APPORT DE LA TELEDETECTION A L'AMENAGEMENT DES BASSINS VERSANTS PAR PETITS OUVRAGES EN AFRIQUE SOUDANO-SAHELIENNE (*)

Par
Christian PUECH
Laboratoire Commun de Télédétection CEMAGREF/ENGREF
MONTPELLIER.

1. INTRODUCTION

Le projet présenté a été réalisé par le Laboratoire Commun de télédétection CEMAGREF/ENGREF associé à J.Carette Consultant pour le compte du Ministère de la Coopération et du Développement. Il concerne une action ayant un double but :
- un souci de formation aux techniques de la télédétection aérienne et spatiale, au profit d'une quinzaine de stagiaires de l'AFVP (Association Française des Volontaires du Progrès, Organisation non gouvernementale mettant en oeuvre des micro-réalisations agricoles dans le Sahel),
- un souci de mise au point méthodologique, les utilisations de la télédétection effectuées devant être réutilisables facilement et avec profit.

C'est pourquoi nous avons choisi une formation à travers un projet réel de l'AFVP, situé au Burkina Faso dans la région de Titao. Le but de l'opération était la définition d'un schéma directeur d'aménagement rural utilisant autant que possible les techniques présentées (données satellitaires et aériennes) et ce de façon complémentaire.
Dans la pratique ont été abordées, en combinant formation et souci de mise au point méthodologique, les étapes suivantes :
1. Préparation de l'utilisation de la télédétection : choix des documents de travail, mesures de terrain, reconnaissances,
2. Dépouillement des images satellite et des photographies aériennes pour obtenir un certain nombre de plans d'explication du paysage. Ce qui pose un certain nombre de problèmes particuliers au Sahel.
3. Nous nous sommes surtout attachés à essayer de finaliser l'utilisation de ces informations pour donner des applications possibles dans le domaine de l'aménagement rural, de la connaissance des terroirs villageois et de la détermination des possibilités de ruissellement des bassins versants étudiés.

Après avoir décrit sommairement la zone d'étude, nous passerons chacun de ces trois points en revue

2. ZONE D'ETUDE

Il s'agit du bassin versant du BAONGO, au nord est du Burkina Faso. Ce bassin totalise 270 km² de superficie, découpé en 15 sous bassins de 2 à 70 km² environ.
La région est soumise à un régime tropical sec à une seule saison des pluies qui s'étend en général de juin à septembre. La pluviométrie moyenne annuelle est de l'ordre de 680 mm (moyenne 1951-1980), et la pluie journalière décennale est estimée à 90 mm (CIEH 1980).
La région est une zone de savanes, les cultures (mil et sorgho essentiellement) ainsi que la végétation arborée se rencontrant surtout dans les bas-fonds.

3. PHASE PREPARATOIRE

3.1 Choix des documents de travail

Les documents utilisés sont les suivants :
- photographies aériennes : couverture aérienne IGN1952 et IGB1982 au 50000°.
- images du satellite SPOT : une image en mode XS du 27.07.87 qui a servi à définir un protocole de

(*) Communication aux Journées AUPELF-UREF de Ouagadougou à l'EIER (12-15 Mars 1990)

LOCALISATION DU SITE D'ETUDE
REGION DE TITAO (BURKINA FASO)

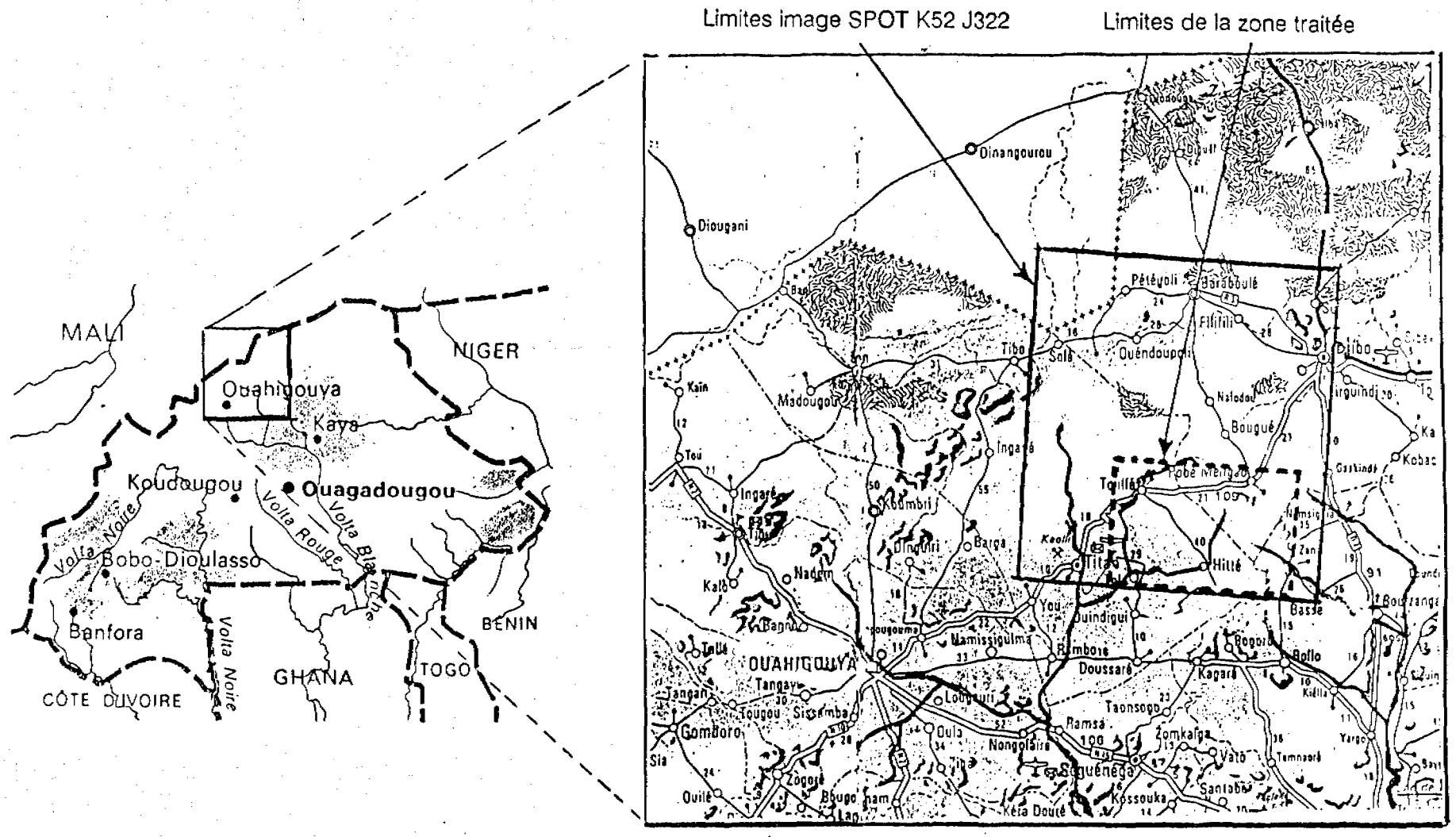


Figure 1

mesures de terrain.
et une image SPOT XS programmée pendant la prise d'information de terrain pour obtenir une concomitance aussi parfaite que possible entre mesures de terrain et prise d'image.

