

Régionalisation

Trois thèmes d'extension spatiale des résultats ont été abordés au cours de ce programme. Le premier concerne la reconnaissance et la caractérisation des bas-fonds par l'imagerie satellitaire. Il permet de déterminer les potentialités agricoles des bas-fonds dans une région, et de guider les décideurs pour promouvoir l'agriculture de bas-fond au niveau d'un avant-projet. Le second thème est la spatialisation des données climatiques intéressant la valorisation agricole des bas-fonds. Le troisième thème est la régionalisation des paramètres hydrologiques dont la prédétermination est nécessaire pour la réalisation d'aménagements hydrauliques et l'optimisation de leur fonctionnement.

L'IMAGERIE SATELLITAIRE DANS LES BAS-FONDS

Deux études ont été menées pour caractériser les potentialités des bas-fonds par télédétection. La première a été réalisée par PEREZ & SEGUIS (1991) sur la région sud du Sine-Saloum dans des bas-fonds de la zone sédimentaire au nord de l'isohyète 1000 mm. La seconde s'est intéressée aux zones humides du domaine cristallin du Mali-Sud et de la Comoé (MOKADEM & NONGUIERMA, 1991) Nous donnons ici un résumé de ces travaux.

AU SINE-SALOUM

Ce travail a eu pour but de déterminer dans quelle mesure une image du satellite de télédétection SPOT peut servir à mettre en évidence les bas-fonds dans la région de Thyssé-Kaymor (Sénégal). Un bas-fond est une zone inondable de bas de toposéquence, aménagée éventuellement, comme actuellement celui de Keur Samba Diama, pour la culture du riz en hivernage et le développement de cultures irriguées de contre saison. Deux zones ont été étudiées: sur la première zone la méthodologie a été mise au point et les calages radiométriques réalisés à partir de prospections sur le terrain (zone de Thyssé Kaymor); la même méthodologie a été utilisée dans la zone de Birkélane sans travaux de vérité sol.

Région de Thyssé Kaymor

La zone extraite, sur l'image SPOT d'avril 1987, a une superficie de 150 km² (15 km d'Est en Ouest et 10 km du Nord au Sud). Sur l'ensemble de cette zone, les réflectances dans les canaux XS1, XS2, XS3 (respectivement dans le bleu-vert, le rouge et le proche infrarouge) sont caractérisées par les valeurs indiquées sur le tableau XCVII.

Tableau XCVII : Réflectances des canaux SPOT sur la zone de Thyssé Kaymor

Canal	Min	Max	Moyenne	Ecart-type
XS1	34	81	50.1	6.6
XS2	26	93	50.8	8.9
XS3	18	89	60.9	9.0

Définition des classes

D'après les repérages antérieurs effectués sur le terrain, 5 types de paysages sont indexés à l'aide de zones-test tracées par la visualisation du canal XS3 de l'image.

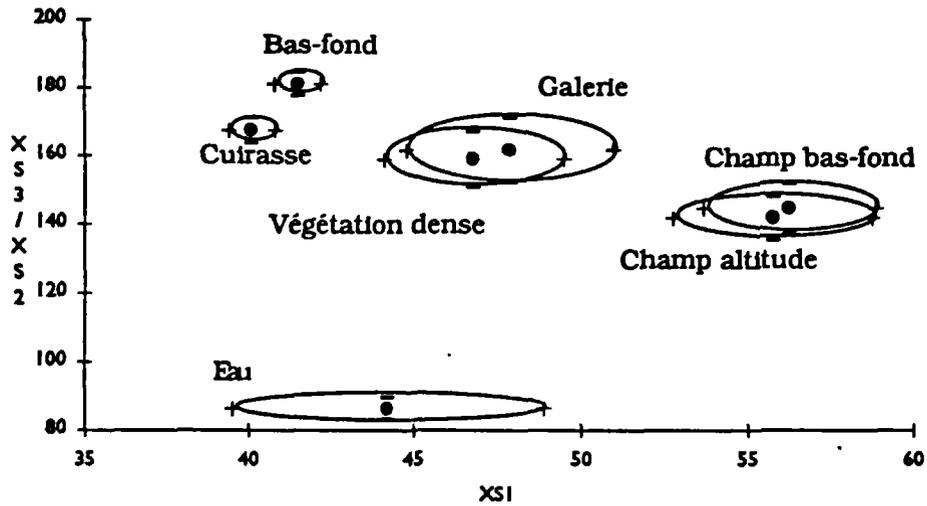
- «végétation dense» : surfaces non cultivées avec un important couvert végétal
- «cuirasse» : surfaces non cultivées avec peu de végétation = parcours dégradés,
- «eau» : eau libre du Bao-bolong,
- «galeries» : forêt galerie le long du réseau hydrographique,
- «bas-fond» : zone test choisie dans le bas-fond de Keur Samba Diama (superficie de 4 ha).

L'objectif de ce travail étant de mettre en évidence les zones de bas-fond, nous avons voulu savoir si les surfaces cultivées à proximité immédiate d'un bas-fond avaient des réflectances significativement différentes des autres champs. Nous créons donc 2 classes de champs :

- «champs de bas-fond» : surfaces cultivées situées en bas de toposéquence,
- «champs d'altitude» : surfaces cultivées situées sur des plateaux en haut de toposéquence.

