

# Exploitation simultanée de plusieurs missions photographiques en cartographie des sols

Analyse, modélisation et application

J.P. Legros<sup>(1)</sup>, C. Emery<sup>(2)</sup>, P. Falipou<sup>(1)</sup>

(1) INRA - Science du Sol - place Viala, 34060 Montpellier cedex 01

(2) Novasys SA, 74 Avenue de Cour - 1000 Lausanne 3 Cour- Suisse

## RÉSUMÉ

Depuis quelques décennies, les pays d'Europe refont, à intervalle plus ou moins régulier, la couverture de leur territoire par photographie aérienne. Nous étudions ici le problème de savoir s'il serait intéressant d'utiliser simultanément plusieurs missions pour faciliter la cartographie des sols. Nous nous appuyons sur l'exemple concret de la délimitation d'un ancien marais assaini, dans la plaine de l'Orbe, près d'Yverdon, en Suisse. Mais, la couleur sombre de la végétation chlorophyllienne masque, en général, la couleur du sol, sauf lorsque celui-ci est nu (labours, jeunes semis). On examine donc les surfaces sans végétation et on profite du fait que celles-ci ne concernent pas toujours les mêmes parcelles, d'une mission à la suivante, pour identifier le plus grand nombre possible de lieux dans lesquels la couleur de la surface du sol est visible. La connaissance que le cartographe a du terrain progresse en conséquence. Dans le meilleur des cas, ces parcelles, dont le sol est nu, sont à cheval sur la limite recherchée qui est alors directement perceptible. Une modélisation, par le calcul des probabilités, permet de déterminer le volume d'information gagné en utilisant plusieurs clichés. Mais, dans l'exemple considéré (délimitation d'un marais), la difficulté majeure est liée au fait que la végétation chlorophyllienne a la même teinte sombre que le sol nu du marécage, sur des photographies en noir et blanc. Il y a donc un risque de confusion c'est-à-dire d'attribuer au marais des surfaces où il est absent. Ce risque d'erreur est évalué. On montre, en définitive, que l'utilisation conjointe de deux missions aériennes, en cartographie des sols à grande échelle, pourrait être rentable. Par ailleurs, la méthode pourrait être adaptée à des études concernant les états de surface.

## Mots clés

Cartographie des sols, photographies aériennes, limite pédologique, probabilités

## SUMMARY

### COMBINED USE OF SEVERAL AERIAL PHOTOGRAPHS FOR SOIL MAPPING

When mapping soils in developed countries, it is often possible to use several aerial photographs taken at different dates and years. Then what time would be gained by combining the observations made simultaneously on several photographs? The present paper examines a case study that is the delimitation of a marsh in the middle of a narrow valley in the Lausanne region (Switzerland). See fig. 1.

We focused our attention on plots that were bare or had recently been sown. They represent windows that move in the country, years after years, and allow us to see directly a small part of the soil surface. In fact we must consider 3 main cases (fig. 5): (1) plots appearing as dark areas, covered in vegetation if outside the marsh, and either covered in vegetation or bare if within it, (2) plots appearing as light areas, surely bare and outside the marsh, (3) bare plots appearing as areas of light and dark, in which parts of the marsh boundary are directly visible.

We then built two probability-based models. The first one predicts the proportion of the marsh boundary that would be visible if 1,2, ... n aerial photographs are used (fig. 4). The second one calculates the probability with which a dark plot is one corresponding to the marsh (table 6).

The exercise demonstrates that the simultaneous use of two aerial covers could be profitable for large scale pedological studies.

Key-words

Soil mapping, soil boundaries, aerial photographs, probability.