Le choix de la date des mesures à effectuer sur le terrain (et donc de l'image satellite associée), est un compromis entre plusieurs désirs plus ou moins contradictoires :
- nécessité d'être en saison sèche afin que la méthode soit facilement réutilisable (obtention d'image sans nuage et possibilité de parcours aisé de la zone d'étude).
- nécessité de bien reconnaître tous les éléments de terrain : les informations recherchées peuvent varier suivant le but recherché (terroir, hydrologie ...) et il y a donc, en toute rigueur, une ou plusieurs dates optimales, chacune en référence à un problème donné. Par exemple, une connaissance fine des cultures demande au moins une image pendant la saison des pluies, tandis qu'une estimation des possibilités de ruissellement s'accomode mieux d'une image de saison sèche pendant laquelle le satellite est à même de mieux caractériser le sol.
- nécessité de prévoir l'ensemble de l'opération de projet-formation au cours d'une même saison sèche (formation préalable et mesures de terrain, traitement des données, puis confrontation des résultats pour élaborer les documents finaux).
C'est pourquoi nous avons choisi le mois d'octobre (début de saison sèche), l'image SPOT programmée étant obtenue le 23.10.88.

3.2 Mesures de terrain

Elles ont été de plusieurs types :

3.2.1 Mesures hydrologiques préalables au projet :

7 pluviomètres ont été installés sur le bassin versant dès le début de la saison des pluies 1988. Contrairement aux idées initiales il n'a pas été possible de mettre en place des équipements limnigraphiques pour obtenir des informations sur un certain nombre d'événements pluie-débit. Toutefois le 25.08.88 a été enregistré une pluie homogène d'un montant très fort : respectivement 73, 78, 67, 70, 65, 65, et 76 mm aux 7 pluviomètres de la zone. Comparées aux 90 mm de la pluie journalière décennale ponctuelle, nous avons estimé que le ruissellement correspondant devait s'approcher du débit décennal. Une enquête à l'exutoire du sous bassin N°4, faite de façon contradictoire auprès de plusieurs villageois nous a permis d'estimer l'extension maximale de la crue. Enfin des mesures topographiques précises du profil en travers et du profil en long nous ont permis d'estimer ce débit par utilisation de la formule de Manning Strickler et l'adoption d'un coefficient de rugosité k=35.
Le débit résultant est de 52.5 m^3/s.

3.2.2 Mesures de pente.

Elles sont destinées à étalonner les pentes issues de l'analyse des photographies aériennes stéréoscopiques. Si les pentes sont en effet assez faciles à hiérarchiser, leurs valeurs absolues doivent s'appuyer sur des références précises de terrain pour être fiables.

3.2.3 Mesures destinées à classifier l'image satellite.

3.2.3.1 Technique

Nous cherchions à obtenir à partir de l'image satellite et des documents de terrain une ou plusieurs cartes thématiques décrivant le paysage pixel à pixel, en donnant les éléments les plus pertinents possibles vis à vis du ruissellement.
La méthode classique en télédétection consiste à définir des parcelles (zones fermées) pour lesquelles on connaît parfaitement l'appartenance : pour un parcellaire agricole ceci est aisé puisque les contours des zones sont bien définis (limites des champs) et la caractérisation du couvert connu sans ambiguïté (telle culture).
Au Sahel, pour la description d'un paysage, la démarche est notoirement plus complexe. En effet d'une part les limites des différents compositions du paysage sont floues, voire enchevêtrées, d'autre part chaque zone élémentaire ne peut être caractérisée par un seul descripteur : l'occupation du sol

caractérisant le ruissellement doit faire intervenir des éléments de pente, de micro reliefs, de sols, de végétation, leurs pourcentages.
Aussi travaille t-on suivant une technique de transects (lignes de parcours pas nécessairement rectilignes) dont le but est de définir en chaque point ces descripteurs du paysage, en espérant que l'on pourra les mettre en corrélation avec les radiométries observées sur chaque pixel. La description est opérée par ensembles de taille constante, le pas d'espace choisi étant basé sur la taille du pixel de l'image à traiter (20 m pour une image SPOT XS). Vu les difficultés de positionnement exact sur l'image (on ne peut, quelle que soit la méthode choisie, être certain de la position d'un point sur l'image à moins de 1 à 2 pixels près), on va travailler par grosses entités couvrant plusieurs pixels contigus. Pour des raisons pratiques nous avons choisi un pas d'espace de 100 m.
Nous avons effectué un dizaine de transects dont la longueur varie de 1000 à 3000 m.

3.2.3.2 Protocole de mesures
Les mesures ont été effectuée de préférence dans des zones homogènes, pour diminuer l'effet d'un positionnement incertain sur l'image satellite. La recherche de ces zone homogènes est facilitée par un travail préalable à la sortie de terrain réalisé sur une classification non supervisée d'image satellite. Ce calcul purement mathématique sans information de terrain, décompose l'image en un certain nombre de classes radiométriquement homogènes. Le protocole de mesures de terrain est tel que chaque classe fournie par le calcul doit être parcourue sur le terrain, de préférence dans des zones où sa présence est majoritaire. Les transects finalement retenus sont décidés en combinant ces documents issus d'images satellite et les cartes de la zone à étudier (présence de pistes, début et fin de transects facilement identifiables).

3.2.3.3 Codification
Les critères de description que nous avons retenu pour la zone d'étude sont les suivants :

	Code
Densité de végétation	
< 20%	V0
de 20 à 50%	V1
de 50 à 80%	V2
> 80%	V3
Marigot assez dense	V4
Marigot très dense	V5
Type de couvert	
Pas de végétation	C0
Herbacé	C1
Herbes + arbustes	C2
Cultures	C3
Arboré	C4
Texture	
Cuirasse	T0
Croûte + Gros gravillons latéritiques	T1
Croûte + petits gravillons ou sable grossier	T2
Croûte nue	T3
sable	T4
argile +limon	T5
Type d'écoulement	
Non visible	E0
en nappe	E1
individualisé	E2
lit marqué	E3
Pente	
plat (<0.5%)	0
pente faible (0.5 à 1.5%)	1
pente moyenne (1.5 à 3%)	2
pente forte (>3%)	3

Ces critères sont certainement modifiables et améliorables. Certains se sont avérés inutilisables, tel

le type d'écoulement impossible à détecter sur l'image satellite, ou redondants tel le type de couvert par rapport à la densité de végétation.

3.2.3.4 Exemple de transect codifié

Distance cumulée	Azimut (degrés)	Pente	Pourcent végétation	Type Couvert	Texture	Ecoulement
000						
	67	1	2	2	2	2
100						
	70	0	2	2	2	1
200						
	25	1	3	3	2	1
300						
	30	1	2	3	2	0
400						
	etc ...					

4. PHASE D'ANALYSE DES DOCUMENTS AERIENS ET SATELLITAIRES

4.1 Photographies aériennes

Après constitution de mosaïque, les photos aériennes sont étudiées sous stéréoscope et, pour les problèmes d'évolution, les photos de 1952 sont comparées à celles de 1982.
L'étude menée par carrés élémentaires de 25 ha procure les documents suivants :

- Cartographie géomorphologique dans laquelle sont distinguées
  - le lit majeur
  - le piémont
  - le haut de versant
  - le relief résiduel

D'où l'on déduit une évaluation des possibilités agro-sylvo-pastorales, ainsi que les limites des bassins versants

- Carte d'évolution de l'occupation du sol

On osbserve que le terroir agricole est moins important en 1982, notamment en haut de bassin versant.