Le rapport XS3/XS2 permet de faire ressortir la végétation, puisque celle-ci a une réflectance plus forte dans le canal XS3 et plus faible dans le canal XS2. La figure 87 représente la moyenne des luminances des pixels des zones-test, au centre, avec les écart-types de part et d'autre pour visualiser la dispersion.

Figure 87 : Dispersion des zones tests - 7 classes



L'eau se différencie des autres classes. Les écart-types importants sont dûs au fait que la partie Sud du Bao-bolong est salée, ce qui introduit des réflectances dispersées pour l'ensemble de la zone-test. La zone-test «bas-fond» est trop petite - 44 pixels seulement - mais elle se différencie également bien. En effet, pour l'analyse de l'hétérogénéité spatiale, il est nécessaire que l'élément de résolution soit tel que l'on puisse disposer d'au moins une centaine de pixels. (M.C. GIRARD et C.M. GIRARD, 1989). Certaines classes sont presque identiques : «végétation dense» et «galeries», «champ d'altitude» et «champ de bas-fond». Leur réunion donne 2 nouvelles classes : «végétation dense» et «champs».

Carte thématique

Pour éditer une carte thématique de la zone, la méthode de la classification supervisée a été utilisée.

La classification utilisée est la méthode Euclidienne : à chaque pixel est affectée la classe la plus proche par la distance euclidienne. Les calculs ne font donc intervenir que la luminance moyenne des classes. Une autre méthode faisant intervenir la variance a été testée - la méthode Sebestyen - mais les résultats ont été moins bons : davantage de confusion, la classe «bas-fond» disparaît presque complètement, la classe «cuirasse» est très réduite. Une carte couleur a été réalisée. (Planche couleur 3)

Tableau XCVIII : Classification de la zone de Thyssé Kaymor sur l'image SPOT d'avril 1987

Thème	Classe	Nombre de pixels	Superficies en %
«végétation dense»	1	205 918	36,5
«cuirasse»	2	61 000	10,8
«eau»	3	18 239	3,2
«champs»	4	262 015	46,5
«bas-fond»	5	16 829	3,0

Tableau XCIX : Matrice de confusion des classes sur la zone de Thyssé Kaymor

		Classes affectées				
		1	2	3	4	5
Classes	1	0,78	0,11	0	0	0,04
définies	2	0	0,96	0	0	0,04
pour les	3	0	0	1	0	0
zones	4	0,06	0	0	0,94	0
tests	5	0	0,02	0	0	0,98

C'est pour la classe 1 (végétation dense), que l'on observe le plus de confusion. La classe 5 (bas-fond) est bien distincte, mais n'oublions pas que la zone-test bas-fond ne fait que 44 pixels. Sur la carte, on retrouve des bas-fonds le long du réseau hydrographique, ce qui est tout à fait satisfaisant.

Région de Birkélane

Définition des classes

Les caractéristiques des classes «végétation dense», «cuirasse», «eau», «champs», et «bas-fonds» sont conservées. Deux nouvelles classes doivent être ajoutées :

- «brûlis», du fait de la présence d'une importante zone brûlée à l'Ouest de Birkélane,
- «méandre», qui correspond au fond du lit d'un bras du Saloum.

Le tableau C donne la répartition des luminances des zones types choisies pour définir les classes.

Tableau C : Répartition des réflectances des zones types choisies pour définir les classes dans la région de Birkélane

Classe	nb pixels	XS1	écart-type	XS2	écart-type	XS3	écart-type	XS3/XS2	écart-type
végétation dense	5326	47	2.8	44.8	3.5	59.8	3.6	156.5	8.5
cuirasse	595	40.1	0.7	36.6	1.2	53.1	2.5	167.5	3.8
brûlis	12282	44	1.6	43.5	2.5	46.3	3.3	135	7.5
méandre	366	61.3	2.5	59.3	3.2	57.7	5.5	123.6	7.8
eau	5733	44.2	4.7	34.3	4.2	23.3	3.1	86.4	3.3
champs	8409	56	2.8	58.8	3.7	66.5	3.2	142.6	6.9
bas-fonds	44	41.5	0.7	34.4	1.3	59.4	2.4	181.2	3.5

