procédure analogue au décodage secondaire, la cartographie d'unités hydrologiques homogènes caractérisées, grâce aux observations de terrain, par leurs compositions en surfaces élémentaires. L'hypothèse forte selon laquelle les critères secondaires (composition en surfaces types élémentaires) sont corrélés de manière stable aux critères primaires doit être validée. 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.

INTRODUCTION

A l'issue de la phase de description au sol des états de surface, 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 description au sol de la répartition des surfaces élémentaires types va nous permettre de modéliser le comportement hydrologique des états de surface à partir de la connaissance acquise sur le fonctionnement des surfaces élémentaires grâce aux opérations de simulation de pluie menées en Afrique de l'Ouest par les hydrologues et les pédologues de l'ORSTOM (Casenave et Valentin, 1989).

La phase suivante consiste à réaliser une carte des états de surface, avec sa légende, opérations pour lesquelles 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. La cartographie est en effet une opération totalement manuelle, entièrement numérique ou réalisée par un panachage des deux méthodes.

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. L'aspect de 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

La procédure cartographique

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, 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).

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.

Quelle que soit la zone considérée, la cartographie des états de surface consiste finalement à réaliser dans un premier temps 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 surfaces types 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.

Les états de surface et leur comportement hydrologique

La cartographie des états de surface d'un bassin versant a pour objectif la modélisation hydrologique et la reconstitution des apports et des crues des marigots formant le réseau hydrographique du bassin. La légende cartographique doit associer une description normalisée de la surface des sols aux mesures de ruissellement réalisées par des expériences de simulation de pluie, entreprises en Afrique de l'Ouest, au cours de la décennie 1980-1989, par les hydrologues et les pédologues de l'ORSTOM.

La maniabilité du mini-simulateur de pluies a permis en effet de mesurer le ruissellement sur des parcelles élémentaires (1m^2), sur un grand nombre de sites expérimentaux localisés en zones sahélienne et soudanienne au Sénégal, au Burkina Faso, au Niger, en Côte d'Ivoire et au Togo. L'ouvrage intitulé "Les états de surface de la zone sahélienne", réalisé par A. Casenave et C. Valentin (1989), fournit une clef de détermination des principaux types de surfaces élémentaires avec leur description ainsi que les relations hydro-pluviométriques qui leur sont associées.

La fonction de production à l'échelle élémentaire

La formulation générale de la fonction de production d'une surface élémentaire, proposée par Casenave et Valentin est la suivante :

$$Lr = (a + b IK) Pu + c IK - d \quad (1)$$

Avec : Lr : lame ruisselée (mm),

Pu : pluie utile (mm),

IK : indice des précipitations antérieures correspondant à un indice d'humectation,

a, b, c, d : paramètres caractéristiques du sol et de son état de surface.

Ce type de relation n'est utilisable que pour de fortes averses correspondant aux protocoles expérimentaux utilisés en simulation de pluie. Pour les averses aux intensités pluviométriques complexes, inférieures puis supérieures à la capacité d'infiltration du sol, nous proposons d'utiliser la notion d'intensité de pluie limite du ruissellement pour définir la pluie utile (Pu) de la relation n° 1. La pluie utile (Pu) est définie comme la hauteur pluviométrique de l'averse correspondant à des intensités (IP) supérieures à l'intensité de pluie limite du ruissellement (Il).

$$Pu = \sum_{\Delta t} (IP) \quad \text{pour } IP > Il \quad (2)$$

L'intensité de pluie limite du ruissellement varie entre une valeur maximale (Il_0) lorsque le sol est sec ($IK = 0$) et une valeur minimale (Il_{\min}) lorsque le sol est saturé sur une certaine profondeur ($IK > 50$ mm). Les valeurs minimales sont souvent très proches, pour les sols non encroûtés, des valeurs de la conductivité hydraulique des sols à saturation (Ks). Les valeurs maximales et minimales de l'intensité de pluie limite du ruissellement sont fournies dans le catalogue des états de surface de la zone sahélienne.

Agrégation à l'échelle des unités cartographiques

A l'échelle des unités cartographiques, on définit le **potentiel de ruissellement** de cette unité comme la somme des lames ruisselées à l'échelle élémentaire. En tenant compte de la possibilité d'existence de plusieurs pluviomètres sur le bassin versant, la formulation mathématique du potentiel de ruissellement prend la forme de la relation n° 3.

$$PR_u = \sum_{n,i} (\alpha_{n,i,u} * Lr_{n,i,u}) \quad (3)$$

Avec : $Lr_{n,i,u} = Lr_{n,i}$ de la relation (1)

PR_u est le potentiel de ruissellement de l'unité hydrologique u ,

$Lr_{n,i,u}$ est la lame ruisselée de la surface élémentaire i attachée au pluviomètre n sur l'unité hydrologique u ,

$\alpha_{n,i,u}$ est le coefficient de pondération de la surface élémentaire i .

Pendant une durée variable au cours de la saison des pluies (une à plusieurs semaines) on peut associer à chaque unité hydrologique une liste de surfaces élémentaires et leurs coefficients de pondération qui correspondent à la composition des unités hydrologiques en surfaces élémentaires types. La composition en surfaces élémentaires types d'une même unité hydrologique est en effet susceptible d'évoluer au cours de la saison des pluies. Dans ce cas, on modifie la liste des types de surfaces élémentaires et leurs coefficients de pondération en fonction du développement de la végétation et du calendrier cultural (Lamachère, 1994).