- carte des contraintes d'érosion et d'assainissement

La confrontation des deux séries de photos indique clairement les lieux d'érosion active. On note qu'une baisse de l'occupation agricole est souvent liée à l'évolution de l'érosion.

- carte des états de surface et des pentes selon les critères suivants (cf figure 2) :

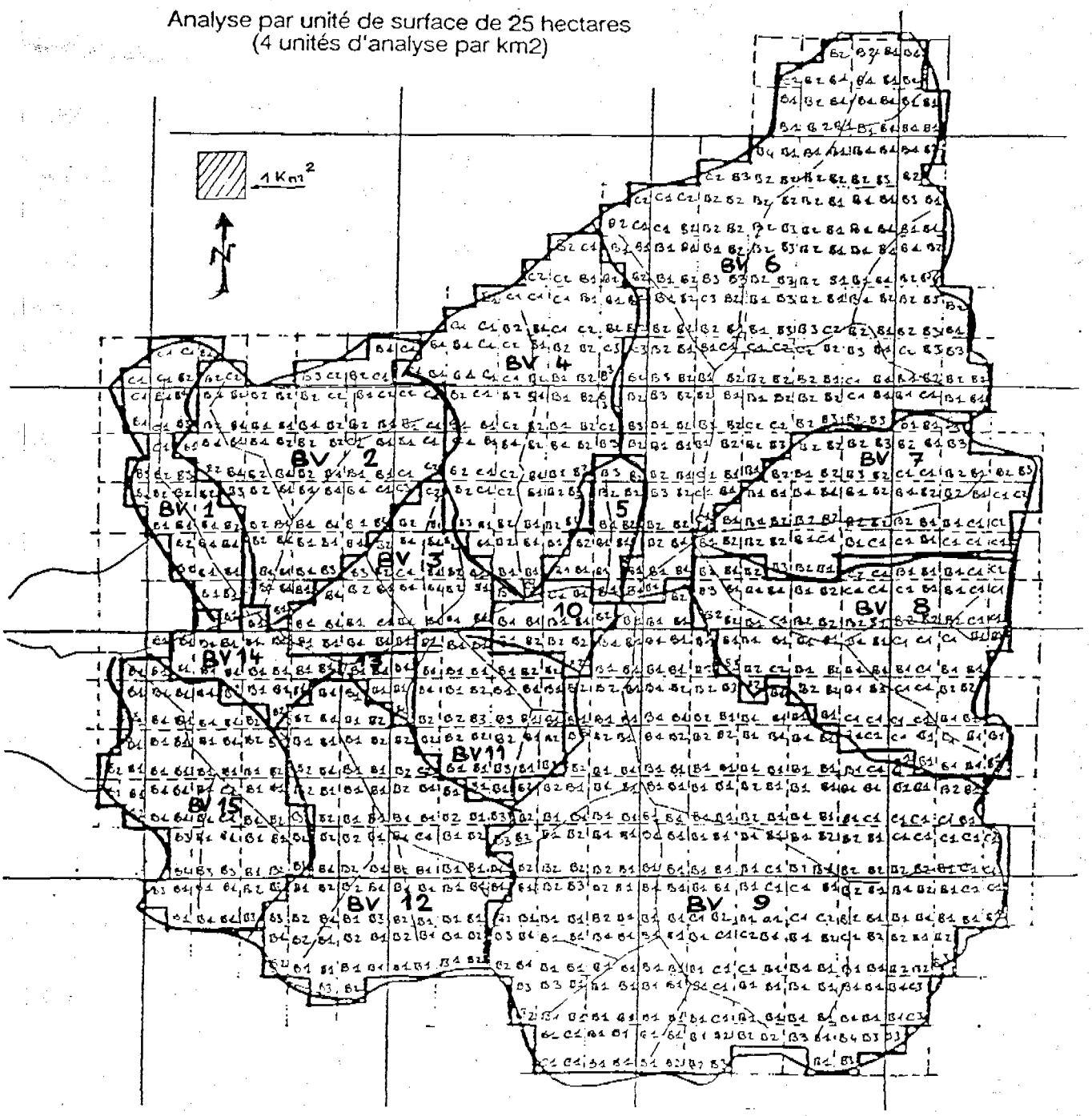
Etats de surface :

A.zone artificialisée
B.cultures vivrières, sols nus, savane herbeuse à arbustive
C.cultures arbustives, savane arbustive à arborée
D.cultures arborées, savane arborée à forêt claire
E.forêt dense

Pentes

1.Pente <1%
2. 1 à 5%
3. 5 à 15%
4. 15 à 30%
5. > 30%

CARTOGRAPHIE DES ETATS DE SURFACE ET DES PENTES D'APRES DEPOUILLEMENT DE PHOTOS AERIENNES



LEGENDE (codage par unité de 25 Ha)

FACTEUR D'OCCUPATION DU SOL .(Code lettre)
A – zone artificialisée(village ...)
B – cultures vivrières , sols nus , savane herbeuse à arbustive
C – cultures arbustives , savane arbustive à arborée
D – cultures arborées, savane arborée à foret claire
E – foret dense

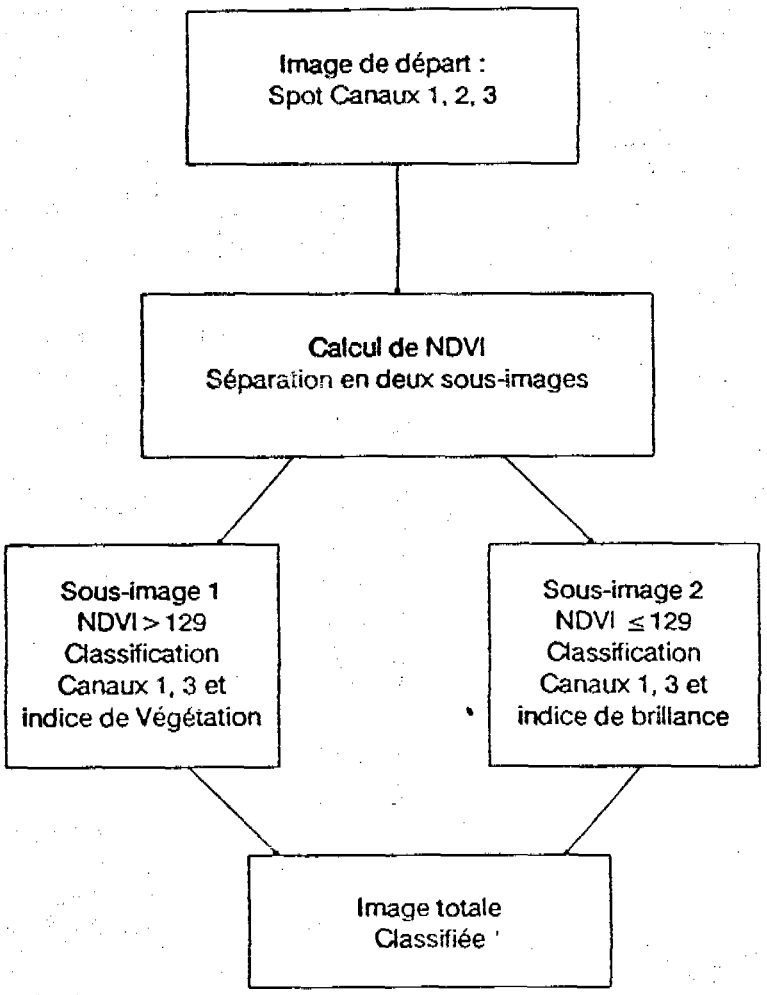
FACTEUR DE PENTE (Code chiffre)		
	code géomorphologique	pente en%
1.	A et P	< 1
2.	V	1 à 5
3.		5 à 15
4.		15 à 30
5.		> 30