Carte thématique

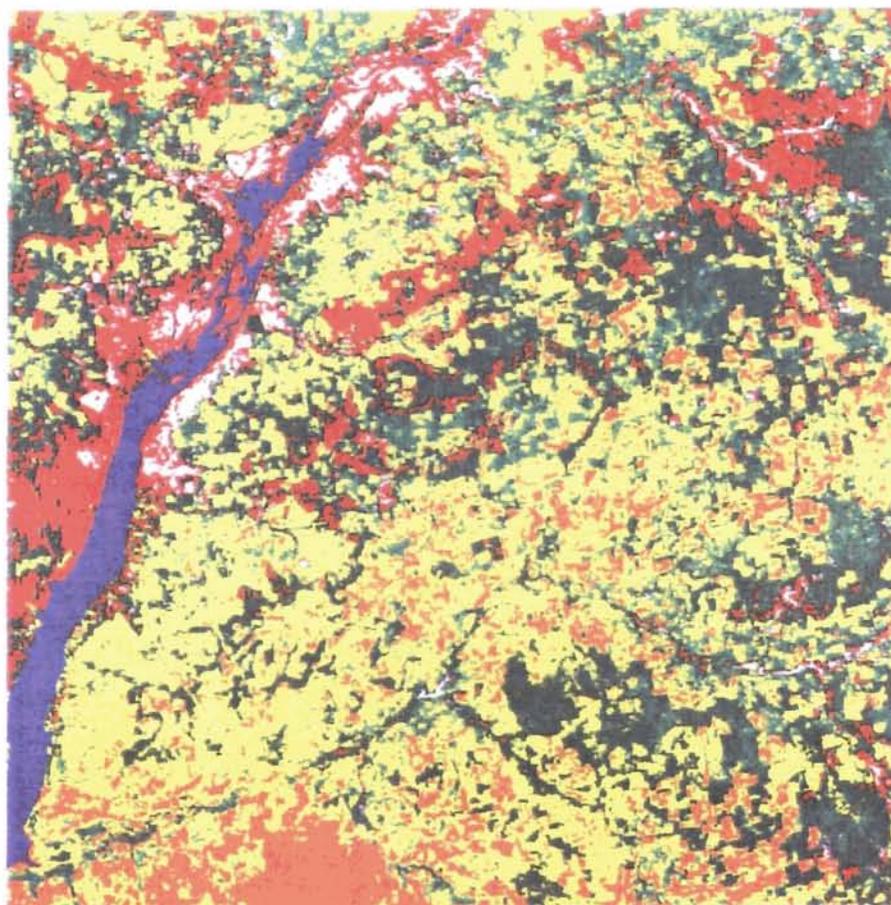
Le résultat de la classification supervisée est donné par la carte thématique de la planche couleur 3. On retrouve des bas-fonds le long de l'ancien cours du SALOUM, ainsi que dans les zones topographiques correspondant à cette unité. On retrouve cette même unité dans des zones de végétation dense ailleurs que sur le réseau hydrographique. Il est possible qu'il s'agisse de dépressions plus humides sur le plateau cuirassé. La vérification sur le terrain faite par LAMACHERE (1992) confirme l'existence de dépressions humides sur le plateau cuirassé.

CONCLUSION

Les classes «eau», «cuirasse» et «bas-fond» semblent correctement définies sur la zone de Thyssé-Kaymor. Il y a une légère confusion entre les classes «végétation dense» et «champs», mais l'ensemble reste satisfaisant. La classe «bas-fond» a donné de bons résultats dans la zone de Thyssé-Kaymor. Ce résultat positif nous encourage à penser qu'il devrait être possible d'utiliser les images satellites pour mettre en évidence les zones de bas-fond dans le type de paysage agricole rencontré.

Les zones de bas-fond potentiellement exploitables représentent moins de 5% des superficies de la région étudiée (150 km², centrés sur Thyssé-Kaymor et la zone de Birkélane). D'autre part, les sites utilisables excèdent rarement 5 ha d'un seul tenant. Cette caractéristique régionale doit être prise en compte dans les modes d'intensification agricole et dans les aménagements proposés.

**Planche couleur 3 : Classification supervisée de la région
de Thyse Kaymor sur l'image SPOT d'avril 1987**



AU SUD DU MALI ET DANS LA COMOE

Trois niveaux de recherche ont été explorés :

- Reconnaissance et mise en évidence des zones humides au sein du continuum paysager;
- Identification et caractérisation des composantes physiographiques et agro-écologiques des zones humides.
- Analyse des relations entre dynamique de l'eau et information satellitaire dans les parties rizicoles des zones humides.

Les méthodes mises en oeuvre sont basées sur le choix des images et des dates de prise de vue répondant le mieux aux objectifs à atteindre. Pour l'ensemble des sites: une image LANDSAT TM de fin de saison des pluies (octobre 1989) et une image LANDSAT TM de fin de saison culturale (décembre 1990). Pour le sud du Mali: une image SPOT multispectrale de saison sèche (mars 1990). Pour la Comoé (Burkina Faso): une image SPOT multispectrale de fin de saison culturale (janvier 1990) et une image SPOT multispectrale de saison sèche (mars 1990).

Neuf bassins situés au Burkina Faso et au Mali ont servi de cadre à la recherche : Damana, Kawara et Moadougou au Burkina; Kambo, Farako, Lotio, Banankoni, Samogosso et Sikasso au Mali.

Mise en évidence des zones humides

La méthode est résumée par la figure 88. Il s'agit d'une démarche intégrée de télédétection combinant les phases de photo-interprétation, d'observations sur le terrain et de traitements analogiques et numériques d'images satellitaires.

Une approche comparative a permis de tester la pertinence de deux procédures d'analyse de l'information satellitaire pour reconnaître et inventorier les zones humides au sein du paysage: traitement analogique et traitements numériques d'images.