## RESUMEN

### EXPLOTACIÓN DE VARIAS MISIONES FOTOGRÁFICAS PARA LA CARTOGRAFÍA DE SUELOS

Análisis, modelización y aplicación

Desde varios decenios, los países de Europa hacen de nuevo, con intervalos más o menos regulares, la cubierta de su territorio por fotografías aéreas. Estudiamos aquí el problema de saber si sería interesante de usar simultáneamente varias misiones para facilitar la cartografía de los suelos. Nos apoyamos sobre el ejemplo concreto de la delimitación de un pantano saneado en la planicie del Orbe, cerca de Yverdon, en Suiza. Pero el color oscuro de la vegetación clorofílica oculta, en general, el color del suelo, salvo cuando este está desnudo (labranza, jóvenes sembrados). Se examina entonces las superficies sin vegetación y se aprovecha el hecho de que estas no conciernen siempre las mismas parcelas, de una misión a la siguiente, para identificar el más grande numero posible de lugares donde el color de la superficie es visible. En consecuencia, el conocimiento que el cartógrafo tiene del terreno aumenta. En el mejor de los casos, estas parcelas, cuyo suelo está desnudo, están directamente sobre el limite buscado que entonces se encuentra perceptible. Una modelización, por cálculos de probabilidades, permite determinar el volumen de información ganado, usando varias fotografías. Pero, en el ejemplo considerado (delimitación de un pantano), la mayor dificultad está ligada al hecho de que la vegetación clorofílica tiene la misma matiz oscura que el suelo desnudo del pantano. Existe un riesgo de confusión, es decir de atribuir al pantano superficies por donde no está. Este riesgo de error se evalúa. Se muestra, en definitiva, que el uso conjunto de dos misiones aéreas en cartografía de suelos a grande escala podría ser rentable. Por otra parte, el método podría ser adaptado a estudios que conciernen los estados de superficie.

Palabras claves

Cartografía de suelos, fotografías aéreas, limite pedológico, probabilidades

**D**ans les pays développés et tout particulièrement en Europe, les cartographes du sol disposent presque toujours de plusieurs missions aériennes pour servir de guide, voire de support, à leurs délimitations pédologiques. Dans ces conditions, on peut se poser deux questions, au moins. D'une part, est-on sûr que la dernière mission soit la meilleure pour aider à atteindre le but poursuivi ? D'autre part, l'utilisation simultanée de plusieurs missions serait-elle susceptible d'accroître la qualité de la délimitation des sols ? Si oui, dans quelle mesure ?

Pour répondre à ces questions, nous allons considérer un cas modèle dont nous avons déjà signalé l'existence dans un ouvrage consacré à la cartographie mais sans pour autant l'analyser en détail (Legros, 1996). Il s'agit du marais de l'Orbe, en Suisse, entre Lausanne et Neuchâtel. Ce marais a été drainé en 1930. Il reste donc, sur le terrain, des sols noirs et très humiques qui occupent le centre d'une vaste dépression. Ils sont maintenant cultivés. Les sols d'alentour sont développés sur les moraines du «Plateau suisse». Ils sont limono-argileux et de couleur claire. Ils sont cultivés également. Nous allons nous intéresser à la délimitation du marais. Cela constitue un exercice relativement facile, compte tenu du fort contraste de couleur entre les sols en cause.

La région est aussi intéressante au plan des missions photographiques. On y dispose de 10 couvertures aériennes de différentes natures et échelles et qui sont échelonnées dans le temps. Le tableau 1 rend compte de la situation. En fait, nous utiliserons essentiellement les missions de 1960 à 1990. Elles correspondent à ce qui est le plus souvent disponible en cartographie, à savoir, un petit nombre de missions en noir et blanc.

Dans un tel contexte, notre étude peut être abordée de deux façons que nous traiterons successivement. La première

approche consiste à construire la limite du marais en la suivant en même temps sur les différentes photographies correspondant aux différentes missions aériennes. Plus précisément, on espère que, pour chaque portion de cette limite, il existe au moins une photo sur laquelle on la détecte. La seconde approche consiste à privilégier les contenus et les contenants plutôt que de rechercher à suivre la limite proprement dite. Il s'agit alors d'examiner successivement chaque parcelle agricole du secteur et de calculer sa probabilité d'appartenance au marais.

Au plan méthodologique, nous allons être amenés à utiliser le théorème de Bayes qui permet de s'intéresser à la probabilité des causes. Son emploi est assez fréquent en télédétection. Il permet de répondre à des questions du type «Quelle est la probabilité pour qu'un objet émettant telles longueurs d'ondes et qui fait donc partie de telle catégorie au niveau de la mesure se classe dans tel groupe thématique (ex : vignoble ou verger)». On peut lire, dans la revue *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, un certain nombre d'articles sur le sujet (Skidmore et Turner, 1988 - Skidmore, 1989, Green et al, 1993). En revanche, nous n'avons rien trouvé de semblable chez les cartographes du sol.

En conclusion, nous montrerons que la méthode suivie peut trouver de nombreuses applications dépassant de beaucoup l'exemple qui a été pris pour l'exposer.

## APPROCHE PAR LES LIMITES

### Informations disponibles

A l'époque des prises de vues, les terrains sont occupés par différents types de végétations, certaines masquant le sol

Tableau 1 - Missions photographiques disponibles dans la plaine de l'Orbe. En italique : les missions utilisées de manière prioritaire dans le cadre de l'article.

Table 1 - Available aerial photographs in the Orbe region. In italic : the series used in the present study.