cette légende a été adaptée à partir des travaux de BONENFENT et PELETIER

Figure 2

4.2 Classification de l'image satellite

Elle est réalisée suivant la méthode paramétrique dite du "maximum de vraisemblance" qui maximise la probabilité conditionnelle d'appartenance à une classe.
Le schéma de classification a adopté un calcul en deux parties, les zones à fortes végétation étants codées selon la densité de végétation, tandis que les zones nues sont codées suivant le critère dit de texture.
On trouvera figure 3 un extrait de cette classification concernant la zone centrale du projet.
A partir de ces résultats et des limites de bassins versants, on peut connaître la répartition des différentes classes de paysage à l'intérieur de chaque bassin versant.



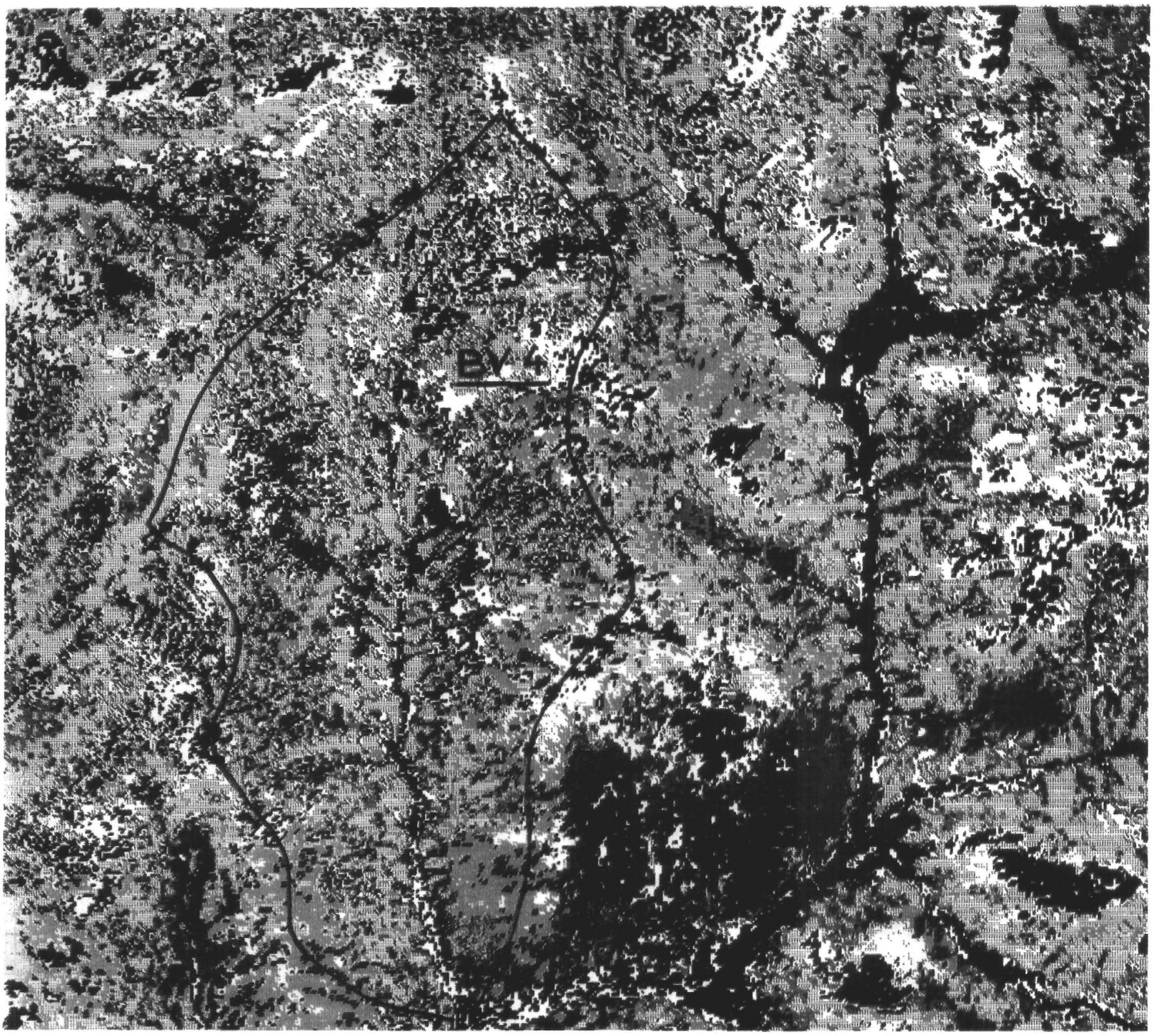
NDVI = Normalized difference vegetation index
soit : Indice de végétation en différence normalisée
NDVI = (PIR – R)/(PIR + R)
avec PIR = réflectance dans le canal Proche InfraRouge
R = réflectance dans le canal Rouge

IMAGE SPOT XS du 23.10.1988
K 052 - J 322

N

CLASSIFICATION SUPERVISEE

EXTRAIT (450*450 pixels)



LABORATOIRE COMMUN DE TELEDETECTION CEMAGREF-ENGREF

VEGETATION

- V1 – de 20 à 50%
- V2 – de 50 à 80%
- V3 – > 80%
- V4 – Marigot assez dense
- V5 – Marigot très dense

SOLS NUS

- T0 – Cuirasse, Gros gravillons
- T1 – Petits gravillons
- T2 – Gravillons fins
- T4 – Matériaux très fins
- Rejet (Non classé)

Figure 3

Echelle 1/50 000

4.3 Validation de la classification de l'image satellite

La validation habituelle des classifications d'images se réfère à des matrices de confusion qui vérifient si les observations effectuées sur le terrain se retrouvent effectivement en bonne place après classification. Nos résultats sont conformes à une "bonne classification" puisque les pourcentages d'affectation varient suivant les classes de 80 à 100%, sauf confusion plus forte entre T1 et T2, ce qui était à attendre vu le caractère très proche de ces deux groupes.
Une validation plus parlante a été effectuée en comparant l'image classifiée et des photographies aériennes obliques prises par survol aérien de la zone en avion léger pendant les mesures de terrain (Cf figure 4).
La confrontation qui apparaît très probante est intéressante à plus d'un titre :
- vision globale de la zone : la comparaison des deux documents donne une idée rapide de la précision de l'image satellite et de sa capacité à expliquer le paysage étudié.
- validation de classification même sur des zones restreintes : la localisation d'un groupe de pixels est aisée et le contrôle peut affecter les pixels pris quasi individuellement. Dans les estimations classiques ceci n'est jamais possible, les difficultés de positionnement sur l'image imposant de se focaliser sur l'intérieur des grandes zones homogènes.
- une classification peut être jugée par le lecteur lui même sans référence à des opérateurs mathématiques plus ou moins bien compris, et cachant souvent bien des erreurs dans leur globalité.