La formulation proposée ci-dessus (relations 1 à 3) est donc très générale. Elle permet, par le calcul de la pluie utile, de ne faire intervenir que des intensités pluviométriques susceptibles de ruisseler. Elle permet également, si on dispose de plusieurs pluviomètres sur le bassin versant, de rattacher les états de surface aux différents pluviomètres en fonction de leurs localisations.

Ainsi calculée, la lame ruisselée doit être considérée comme une moyenne pondérée des ruissellements à l'échelle élémentaire. On opère ici un changement d'échelle du comportement hydrologique puisqu'on passe d'une référence implicite de 1 m^2 (taille de la mesure en simulation de pluies), au comportement hydrologique d'une surface beaucoup plus grande, celle d'un versant ou d'une partie de versant. La lame ruisselée à la nouvelle échelle n'est pas la somme des lames ruisselées élémentaires. La plupart du temps elle lui sera inférieure, d'où son appellation de potentiel de ruissellement.

CARTOGRAPHIE PAR PHOTO-INTERPRETATION

La cartographie des états de surface par interprétation des photographies aériennes a été développée par C. 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 J.M. 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.

La représentation cartographique nécessite l'identification d'unités définies par leurs caractéristiques, celles-ci devant être communes à plusieurs points, plusieurs lignes ou plusieurs sections. La première phase consiste donc à regrouper les points, les lignes ou les sections en fonction de critères correspondant à l'aptitude des sols au ruissellement et à l'infiltration. La seconde phase consiste à tracer les limites de chaque unité cartographique.

La classification des observations

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).

Chaque unité cartographique doit être définie en fonction des surfaces élémentaires qui la composent. Les tableaux de synthèse des observations regroupent, dans des classes croisant les 2 à 4 critères précédents, dans l'ordre hiérarchique des zones géographiques, tous les points, lignes et sections présentant les mêmes caractères. Le 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 que cette classe puisse être identifiée sur les photographies aériennes ou sur les compositions colorées de l'image satellitaire.

Tableau 1 : Classification générale des lignes observées dans la région d'Oursi (zone sahélienne).

Géomorphologie		Buttes, crêtes et massifs	Glacis arénacés	Formations éoliennes	Glacis argileux	Bas-fonds
Sols nus encroûtés à	Couvert herbacé	Sols à éléments grossiers	Sols à sables grossiers	Sables fins	Sols argileux	Sols vertiques
moins de	0 à 10 %			Erg vif, C 2 C 3, C 4		
10 %	Sup. à 50 %			B6, B7, B9, B 10 O 1, O 2, O 10		B 4
de 10	30 à 50 %			O 7, D 1		
à 20 %	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	

Le tracé des unités cartographiques

Le tracé des limites de chaque unité cartographique doit être possible à partir des seuls documents disponibles : relevés de terrain, carte topographique, photographies aériennes, 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.

Dans la phase de photo-interprétation, il est nécessaire de s'imposer certaines règles rigoureuses : à chaque groupe de points, lignes ou segments de sections, correspond un type de grisé sur la photographie aérienne ou une combinaison de couleurs sur l'image satellitaire.

Les relations établies entre les points d'observation, les lignes ou les sections, et les types de grisé 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 1) 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 leur recouvrement minéral,
- les bas-fonds, les thalwegs et les mares formant le réseau hydrographique.

L'examen visuel des images SPOT, prises 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 composition colorée, la taille des éléments qui les constituent, leur texture et leur structure. Dix unités cartographiques ont été finalement définies par photo-interprétation de l'image SPOT du 4 septembre 1986 (Lamachère, 1987). Elles sont présentées sur la figure 2.

Unité 1 (H1) : Sable vif de l'erg récent et champs sarclés sur sables fins très épais. La couleur de l'image est jaune très clair à blanche sur les sables vifs et les champs sarclés.

Unité 2 (H2) : Sables fins très épais couverts à moins de 10 % de sols nus encroûtés, champs non sarclés. La couleur de l'image est jaune rosé avec de petites taches, rouges à grises, dispersées, représentant le couvert végétal ligneux réparti en petits îlots conférant à l'ensemble un aspect moutonné.

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. 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 : 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).

Sur l'erg ancien ou sur les jupes sableuses, 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, la couleur de l'unité est verte parcourue de taches jaunes et roses nombreuses, réunies les unes aux autres.

Unité 5 (H7) : Glacis couverts entre 15 % et 30 % de sables fins bien enherbés. Sur les glacis arénacés, aux sols issus de la décomposition des granites, la couleur de 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, la couleur de l'image est vert sombre, parsemée de quelques taches jaunes et roses discontinues.

Unité 6 (H8) : Glacis couverts à moins de 15 % de sables fins. Les taches roses sur les glacis arénacés, jaunes et roses sur les glacis argileux sont ici d'importance plus limitée que sur l'unité 5 et les couleurs de l'unité tendent à s'uniformiser vers le jaune clair pour les glacis arénacés, vers le vert sombre pour les glacis argileux et pierreux.

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. La couleur de l'image est vert sombre uniforme, rayée de traits rouges et continus, marquant le réseau de drainage.

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

Unité 9 (H9) : Les bas-fonds. La couleur de 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 : La mare d'Oursi. La couleur de l'image est rouge foncé, localement noire ou bleue. La forme est compacte, allongée avec une orientation sud-ouest à nord-est.

Une légende est associée à la figure 2 et à la cartographie numérique de l'image SPOT (Figure 3) de septembre 1986. Cette légende fournit les relations hydro-pluviométriques moyennes correspondant à de fortes averses. Pour les averses plus faibles, il faudrait utiliser la notion de pluie utile, revenir aux relations établies à l'échelle des surfaces élémentaires et aux répartitions des surfaces élémentaires types sur les unités cartographiques.