Nature de la mission	Echelle réelle recalculée	Date	Contexte
Noir et blanc	1/16 203	Avant guerre	
Noir et blanc	1/29 228	25/05/1960	Couverture
Noir et blanc	1/27 413	15/05/1968	systématique de la Suisse
Noir et blanc	1/24 843	04/06/1974	par le Service Topographique
Noir et blanc	1/22 457	05/06/1980	
Noir et blanc	1/34 267	09/06/1986	
Noir et blanc	1/33 686	22/08/1990	
Fausse couleur	1/11 630	/07/1986	Couverture du canton de Vaud
Fausse couleur	1/6 369	16/05/1991	Mission spéciale Orbe EPFL
Fausse couleur	1/6 363	26/05/1992	Mission spéciale Orbe EPFL

(blés ou orges en herbe) et d'autres ne le masquant pas (semis de maïs, betterave, tournesol). Certaines parcelles, dont la teinte du sol est visible d'avion, se trouvent à cheval sur la limite du marais. Alors cette limite est clairement détectable puisque, d'une partie à l'autre de la parcelle, la teinte passe du noir au gris très clair. Nous appellerons ces parcelles de couleur très hétérogène «champs variables». Notre objectif est ici d'exploiter l'information correspondante et d'introduire une modélisation adaptée. Mais pour mener la démarche à son terme, il nous fallait une référence au sol, c'est-à-dire une délimitation du marais aussi précise que possible. Cela a été obtenu en mobilisant, entre 1992 et 1997, des promotions d'étudiants de la section Génie Rural de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Les efforts faits représentent

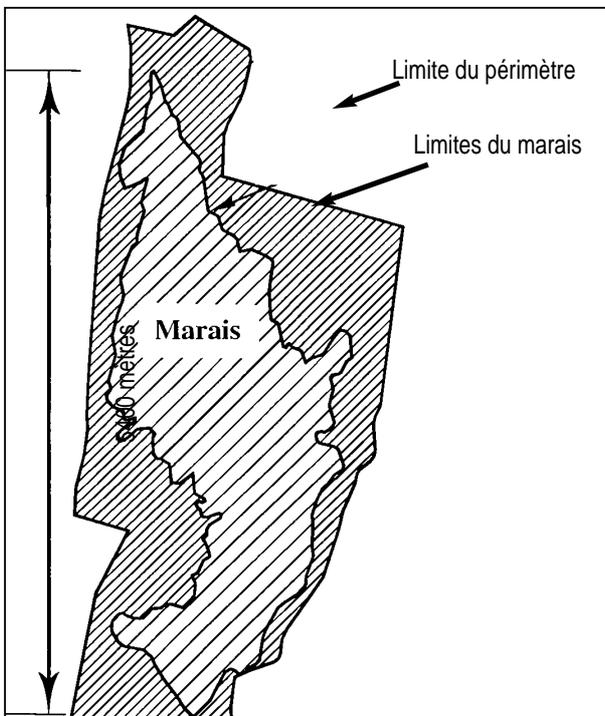
Tableau 2 - Caractéristiques du marais.

Table 2 - Marsh characteristics

Surface du marais	424,49 ha
Périmètre du marais	15,630 km
Surface totale cartographiée (marais et bordures)	1 006,15 ha

Figure 1 - Limite du marais établie au sol et limite du périmètre étudié.

Figure 1 - Boundaries of the marsh drawn during the field work and limits of the studied area.



l'équivalent de 110 jours de terrain pour une équipe de 2 personnes. Par ailleurs, pour affiner le tracé, nous avons obtenu du professeur Kölbl et de ses étudiants (Laboratoire de Photogrammétrie, EPFL) deux missions spéciales en infrarouge couleur du marais (tableau 1). On peut donc considérer que l'effort est suffisant pour connaître la limite vraie de ce marais avec une excellente précision (à 50 mètres près). Cette prospection au sol permet de fournir les données du tableau 2 ; elles nous serviront par la suite. Les décimales ne sont pas significatives mais nous les laissons pour ne pas propager des erreurs d'arrondi. Ce sera la même chose dans les tableaux de chiffres présentés plus loin dans l'article. Par ailleurs, la figure 1 présente le marais et la zone de travail.

## Traitements informatiques

L'un de nous a repéré les «champs variables» sur chacune des missions photographiques servant de base à l'étude (1960 à 1990). Il a tracé les fractions de limites correspondantes. Ces tracés ont été faits en 1991, c'est-à-dire avant les contrôles au sol. Les informations ont été enregistrées par un des auteurs au moyen du SIG Arc/Info (6 couvertures d'arcs et 6 couvertures de parcelles - polygones). Six points de repérage, visibles sur toutes les missions, ont été sélectionnés pour assurer la mise en coïncidence des tracés. On observe alors que la synthèse est difficile (figure 2).