4.4 Etude des grandes parties agricoles de l'image satellite

Nous avons également étudié l'image satellite à un niveau plus global, par une technique manuelle de photo-interprétation d'image sur écran d'ordinateur, le plan de travail étant une composition colorée c'est à dire une visualisation en fausses couleurs (sans calcul) de l'image brute.
Le travail de délimitation des contours est assez aisé et conduit rapidement à un classement de l'image en trois zones :
- zone de cultures, en exploitation actuelle.
- zone de hauts de versants, à l'opposé, à vocation pastorale ou parfois se retrouvent quelques villages.
- zone de mi-versant, intermédiaire, ayant été cultivée par endroits ou pouvant être mise en culture, et où les problèmes d'érosion sont accrus.

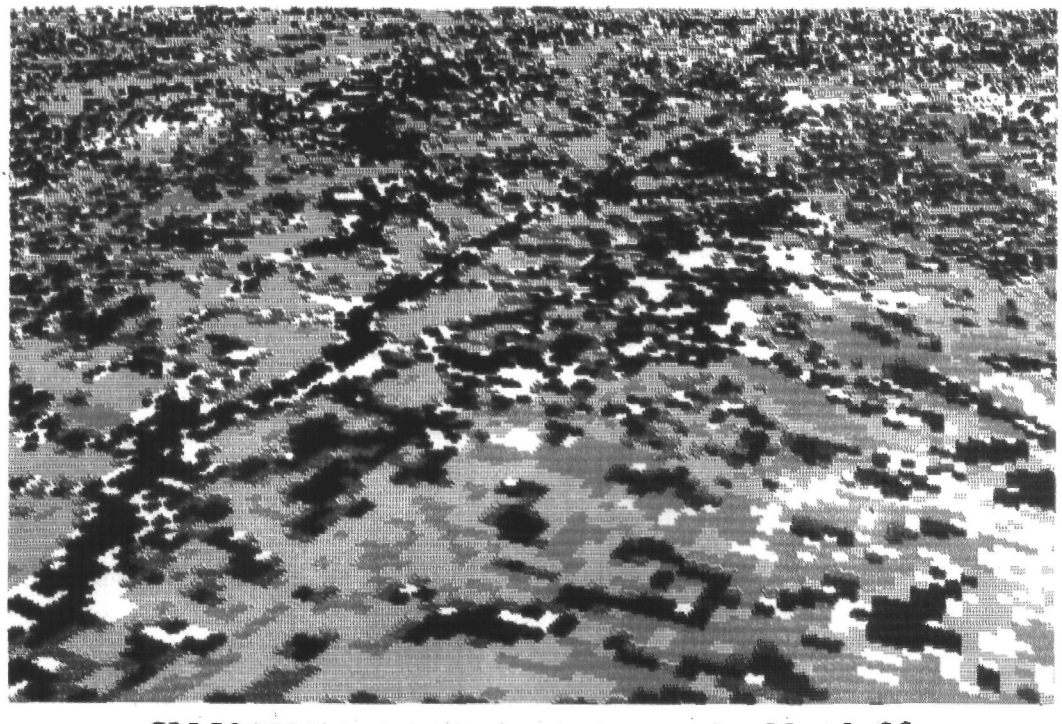
5. PHASE D'APPLICATIONS

5.1 Complémentarité des techniques.

La photographie aérienne permet une approche peu onéreuse qui peut être effectuée sur le site lui même, le dépouillement pouvant être contrôlé directement sur le terrain.
Systématisé par carroyage élémentaire comme expliqué ci-dessus, ce type de dépouillement aboutit à des cartographies qui révèlent les grandes tendances du paysage, et donne une délimitation rapide des zones et de leurs problèmes. La précision des photos permet en effet de discerner sans ambiguïté les ravines, l'implantation humaine, les chemins ...
Le relief peut aussi être abordé par la stéréoscopie. Mais l'aspect fastidieux du dépouillement le limite à quelques images contiguës.
Les photos aériennes permettent d'obtenir facilement les grandes unités de paysage autour des zones d'enquête mais elles ne peuvent être obtenues qu'à des dates non programmables, parfois éloignées dans le temps.

L'image satellite est beaucoup plus coûteuse, et n'a pas une aussi grande finesse dans les détails. Toutefois ceci est compensé par l'aspect multispectral permettant de mieux connaître les unités de sol, par les possibilités offertes par les techniques de traitement d'image et un choix plus large pour la date d'acquisition de l'image.
L'utilisation d'un tel outil sera intéressante si elle permet d'extrapoler à une vaste zone les résultats d'observation de terrain, ou si elle permet d'observer des phénomènes fugitifs ou trop difficiles à

BASSIN DE HITTE
VALIDATION DE CLASSIFICATION
PHOTO 1



CLASSIFICATION IMAGE SPOT XS du 23.10.88



PHOTO AERIENNE DU 12.10.88 . (Altitude 400 m)

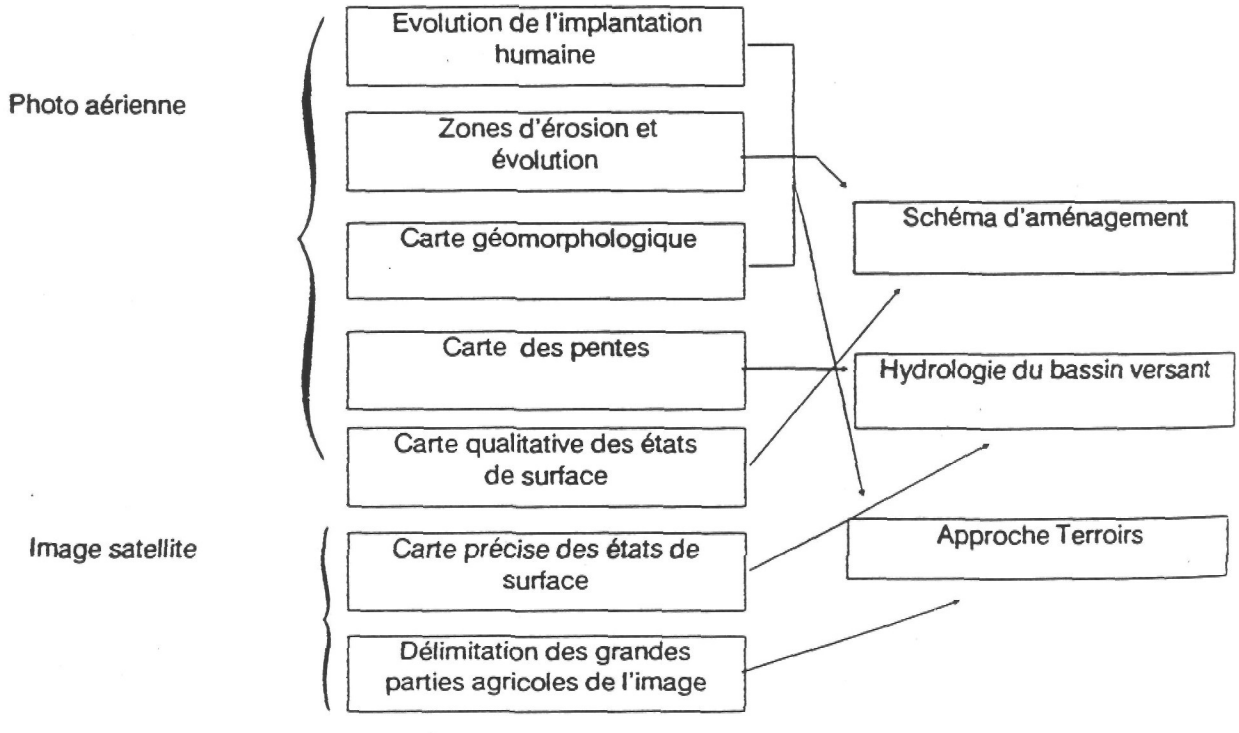
Figure 4

LABORATOIRE COMMUN DE TELEDETECTION CEMAGREF - ENGREF (1989)

observer par des méthodes classiques.