CARTOGRAPHIE PAR TRAITEMENT NUMERIQUE

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 niveaux 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 la lisibilité de l'image.

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 utilisant l'ensemble des informations disponibles,
- une contrainte de **validation** de la cartographie par la reconnaissance des objets au sol,
- 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, sur l'image satellitaire, des observations de terrain. 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 soient localisées 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 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 prise 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. 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).

- 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 5 à 6 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 du barrage de Louré, dans la région de Manga au Burkina Faso, nous avons défini (CIEH et al., tome 7, 1990) 13 classes différentes de recouvrement végétal :

- A1 avec un taux de recouvrement végétal inférieur à 2 %,
- A2 avec un taux de recouvrement végétal compris entre 2 et 5 %,
- A3 avec un taux de recouvrement végétal compris entre 5 et 15 %,
- A4 avec un taux de recouvrement végétal compris entre 15 et 40 %,
- A5 avec un taux de recouvrement végétal supérieur à 40 %,
- A6 et A10 correspondant au plan d'eau du barrage de Louré,

- A7 et A13 pour les zones de brûlis,
- A8 pour les sols nus, sans végétation,
- A9 pour les bas-fonds
- A11 pour la forêt et A12 pour le forêt claire.

L'image traitée est ici une image Landsat TM de début de saison sèche (18 décembre 1988). Pour la cartographie des états de surface, plusieurs classes ont été regroupées, ce qui permet de réduire le nombre des classes à 6.

Le plan "sols"

Les types de sols, au nombre de 6 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 2 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 a permis de distinguer 7 classes de types de sols avec 4 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 9 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 4 à 5 classes différentes qui tiennent compte du type dominant d'occupation du sol. Sur le bassin versant situé en amont du barrage de Louré, 4 classes d'occupation du sol ont été retenues :

- 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 que les critères secondaires (composition en surfaces élémentaires types) 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 3 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 surfaces types 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 hydrologiques homogènes

Cette procédure diffère de la précédente en ce que l'opérateur définit des unités cartographiques spatialement homogènes. L'opération peut être réalisée manuellement; dans ce cas elle ressemble à une photo-interprétation. Elle peut aussi être réalisée en associant les trois plans "végétation", "sols" et "cultures" dans un Système d'Information Géographique (SIG). Des opérations de dégradation de l'information permettent ensuite d'éliminer les pixels isolés, ou les petits groupes de pixels, et de rassembler dans une même classe les unités dont le fonctionnement hydrologique est identique.

La figure 7 présente le schéma général de cartographie des états de surface (unités hydrologiques homogènes) à l'aide d'un S.I.G. et la figure 3 le résultat d'une cartographie numérique d'unités hydrologiques homogènes sur le bassin versant de la mare d'Oursi.

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 que 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.

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.

Tableau 2 : Matrice de confusion des classes de types de sols sur le bassin versant de Manga (Burkina Faso, zone tropicale sèche)

Thèmes	Composition	Pourcentages de pixels bien classés radiométriquement											Effectif
		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

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, très difficile pour l'unité 5 qui se confond avec les unités 7 et 8.

CONCLUSION

Les résultats obtenus sur la validation des 3 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, par l'utilisation d'un MNT (Modèle Numérique de Terrain), pour la reconnaissance des sols.

La reconnaissance directe des états de surface, à partir d'une classification radiométrique des images, conduit, dans la plupart des cas, à des taux de confusion trop faibles pour que la classification soit utilisable. Afin de cartographier avec une bonne fiabilité les états de surface, il semble donc nécessaire de procéder, de manière systématique, à un décodage primaire des images satellites 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 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 encroûtement 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 raisons qu'une meilleure compréhension et une meilleure modélisation des processus hydrologiques à l'échelle des bassins versants viendra d'une part d'observations sur l'évolution des états de surface et de leur comportement hydrodynamique, d'autre 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 satellites et l'emploi de modèles d'agrégation spatiale utilisant les SIG, devraient faciliter la modélisation de ces processus.

BIBLIOGRAPHIE

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

CIEH, LCT CEMAGREF-ENGREF, ORSTOM, 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 Zeguedeguin.

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, 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.