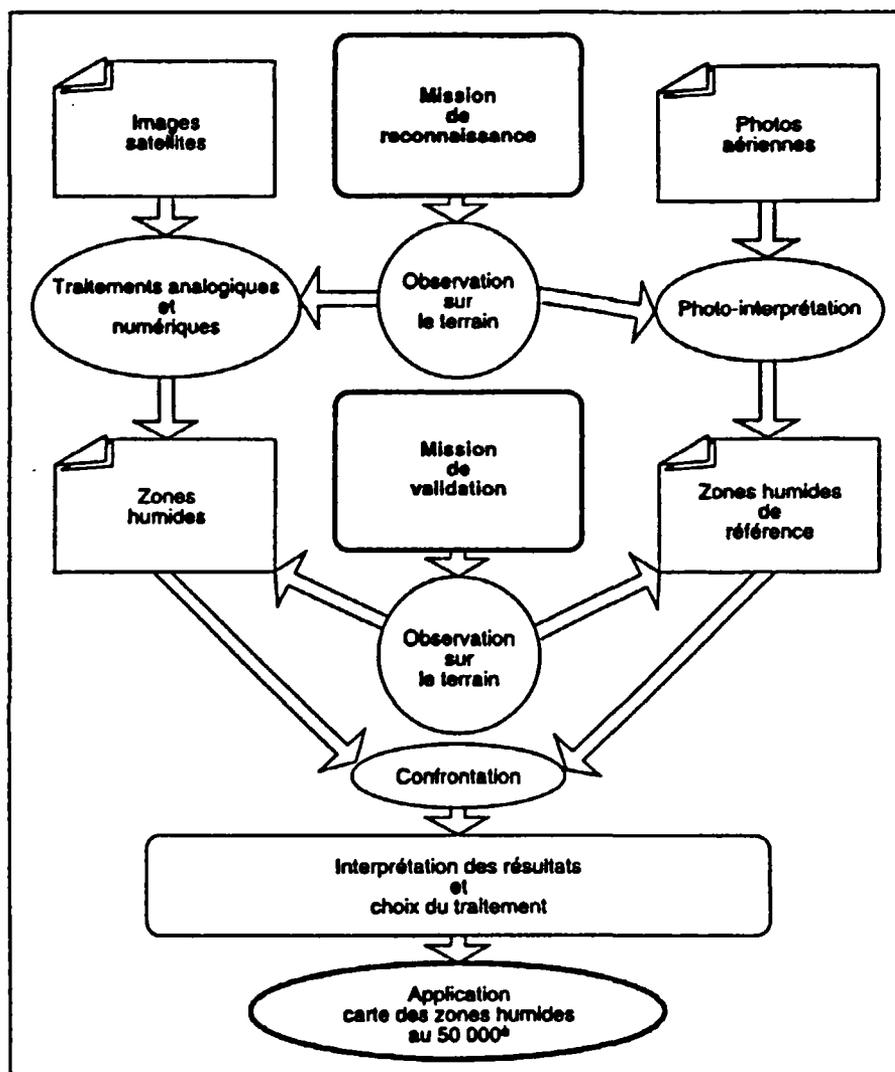
Le traitement analogique s'est effectué sur la base d'une simple interprétation visuelle des images restituées en composites colorés : pour l'image TM de novembre, la combinaison des canaux du moyen infrarouge (TM5), du rouge (TM3) et du bleu (TM1), s'est révélée optimale ; les zones humides s'y reconnaissant par leur teinte sombre et leur morphologie rubanée ou filiforme, qui tranche le plus souvent avec l'unité du paysage qu'elles longent ou traversent. L'individualisation des zones humides est réalisée en s'appuyant sur des critères de teinte, de texture, de forme des objets et sur l'environnement global.

Les traitements numériques testés sont de deux types : classification et seuillage.

- Les classifications ont consisté à regrouper les objets sur les images en fonction d'un caractère ou de caractères communs préalablement définis. Nous avons utilisé les procédures usuelles de la classification dite non supervisée (l'algorithme utilisé est la classification ascendante hiérarchique) et supervisée (l'algorithme associé est le classement par "Distance Minimum", utilisant l'équation de la distance euclidienne pour les calculs).

. Le seuillage consiste à extraire sur une image l'ensemble des points élémentaires (pixels) dont les valeurs sont incluses entre deux seuils, maximal et minimal, définis par l'opérateur. La détermination des seuils se base sur l'examen des signatures spectrales des zones observées sur le terrain qui appartiennent au thème à extraire. Sur la figure 89, on peut constater que les thèmes appartenant aux zones humides, présentent dans les canaux infrarouge thermique (TM6), infrarouge moyen (TM5) et rouge (TM3), une ressemblance par des comptes radiométriques faibles qui les démarquent en bloc des autres unités du paysage.

Figure 88 : Méthode suivie pour la mise en évidence des zones humides



A chacun de ces niveaux de traitement de l'information, la qualité numérique des résultats obtenus est acceptable. Les zones humides s'individualisent avec suffisamment de satisfaction comme le montre le tableau CI. La vérification de ces résultats sur le terrain montre cependant que le traitement analogique se révèle plus performant pour mettre en évidence les zones humides d'une région et minimiser les risques d'erreurs par omission et par confusion.