Ainsi chacun de ces outils a ses inconvénients et ses points forts, la complémentarité de leur utilisation étant mise en évidence.

L'obtention d'applications concrètes viendra d'une utilisation combinée d'un ou plusieurs plans d'information suivant le schéma ci dessous :



5.1 Définition d'un schéma directeur d'aménagement du bassin versant.

Cette application a été effectuée à l'aide des 4 plans suivants

P1.Géomorphologie
P2.Erosion (1952/1982)
P3.Etats de surface
P4.Pente

Tous ces plans d'informations sont tirés de l'analyse des photographies aériennes. Pour le plan "états de surface" nous aurions pu utiliser la cartographie plus fine issue du dépouillement de l'image satellite, mais nous avons opté pour celui provenant des photos aériennes car cela procure d'emblée tous les plans à la même échelle.

La méthodologie de croisement retenue est manuelle mais pourrait se prêter facilement à une utilisation du type "Système d'Information Géographique".
Elle est basée sur le carroyage par éléments de 25 ha traités lors de l'analyse des photos aériennes. Chaque carré élémentaire va être numérisé en fonction des 4 critères retenus. Ces critères sont alors combinés deux à deux : Le plan P1 (Géomorphologie) et le plan P2 (érosion) sont combinés suivant une grille de décision pour donner un plan qui renseigne sur les possibilités hydroagricoles de chaque carré élémentaire.

Par exemple :
– piémont dominant (plan P1) + Erosion faible (plan P2) => domaine pluvial avec problèmes de conservation des eaux et du sol

Par ailleurs les plans P3 (états de surface) et P4 (pentes) sont aussi combinés pour donner des informations sur l'aptitude agro-sylvo-pastorale.

– Savane boisée, forêt claire (plan P3) + pente de 5 à 10% (plan P4) => Domaine pastoral

Enfin dans chaque carré, les deux renseignements sont confrontés : les potentialités hydroagricoles estimées ci-dessus sont améliorées par le recoupement avec les informations sur l'aptitude agro-sylvo-pastorale.

On obtient alors une vision du bassin versant par carrés élémentaires de 25 ha qui permet de dresser un schéma général du bassin au point de vue des potentialités agricoles ou pastorales et renseignant sur les zones à risque érosif. D'où l'on peut déduire les zones susceptibles d'être aménagées (Cf carte de synthèse, figure 5).

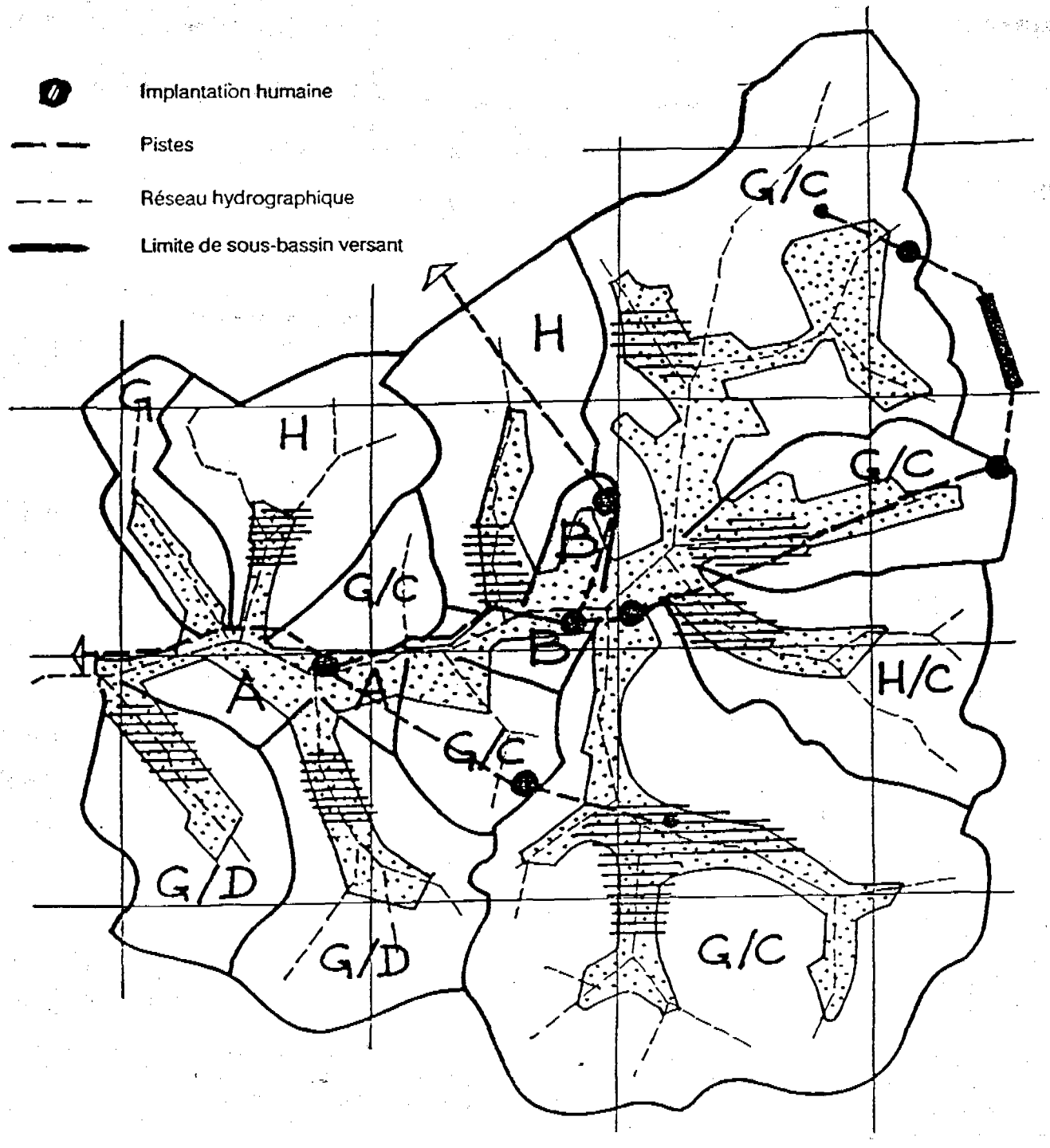
5.2 Terroirs villageois.

Le même type d'analyse est possible pour définir les différentes composantes du terroir : écosystèmes, évolution récente et historique.
Ici l'outil de base sera l'image satellite sur laquelle ont été répertoriées par photo-interprétation d'image les 3 grandes classes d'occupation des terres : zones de cultures, zones de haut de versants, zone de mi-versant.
Les plans annexes, tel l'érosion, la géomorphologie, l'implantation humaine et son évolution, l'occupation du sol serviront pour améliorer la connaissance en détail de chacune de ces zones.