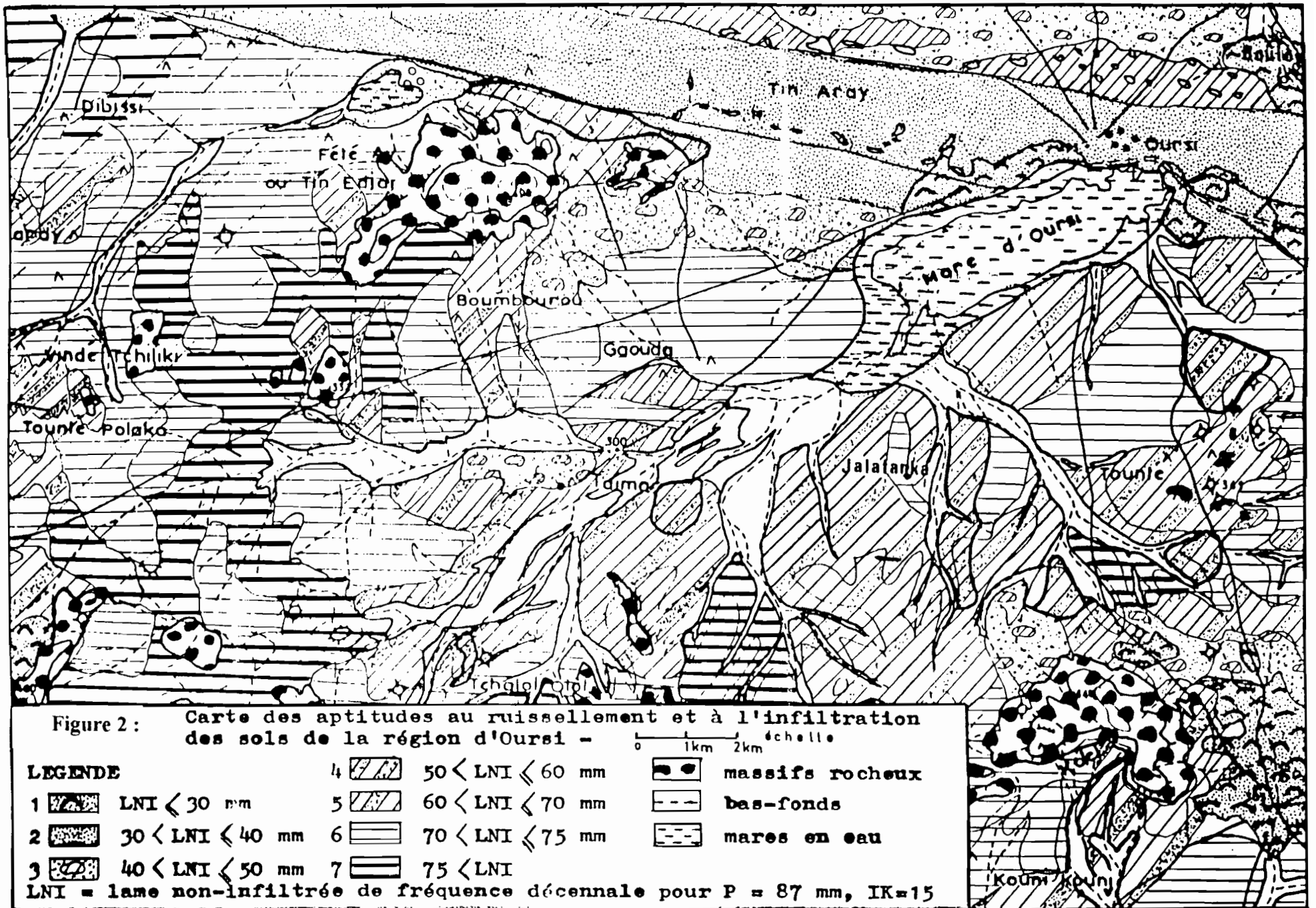
Tome 2 : Rapport général, 2^{ème} partie : 72-107, 74 annexes.

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 sahéen 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 : 41-51.

Lamachère J.M. (1994) - Variabilité spatio-temporelle des états de surface en zones sahéenne et soudanienne (Burkina Faso) : effets sur le ruissellement et sa modélisation. Communication aux neuvièmes journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, 13-14 septembre 1994, 11 p.

Lamachère J.M. et Puech C. (1995) - Télédétection et régionalisation de l'aptitude au ruissellement et à l'infiltration des sols en Afrique sahéenne 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.