Tableau CI : Appréciation numérique des traitements de mise en évidence des zones humides sur l'image Landsat TM du 05/11/88 et sur les photographies aériennes du 10/11/89. Confrontation avec la "réalité-terrain" issue d'un sondage au sol

Traitements	N1	N2	E1	E2
Photo-interprétation	29	27	6.9	3.6
Traitement analogique	31	27	12.9	3.6
Seuillage sur TM6	30	27	10.0	3.6
Classification supervisée	25	24	5.0	15.3
Classification non supervisée	25	23	8.0	17.9

Nombre total de parcelles d'observation : 200

Nombre de parcelles appartenant, sur le terrain, aux zones humides : 28 = N

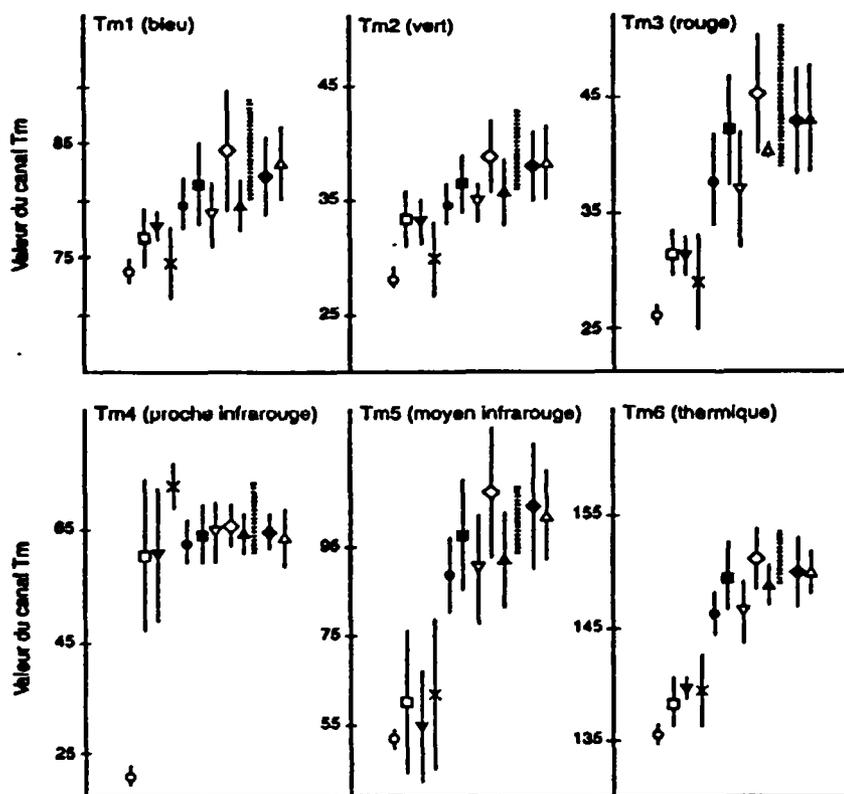
N1 : nombre de parcelles d'observation appartenant, sur le traitement, aux zones humides.

N2 : nombre de parcelles d'observation appartenant, sur le terrain, comme sur le traitement, aux zones humides.

E1 : erreur de confusion, en % : $E1 = (N1 - N2) * 100 / N1$

E2 : erreur d'omission, en % : $E2 = (N - N2) * 100 / N$

Figure 89 : Signatures spectrales extraites de l'image LANDSAT-TM du 05/11/88 pour quelques thèmes dans les plaines et bassins versants de :



Zones humides:

- Mares
- Bas fonds rizicoles
- ▽ Prairies
- × Formations ripicoles

Végétation naturelle sur versants et plateaux:

- Savanes boisées
- Savanes arborées
- ▽ Savanes arbustives
- ◇ Savanes herbeuses

Zones anthropiques:

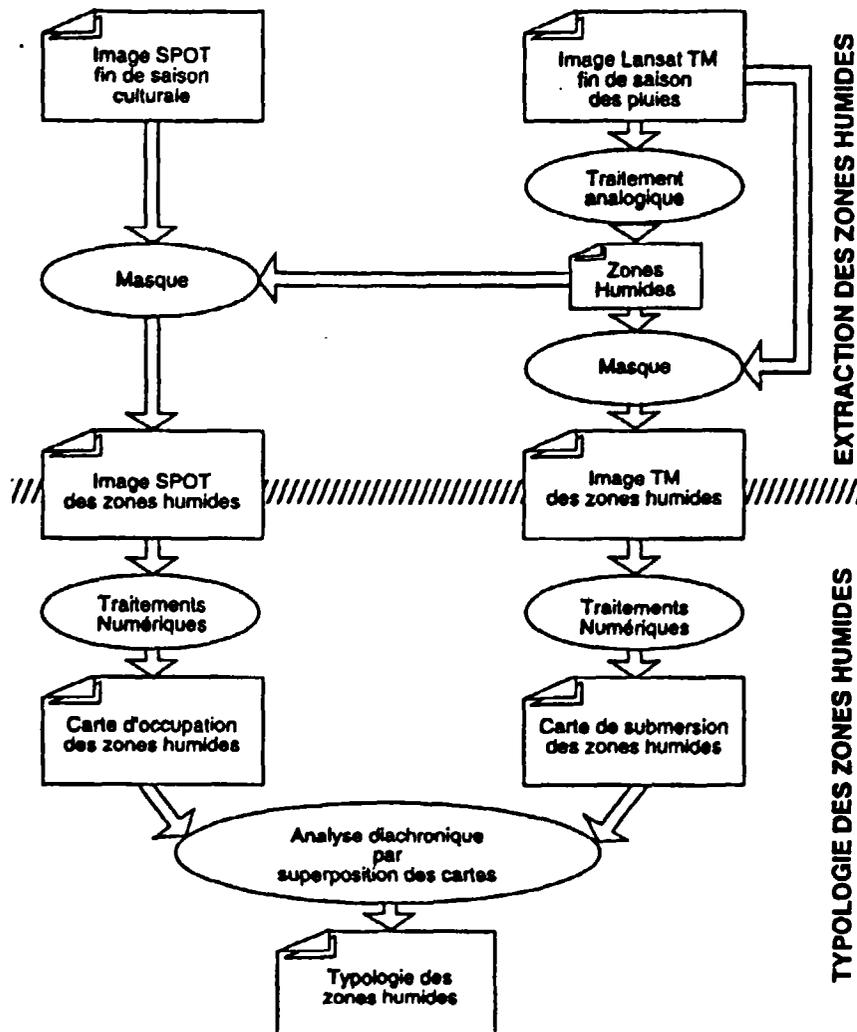
- ▲ Vergers
- l Cultures
- ◆ Jachères
- △ Habitats