L'utilisation de l'image satellite fournit une analyse rapide de l'occupation villageoise sur une zone de taille importante, mais ceci reste toutefois à l'état d'ébauche ou de dégrossissage du problème. Il va sans dire qu'à tout travail précis sur un village donné seront associées des visites de terrain et des enquêtes qui ne peuvent qu'affiner le travail précédent.

SCHEMA DIRECTEUR D'AMENAGEMENT

CARTE DE SYNTHESE



Aptitude Agro-sylvo-pastorale de chaque bassins versant

A – Hydroagricole
B – Hydroagricole / Pluvial
C – Hydroagricole / Pluvial + CES
(Conservation des Eaux et des Sols)
D – Pluvial
E – Pluvial + CES
F – Pastoral
G – Sylvo-pastoral
H – Sylvo-pastoral + DRS
(Defense et Restauratio. es sols)

Contraintes particulières

limite d'extension du domaine agricole le plus favorable

zone à aménager en priorité pour la lutte anti érosive

Figure 5

5.3 Application à l'hydrologie.

5.3.1 Télédétection et hydrologie au Sahel

Le problème soulevé ici est celui de l'estimation des ruissellements potentiels, plus exactement des débits de crue, en utilisant la télédétection.
Dans le Sahel, la connaissance actuelle des débits de crue des petits bassins versants est assez grossière. Elle est généralement effectuée à travers deux méthodes globales, celle de Rodier-Auvray (1965) à tendance déterministe et celle du CIEH (1983) purement statistique. Ces méthodes ont malheureusement un degré d'incertitude assez élevé ; on estime en effet l'erreur moyenne aux environs de 100%. La difficulté d'estimation exacte des ruissellements provient en grande partie de la mauvaise connaissance de "l'aptitude au ruissellement" de chaque bassin versant, surtout quand celui-ci a une composition très différente de celle des bassins expérimentaux servant de référence.

La télédétection satellitaire ne prétend pas proposer des cartographies absolument précises d'une zone donnée, les "matrices de confusion" associées aux classifications sont là pour nous le rappeler. Toutefois il est légitime de penser que la vision fine depuis l'espace est à même de nous permettre une connaissance détaillée de chaque bassin versant et laisse donc augurer une meilleure connaissance des potentialités de ruissellement, notamment pour les bassins qui s'écartent de la normale.
Quelle que soit l'approche utilisée, la précision attendue sur les débits estimés sera toutefois limitée par celle de la technique de télédétection. Ainsi, si les méthodes d'estimation classiques donnaient des résultats à 10% ou 20% près, il serait illusoire de vouloir les améliorer à l'aide des informations satellitaires. C'est le taux d'erreur très élevé des méthodes d'estimations actuelles des débits de crues au Sahel qui nous autorise à croire qu'un progrès sensible peut y être apporté par la télédétection.

5.3.2. Méthodologies possibles

L'utilisation de la télédétection satellitaire pour caractériser l'aptitude au ruissellement passe par plusieurs étapes :
- une phase de classification de l'image satellite au cours de laquelle on va tenter d'obtenir une ou plusieurs cartes thématiques décrivant le paysage pixel à pixel.
- une phase de transformation de ces éléments de paysage en aptitude au ruissellement sous une forme numérique : lame ruisselée, coefficient de perméabilité ...
- une phase d'utilisation de calculs hydrologiques dans laquelle on essaie de calculer le ruissellement global du bassin à l'aide d'outils plus ou moins complexes : du plus simple (estimation globale) au plus sophistiqué (modélisation mathématique).

Nous avions un but de formation devant déboucher sur un méthodologie simple, pouvant être réutilisée facilement et immédiatement par les stagiaires AFVP. Aussi, avons nous retenu dans ce projet les solutions les plus simples, comme premier pas vers l'utilisation rationnelle de ces nouveaux outils. Plus tard, nous espérons pouvoir tester d'autres solutions, plus complexes, plus performantes sans doute.

5.3.3 Amélioration des paramètres globaux.

C'est ainsi que, loin de mettre au point de nouvelles méthodes d'estimation utilisant au mieux la grande richesse d'information de l'image satellite, nous avons essayé de nous en servir pour comme guide d'estimation des paramètres globaux nécessaires à la mise en oeuvre des méthodes classiques.

5.3.3.1. La détermination habituelle est subjective.

Ces paramètres, globaux, concernent essentiellement la pente et la perméabilité. Ils sont

généralement peu précis et l'hydrologie classique a souvent utilisé des "classes" de pente ou de perméabilité pour lesquelles les critères d'affectation sont ,sinon subjectifs, du moins délicats à déterminer, surtout par un ingénieur de projet a priori peu versé dans les subtilités de cette approche. Cette critique, maintes fois évoquée, peut être partiellement amoindrie par les techniques de la télédétection qui peuvent servir de "garde-fou" dans la détermination des indices ou classes traditionnelles.
A titre d'exemple de l'utilité d'un tel garde-fou, remarquons qu'au Sahel, c'est souvent l'indice de perméabilité qui a la plus forte influence sur les résultats : on a pu constater sur le bassin N°4 de Titao une variation du coefficient de ruissellement décennal (cf abaques de Rodier) de 30% à 70% selon que la classe de perméabilité passe de P2 à P3. Cette extrême variation devient très déroutante quand on la compare aux nuances très faibles entre les différentes dénominations : "bassins imperméables" pour P2, "bassins assez imperméables" pour P3.

5.3.3.2 Paramètre de perméabilité

Ce calcul correspond à la phase de la transformation des éléments de paysage en aptitude au ruissellement sous forme numérique.
Plusieurs solutions sont envisageables, mais il est impératif d'utiliser des résultats de mesures de terrain. Une voie possible consiste à se baser sur les mesures de mini-simulateur de pluie de l'ORSTOM effectuées au Sahel depuis une dizaine d'années sur des parcelles expérimentales de 1 m². Valentin propose un catalogue des "états de surface" associés aux valeurs de lame ruisselées (en cours de publication). Le problème ne sera pas pour autant entièrement résolu, le point délicat restant le passage du m² au bassin versant (coefficient de passage de 10^6 à 10^8 !).

La détermination que nous proposons ici consiste en une estimation de la classe de perméabilité ORSTOM évoquée ci-dessus en utilisant les résultats de télédétection.
Notre idée est que le choix de la classe de perméabilité peut être associée au pixel élémentaire ceci procurant plusieurs avantages :
- l'estimation de cette classe est moins subjective appliquée à un état de surface élémentaire au lieu de l'estimation globale sur le bassin versant.
- le calcul global fait au prorata de la surface limite les defauts éventuels de classement.
- le résultat final de la classe est conservé sous forme numérique d'où une hiérarchie possible entre bassins et une évolution lente du coefficient de ruissellement avec l'évolution des états de surface.