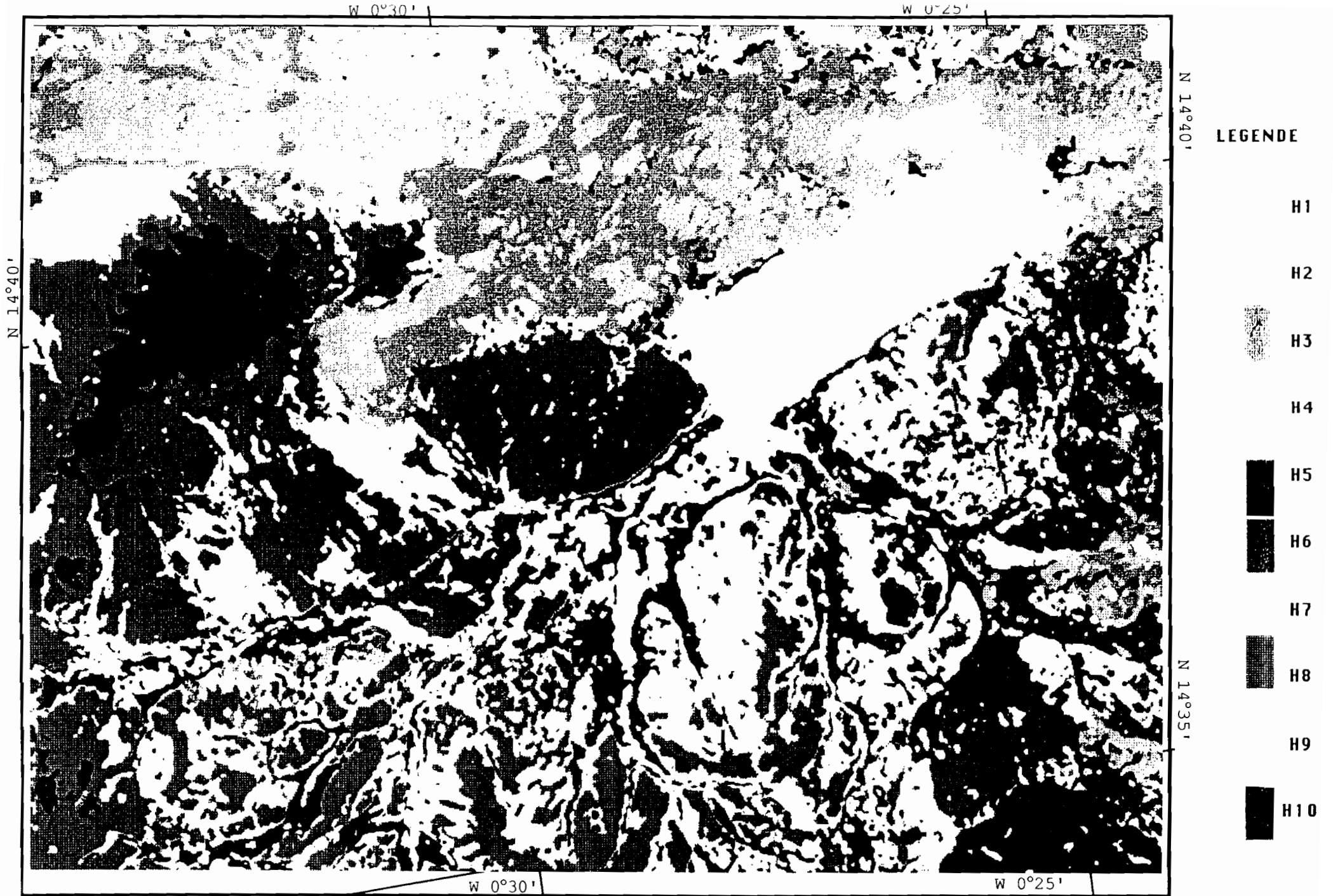


Figure 3 : Carte des aptitudes au ruissellement et à l'infiltration de la région d'Oursi, traitement numérique.

0 2 3 km

LA CARTOGRAPHIE PAR ANALYSE NUMERIQUE DES IMAGES SATELLITAIRES

Cartes des aptitudes au ruissellement et à l'infiltration de la région d'Oursi.

Légende

- H1 Erg vif et champs fraîchement sarclés sur sables fins épais.
-3
LR = $0,27P + 4,8.10^{-3} P.1K - 0,037 IK - 2,8$
Fréquence décennale LNI = 26 mm
Champs C2 et C4
- H2 Sables fins couverts à moins de 10 % par des pellicules plasmiques sans végétation.
-3
LR = $0,40 P + 3,5.10^{-3} P.1K + 0,009 IK - 5,1$
Fréquence décennale LNI = 34 mm
Champs C2, C3, C4 après 100 mm de pluies sur les sarclages
Lignes B6, B7, B9, B10, D1, G1, O1, O2, O10 et O14.
- H3 H4 Sables fins couverts à plus de 10 % et moins de 25 % par des pellicules plasmiques sans végétation.
-3
LR = $0,5 P + 3,2.10^{-3} P.1K - 0,008 IK - 4,0$
Fréquence décennale LNI = 44 mm
Lignes O5, O7, O11
- H5 - H6 Sables fins couverts à plus de 25 % et moins de 50 % par des pellicules plasmiques sans végétation.
Glacis recouverts à plus de 30 % de sables fins peu épais bien enherbés.
-3
LR = $0,60 P + 2,5.10^{-3} P. IK - 0,006 IK - 3,6$
Fréquence décennale LNI = 52 mm
Lignes O6, B1, B5, B5 champs C1
- H7 Glacis et jupes sableuses couverts à plus de 15 % et moins de 30% par la végétation herbacée ou par des sables fins bien enherbés.
-3
LR = $0,84 P + 0,9.10^{-3} P. IK + 0,16 IK - 9,7$
Fréquence décennale LNI = 67 mm
Lignes G3, G4, G5, K11, D2, B2
- H8 Glacis couverts à moins de 15 % par la végétation herbacée.
-3
LR = $0,91 P + 0,7.10^{-3} P. IK + 0,14 IK - 8,7$
Fréquence décennale LNI = 73 mm
Lignes D5, D10, D3, D7, K1, K2, G2
- H9 Bas-fonds humides en saison des pluies
Somme des pluies depuis le début de la saison supérieure à 150 mm
LR = $0,9 P.$
- H10 Massifs rocheux
LR = $0,25 P.$