Les principales unités agro-écologiques des zones humides

Les procédures ci-devant, ont conduit à discriminer l'élément "zones humides" au sein du paysage. La détermination de l'aire d'extension de ces zones qui en découle, permet à présent d'effectuer une hiérarchisation de l'information dans ces milieux en classes thématiques discrètes. Une démarche (Figure 90) d'analyse bitemporelle supervisée d'une image LANDSAT-TM et d'une image SPOT-XS permet d'opérer un zonage agro-écologique au sein des zones humides, en regroupant l'information selon les critères spectraux définis préalablement lors de la phase d'entraînement. Le résultat de cette partition à la fois sur l'image TM de fin de saison des pluies et l'image SPOT de fin de saison culturale est une stratification des zones humides en classes qui rendent compte à la fois du type d'occupation du sol (traitements sur SPOT) et de son niveau de submersion (traitement sur TM). La nomenclature et la signification des classes sont légèrement ajustées pour tenir compte des spécificités propres à chacun des 9 bassins étudiés. Globalement les classes thématiques suivantes sont distinguées (MOKADEM A. & al, 1991):

- 1°) Les plans d'eau libre, les mares ou les marigots.
- 2°) Les marécages : sols nus à engorgement plus ou moins temporaire.
- 3°) Les rizières : parties emblavées en riz dans les zones humides.
- 4°) Les cultures maraîchères : essentiellement dans la plaine de Sikasso.
- 5°) Les formations prairiales : formations herbeuses.
- 6°) Les formations ripicoles denses : formations végétales ligneuses de recouvrement supérieur à 50%.
- 7°) Les formations ripicoles peu denses : formations végétales ligneuses de recouvrement inférieur à 50%.

Figure 90 : Méthode suivie pour la discrimination des états de surface au sein des zones humides



La qualité des résultats obtenus lors de cette analyse diachronique a été validée au cours d'une mission sur le terrain. La construction des matrices de confusion entre les observations de terrain et la classification permet de constater une précision globale pour l'ensemble des sites de l'ordre de 90%.

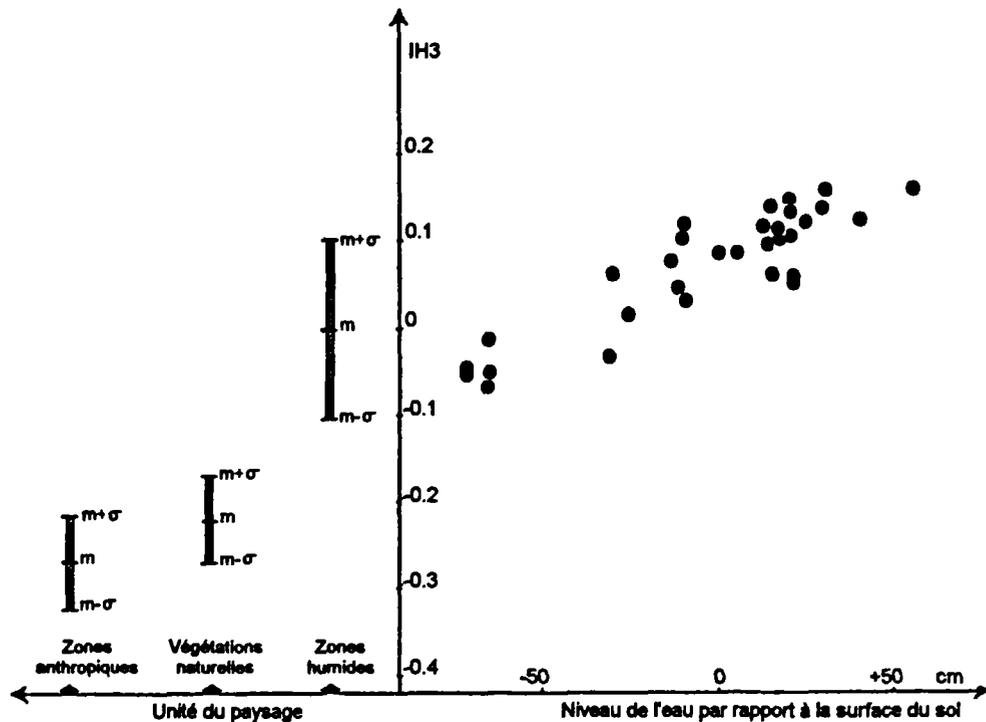
Dynamiques de l'eau et radiométrie satellitaire

Il s'agit dans cette étape de la démarche, de définir et d'analyser au sein des zones humides rizicoles les relations éventuelles entre dynamique de l'eau (traduite par le niveau de fluctuation de la nappe) et l'information satellitaire brute ou indicielle.