La méthodologie consiste donc à estimer la classe de perméabilité associée à chaque classe obtenue sur la classification d'image en se servant de la grille habituelle ORSTOM.
Puis, on estime une classe globale de perméabilité P sur le bassin au prorata des surfaces.
Par exemple sur le bassin N°4 nous avons obtenu : P = 2.25

5.3.3.3 Paramètre de pente

Etant dans une zone où les seules cartes existantes sont au 200000°, les courbes de niveau sont trop distantes pour renseigner sur la topographie du bassin, a fortiori des sous-bassins. Les seules indications objectives sur ce type de paramètre ne peuvent être déduites que par les outils de télédétection.
Les images stéréoscopiques du satellite SPOT permettent l'obtention d'un "modèle numérique de terrain" à un pas très fin. Toutefois les coûts correspondants, très élevés, ne peuvent être envisagés que dans de gros projets, sûrement pas pour un petit projet d'aménagement rural.
C'est pourquoi nous avons utilisé les photographies aériennes stéréoscopiques dépouillées par carré élémentaire de 25 ha, ce qui nous fournit une cartographie des classes de pente.
Le passage aux classes de pente R traditionelles à l'ORSTOM et à l'indice global de pente Ig est possible à travers des opérateurs simples. Pour le bassin N° 4 on a obtenu :
R = 3.56 et Ig = 11.0

5.3.4 Calcul des débits de crues

Le calcul des débits de crues par les méthodes habituelles au Sahel s'en suit, nous donnons ici directement les résultats de ces calculs sur le bassin N°4 :

Surface	20.5 km²
Classe de Perméabilité	P = 2.25
Classe de Pente	R = 3.56
Indice de Pente	Ig = 11.0
Méthode Rodier Auvray	Q10 = 47.8 m3/s
Méthode CIEH	Q10 = 60.0 m3/s
Observation de terrain	Q = 52.5 m3/s

On ne peut à l'aide d'un seul bassin tirer des résultats statistiques. Toutefois on peut faire deux remarques :
1 – comparaison des méthodes entre elles :
Les résultats des méthodes sont souvent observés dans l'ordre Rodier–Auvray : un peu faible, CIEH : un peu trop fort.
On retrouve ici l'ordre "habituel" des estimations.
2 – l'utilisation de la télédétection a permis de déterminer sans difficulé des débits qui s'avèrent très proches de l'observation de terrain réalisée.
Le débit observé de 52.5 m3/s (en le supposant comme représentatif de la réalité) s'écarte respectivement de –9% et +14% de ceux obtenus par les 2 méthodes citées.
Ces deux chiffres n'ont qu'une valeur indicative d'autant que le "débit observé" est simplement un ordre de grandeur, mais il est intéressant de noter que l'on est largement à l'intérieur du domaine de 100% d'erreur considéré comme limite à ne pas franchir.

6. CONCLUSION

A travers le projet de TITAO, nous avons exploré les différentes possibilités de connaissance du terrain que nous offre la télédétection aérospatiale pour des petits bassins versants de zone sahélienne.

L'utilisation de la **photographie aérienne** est une technique largement rodée et intégrée depuis longtemps dans les projets. Son intérêt n'est plus à prouver, et ici encore elle nous a procuré des documents très performants pour la connaissance des bassins. Nous avons repris ici les méthodes de travail classiques ou moins classiques, pour extraire de ces images l'information utile, et avons porté en annexe les éléments d'information nécessaire pour les mettre en oeuvre.

La **télédétection satellitaire** est à ses débuts pour l'application pratique à des projets réels dans la zone sahélienne. Plusieurs écueils en ont empêché pour l'instant l'utilisation : le coût important des images, la difficulté à affecter un personnel qualifié à ce type de démarche, la difficulté à trouver sur place du matériel de traitement d'image, le fait qu'aucune méthode totalement opérationnelle ne soit disponible. Quelques essais existent çà et là pour les zones concernées : ils relèvent pour l'instant de la pure recherche.
La première partie de notre démarche a consisté à essayer d'obtenir des documents décrivant le plus fidèlement possible le paysage, fiables et reproductibles. Les résultats semblent encourageants et la vision que procure l'image satellite apparaît comme particulièrement pertinente, expliquant bien les différentes composantes du paysage.

Ces plans d'information apparaissent comme plus riches que ceux obtenus par photographies aériennes et leur plus grande extension géographique en font un outil très intéressant. Toutefois leur limite en résolution fait que certains éléments n'apparaissent que difficilement sur ces images (routes, habitats, érosion ...) alors que ces éléments peuvent être obtenus aisément par photographies aériennes. Celles ci peuvent en outre apporter des informations visuelles anciennes, alors que l'imagerie satellite n'est disponible dans le meilleur des cas qu'à partir de 1972. Ainsi la **complémentarité des approches satellitaire et aérienne** est mise en évidence.

Pour la **connaissance hydrologique** de la zone, toutes les personnes autorisées sont d'accord pour penser que la possibilité nouvelle de vision en détail des bassins versants que procure l'image satellite est primordiale pour la détermination des conditions de ruissellement, difficilement cernables par les mesures au sol.
Le point délicat en demeure le passage à une quantification : nous avons proposé ici un premier élément de travail, à savoir une détermination améliorée des paramètres explicatifs de l'écoulement dans les méthodes classiques de calcul des débits de crue, en utilisant les données de télédétection satellitaire comme garde fou d'estimation. Les résultats obtenus, difficilement généralisables puisqu'ils ne concernent qu'un seul bassin versant, sont toutefois encourageants, puisque les écarts entre valeurs observés et valeurs calculées sont très nettement en deçà du seuil de tolérance souhaité.
Nous nous étions fixés comme **objectif de fournir une méthode directement utilisable**. Il s'en suit que la méthodologie proposée n'apporte pas vraiment de changement dans la détermination des débits de crue : elle cherche à améliorer l'emploi des méthodes existantes, globales, en amenant une détermination plus objective des paramètres, et réduisant ainsi le taux d'erreur. Aussi peut-elle être utilisée dès à présent, en particulier par les stagiaires AFVP.
On pourrait rester un peu frustré de l'utilisation somme toute restreinte de l'information satellitaire qui a été faite ici. En effet celle ci apparaît a priori beaucoup plus riche que l'information globale qui en a été retirée. Mais pour exploiter pleinement cette richesse d'information il faut mettre au point des méthodologies nouvelles, spécifiques, faisant intervenir plus complètement ces plans d'explication dans les estimations. De nouveaux outils, non disponibles pour l'instant, sont envisagés et seront progressivement mis au point dans les prochaines années : modèles hydrologiques utilisant les apports de la télédétection, introduction d'observations numériques nouvelles (mesures par mini simulateur, mesures par sous bassins ...)

Pour **l'aménagement des bassins versants et la connaissance des terroirs villageois**, les différents plans d'information élaborés se sont revélés être des outils performants pour la compréhension de l'espace. Il faut cependant garder à l'esprit que ces informations ne fournissent qu'une approche de l'état à un instant donné de la zone d'étude : les problèmes réels doivent être cherchés à travers les conséquences physiques, seules visibles sur le terrain. Par ailleurs la présence de populations sur la zone introduit des données complémentaires, tout aussi importantes pour la connaissance ou l'amélioration de l'espace : le choix du type d'aménagement et de sa localisation va donc dépendre de critères techniques et sociaux. Techniques, par exemple ceux de l'aménagement antiérosif, pour lesquels les spécialistes ne sont pas toujours d'accord entre eux. Sociaux, et c'est là un point fondamental à ne pas négliger, car les besoins et avis de la population locale sont à prendre en compte à tous les niveaux.
Les résultats obtenus par télédétection pourront servir de base aux discussions conduisant aux aménagements, la télédétection pouvant être ainsi un nouvel outil de **communication et d'animation.**