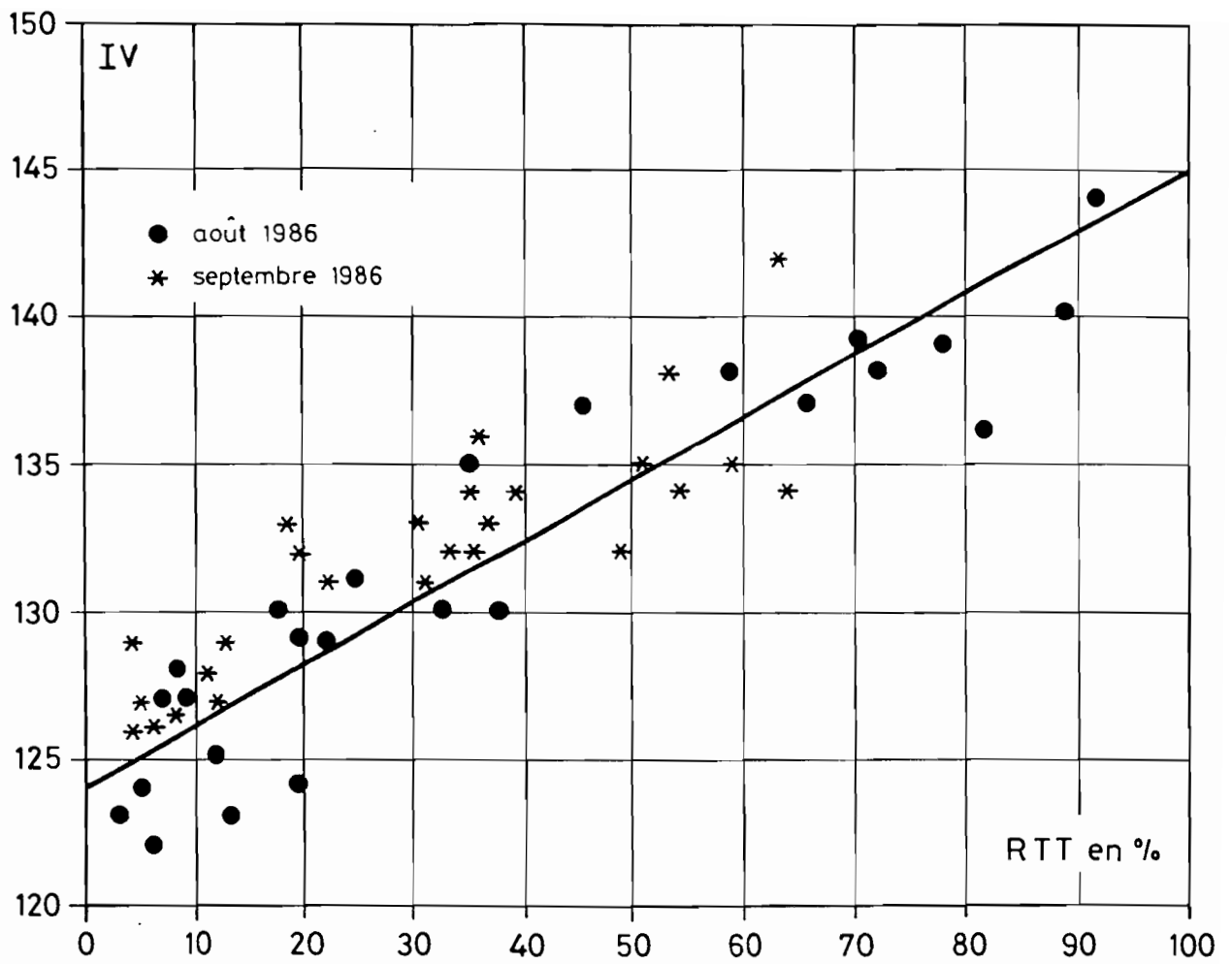


Figure : 4 Régression entre l'indice de végétation (IV) et le recouvrement total de la végétation (RTT)

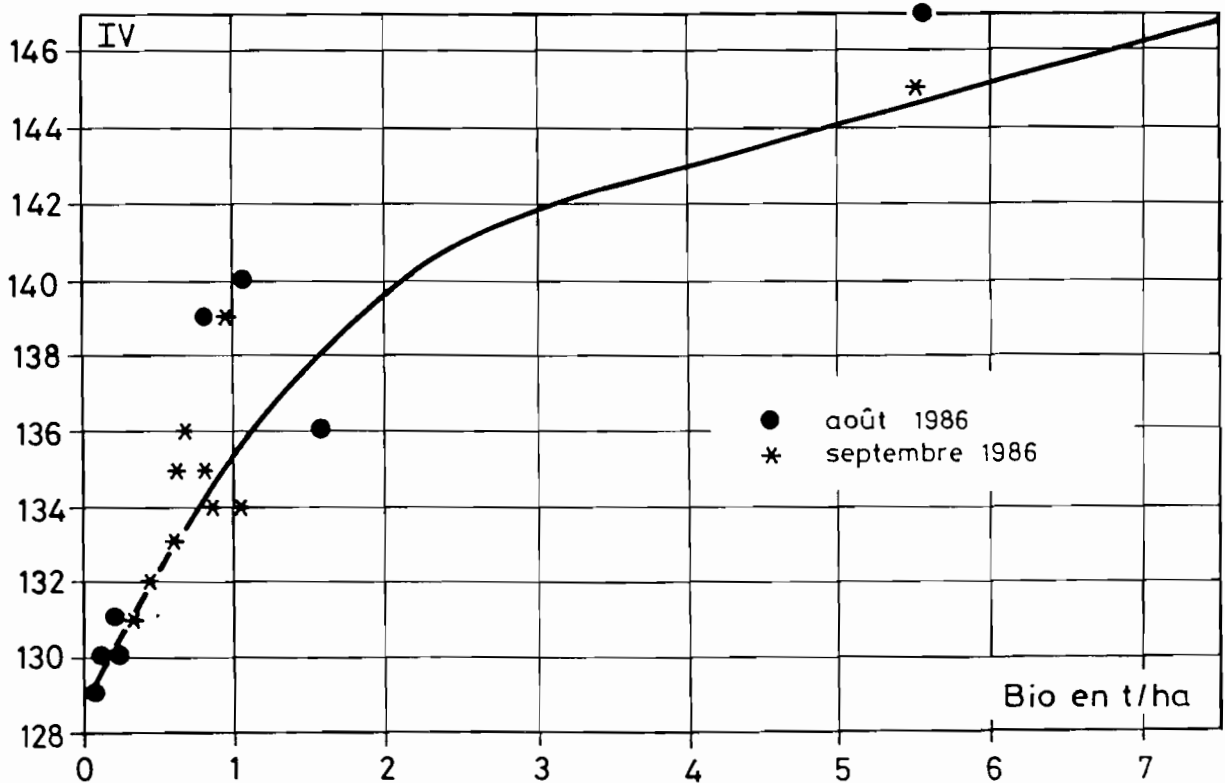


Figure : 5 Régression entre la phytomasse herbacée (Bio) et l'indice de végétation (IV).