L'information satellitaire utilisée est celle de l'image LANDSAT-TM du 05 novembre 1988. A cette période, nous disposons de données de terrain reprenant les valeurs de fluctuation de la nappe sur 31 points de mesure piézométrique dans les parties rizicoles des bas-fonds de Kawara et de Moadougou.

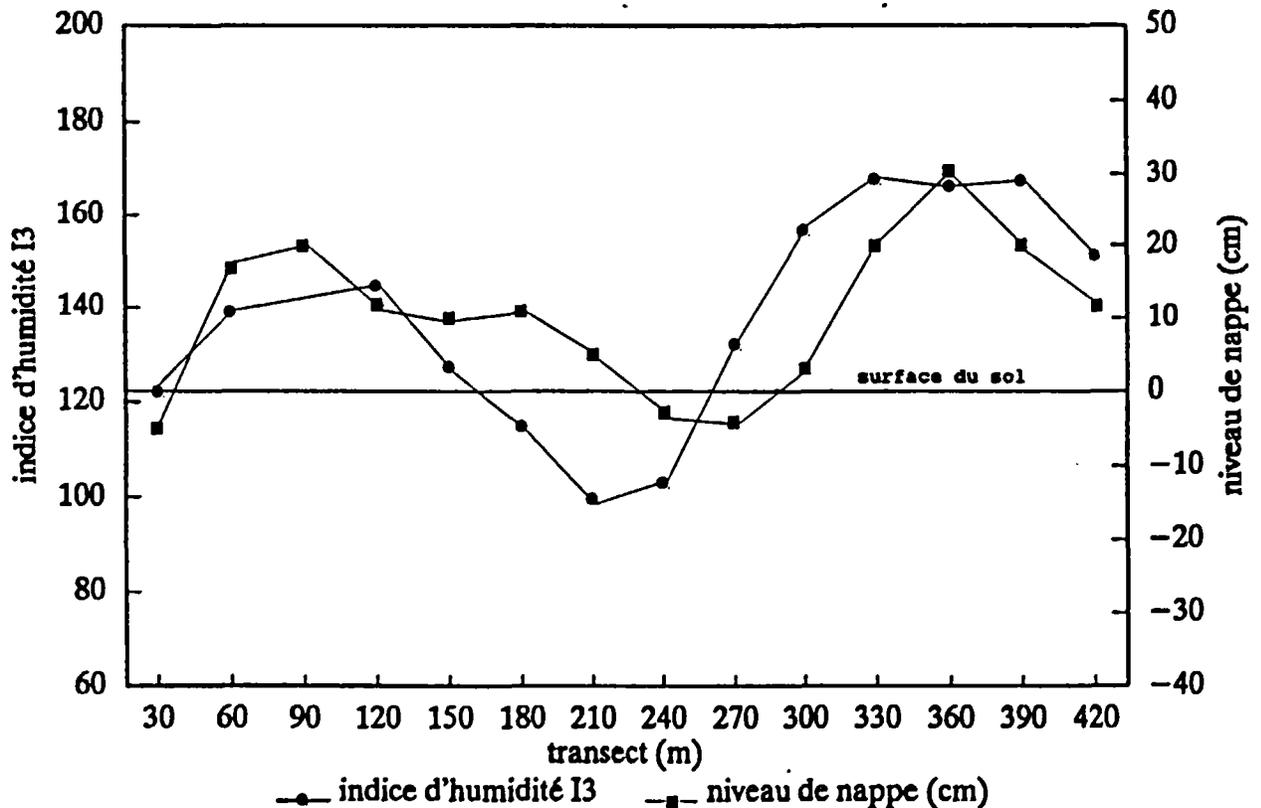
Ces points de mesure sont répartis spatialement de façon à représenter différentes situations géomorphologiques des bas-fonds (amont, aval..., berge, lit mineur...). La valeur radiométrique extraite en chaque point est un compte moyen du pixel le représentant et de son voisinage immédiat (connectivité d'ordre 4). La détermination des relations entre valeurs des niveaux de l'eau par rapport à la surface du sol et données télédéteectées brutes ou dérivées procède du calcul de corrélation entre ces deux variables. Nous retiendrons que les relations sont très peu significatives au niveau des canaux bruts de TM et des indices classiques du type NDVI, RVI, DVI, SLI, PVI, Brillance (la valeur du coefficient de corrélation la plus élevée a été obtenue avec le canal infrarouge moyen, TM5 : $r = -0.574$). En revanche, nous avons obtenu avec de nouveaux indices que nous avons intitulés "Indices d'Humidité (IH)" des coefficients de corrélation élevés qui sont favorables à l'existence d'une relation significative entre valeurs des niveaux de la nappe et données satellitaires. Pour l'indice (IH3) le mieux corrélé aux valeurs des niveaux de nappe ($r = 0.89$), une régression simple est calculée par la méthode des moindres carrés. La relation établie est satisfaisante comme l'illustre la figure 91 ci-après.

Figure 91 : Relation entre l'indice satellitaire IH3 et le niveau d'engorgement des rizières (partie droite) Domaine radiométrique des grandes unités du paysage suivant ce même indice (partie gauche)



Une campagne de mesures sur le terrain a été effectuée en novembre 1990 (soit deux ans après la prise de l'image TM), pour tester le niveau de validité des résultats issus de l'utilisation de l'indice d'humidité. Les observations sur 16 transects répartis d'amont en aval du bas-fond de Kawara, permettent de noter que l'indice d'humidité varie avec le degré d'engorgement des sols comme le suggère la figure 92.