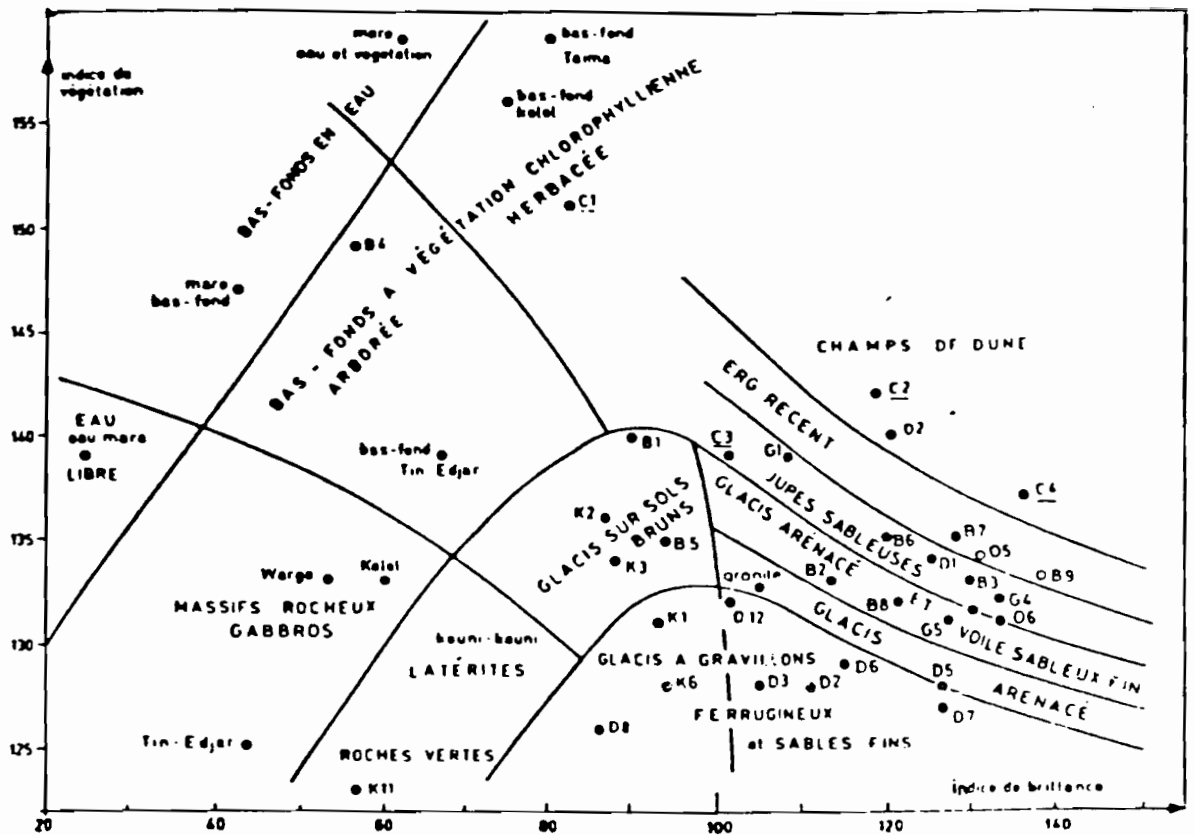


Figure 6 : Représentation numérique des lignes dans le plan des indices de brillance et végétation.

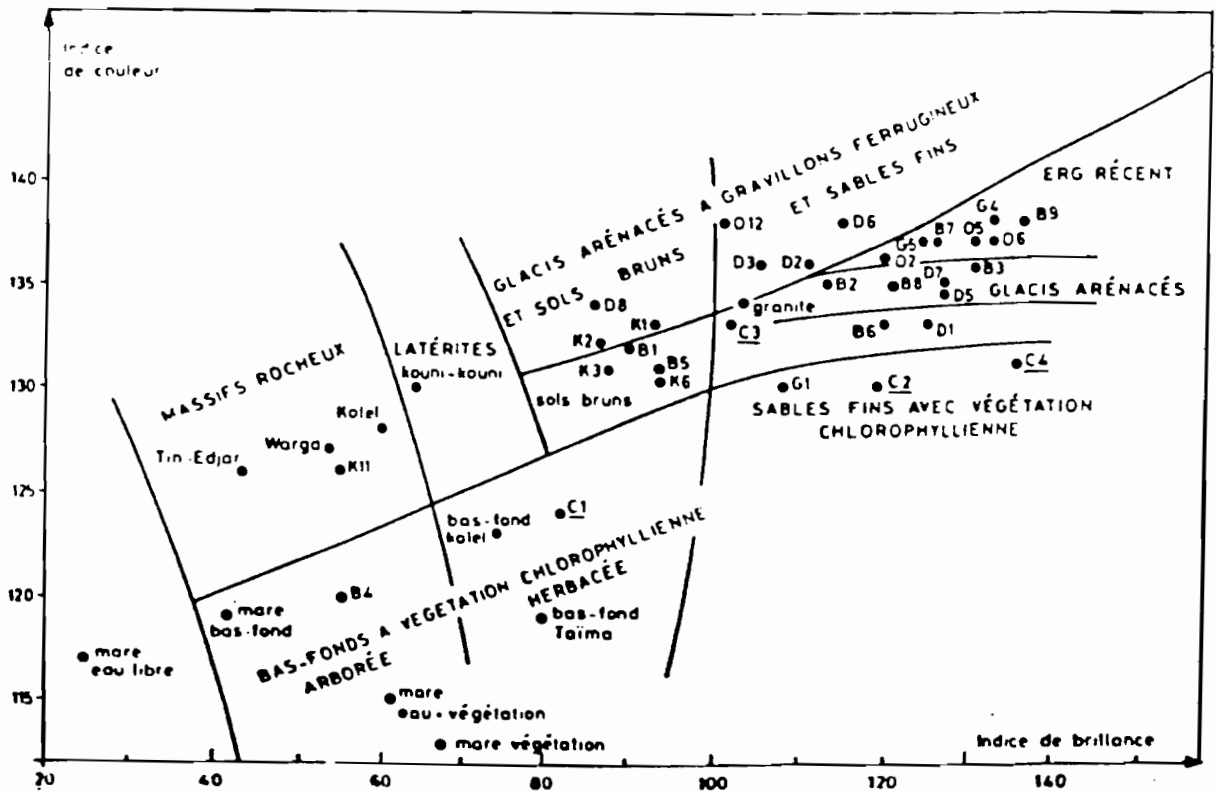


Figure 7 : Représentation numérique des lignes dans le plan des indices de brillance et de couleur.

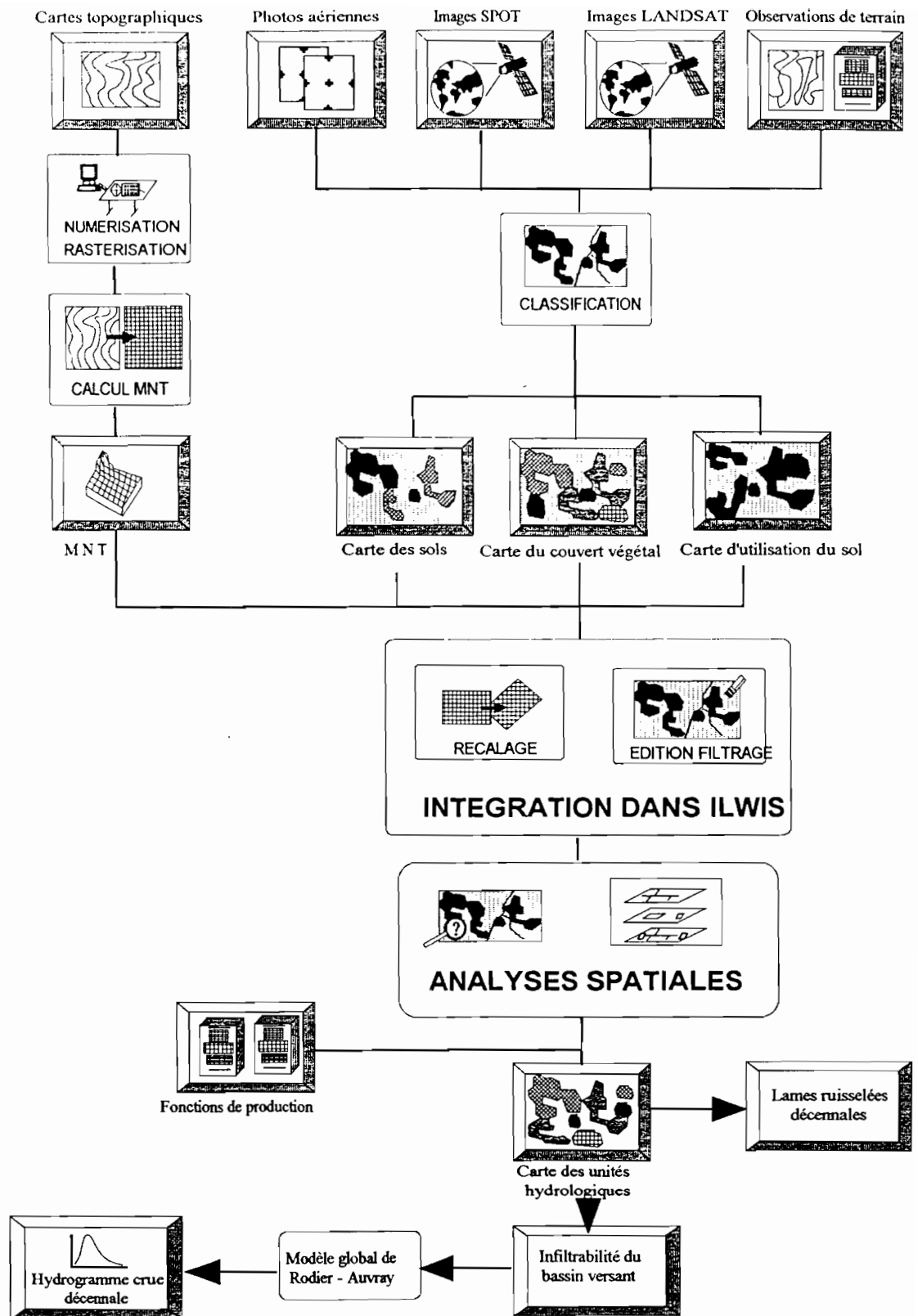


Figure 8 : Cartographie des états de surface et des unités hydrologiques par association, dans un S.I.G., de cartes des sols, du couvert végétal et des zones cultivées (M. Estèves).