Figure 92 : Confrontation des données recueillies au sol et des données satellitaires dans le bas-fond de Kawara (Burkina Faso)



transect n° 8

Vérité-terrain: nov 1990 & image Landsat TM: nov 1988

Il découle de ce qui précède la possibilité de se servir de cette relation pour effectuer une caractérisation des bas-fonds rizicoles en zones hydrologiques homogènes. La partition permet de constater l'existence d'un gradient d'engorgement des sols entre les berges et le lit central des bas-fonds. Cette tendance passe d'un niveau phréatique très bas (engorgement nul) à un niveau plus proche de la surface du sol (engorgement total) dans l'axe central du bas-fond (Planche couleur 4).

Utilisation des images satellitaires pour la mise en valeur agricole des bas-fonds

A chacun de ces trois niveaux d'abstraction de l'information, nous avons pu faire correspondre une fonction de typologie des bas-fonds à un ou deux critères, et des perspectives d'application pratique des résultats dégagés.

Dans l'objectif d'élaboration d'une typologie des bas-fonds, le travail a permis de mettre en évidence plusieurs critères pertinents de caractérisation de ces zones :

- **dimensionnel** : largeur moyenne des bas-fonds;
- **morphologique** : compacité des bas-fonds;
- **chorologique** : intensité de l'activité anthropique;
- **descriptif** : potentiel de ruissellement sur les versants;
- **hydrologique** : niveau de submersion (ou d'engorgement) des bas-fonds.

Au niveau pratique les résultats peuvent connaître les applications suivantes:

- Le rendu cartographique des zones humides à une échelle appropriée est un outil de base utile pour les décideurs et les aménageurs dans l'optique de la mise en valeur des bas-fonds au Sahel. L'échelle du 1:50000ème par exemple suffit pour estimer les potentialités d'une région en zones humides en vue d'une politique globale de mise en culture de ces zones.
- La répétition périodique de la démarche par ailleurs, permet de suivre l'évolution des zones humides face à l'impact général de la sécheresse et de l'intervention humaine.
- La détermination des principales composantes agro-écologiques à l'intérieur des zones humides permet d'évaluer la superficie du secteur rizicole et contribue ainsi à l'amélioration des statistiques agricoles d'une région ou d'un pays.

La carte des états de surface facilite également le choix d'emplacement des nouvelles surfaces à aménager en vue d'une meilleure exploitation des terres et de l'orientation des activités des communautés rurales. Sur les versants, la carte d'occupation du sol est très utile pour des actions locales de compréhension et de modélisation des phénomènes d'écoulement superficiel.

Les résultats dégagés au cours de l'analyse de l'engorgement des bas-fonds sont également importants. En effet, l'efficacité des principales opérations agricoles est liée au bilan hydrique de la plante et du sol. Le défaut ou l'excès d'eau se répercute immédiatement sur la physiologie des cultures et, dès lors, présente une incidence significative sur les productions attendues. Cela est particulièrement vrai dans le cas de la culture du riz où le facteur limitant au développement de cette production est essentiellement l'eau. C'est dire donc que déterminer des gradients d'engorgement à l'intérieur des rizières est particulièrement utile pour:

- faciliter la découverte de secteurs qui requièrent d'urgents besoins d'aménagement;
- suggérer les emblavures à mettre en riz (ou en d'autres spéculations agricoles) et donc programmer en temps utile tous les intrants nécessaires pour les cultures.
- moduler les calendriers culturels en fonction de l'état d'engorgement des sols au cours de la saison.
- éveiller l'attention de l'aménageur sur les difficultés susceptibles de gêner son action (humidité excessive par exemple).

Intégrés à d'autres données cartographiques numériques (climatiques, géologiques, démographiques, ...), nos résultats peuvent servir à alimenter un Système d'Information Géographique (S.I.G.) qui permettrait de définir une typologie pragmatique des zones humides, en fonction de la localisation, de la morphologie, de la superficie, de l'état des surfaces, de la dynamique hydrologique... Identifiés par la télédétection et d'autres caractéristiques recensées dans les autres couches de la base de données ainsi constituée.

En guise de conclusion, nous avons montré à travers une démarche simple d'analyse bitemporelle d'images satellitaires haute résolution sur des sites pilotes au Burkina Faso et au Mali, les possibilités offertes par les satellites d'observation de la terre pour la recherche d'informations spatialisées en termes qualitatifs (nature, signification, état...) ou quantitatifs (superficie, intensité, densité...) sur des objets de la surface terrestre, notamment au niveau des bas-fonds. Les résultats obtenus indiquent qu'il est possible d'obtenir de bons critères de diagnostic sur les bas-fonds à partir de la reconnaissance, de l'analyse et de l'interprétation des états de surface de ces milieux par télédétection. Ils révèlent ainsi la contribution que peut apporter l'information satellitaire pour la typologie des bas-fonds et la généralisation de leurs caractères descriptifs.

Planche couleur 4 : Caractérisation du bas-fond de Kawara selon le niveau d'engorgement du sol et les grandes unités agro-écologiques du paysage.