Souvent, les missions permettent de découvrir des portions de limites qui se complètent (ex: traits se prolongeant les uns les autres). Mais parfois, les tracés sont contradictoires (ex: cas de deux traits parallèles). Dans ces conditions, une information sur la limite est considérée comme valable seulement si elle se situe dans un corridor de 100 mètres de large (buffer en langage Arc/Info) à cheval sur la limite vraie déterminée au sol. Par ailleurs, une portion de limite observée sur un cliché a de l'intérêt surtout si elle vient en complément de l'information déjà disponible sur les clichés examinés antérieurement. Il faut donc découper le corridor, perpendiculairement à son allongement, en espaces qui sont renseignés ou non quant à la présence de la limite. Cela est obtenu, dans Arc/Info, par une intersection du corridor avec les limites de tous les «champs variables» définis plus haut.

## Modélisation

Soit «prop» la proportion de limite vue et tracée, en moyenne, sur un cliché. Elle est exprimée en proportion du périmètre du marais déterminé au sol.

Soit «VUn» la somme des fractions de limite vues et donc tracées en utilisant n clichés correspondant à n missions. Cette grandeur est, comme la précédente, exprimée en proportion du périmètre du marais.

Supposons que les champs variables, c'est-à-dire les champs dont la couleur n'est pas masquée par la végétation et qui se situent sur la limite du marais, sont répartis de manière

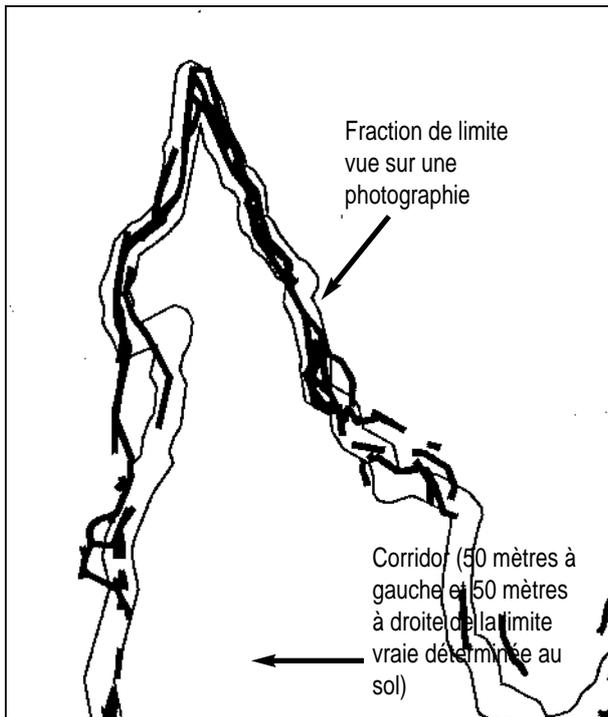
aléatoire d'une mission à l'autre. Dans ces conditions, si on dispose de deux missions, on verra alors une proportion de limite telle que :

$$VU2 = VU1 + \text{prop} \cdot (1 - VU1)$$

En effet, c'est seulement dans la partie non vue la première fois (1-VU1) qu'il est intéressant de détecter une proportion

Figure 2 - Portions de limites vues sur les différentes photographies (de 1960 à 1990) et représentation du corridor de 100 m chevauchant la limite vraie déterminée au sol.

Figure 2 - Parts of the marsh boundary seen on the different aerial photographs ; GIS buffer of 100 m wide following the marsh boundary that was drawn during the field work.



prop de limite pour augmenter au total la détection. Mais, il est probable que la position des champs variables n'est pas complètement aléatoire et que certains se retrouvent systématiquement au même endroit d'une mission à l'autre. Ce pourrait être le cas de parcelles traitées en monoculture ou le cas d'une rotation culturale dont le cycle interférerait avec la période séparant deux prises de vues. Dans ces conditions, VU2 aura une valeur plus petite que prévu. Posons alors :

$$VU2 = VU1 + (1 - \alpha) \cdot \text{prop} \cdot (1 - VU1)$$

Dans cette formule, alpha est un coefficient de calage empirique compris entre 0 et 1. S'il vaut 0 on retombe sur la formule précédente. S'il est plus grand que zéro, la valeur de VU2 est diminuée dans une proportion maîtrisée. En fait, alpha peut être vu comme le degré de dépendance entre images. Si alpha = 1, les images sont semblables et une seule mission apporte toute l'information disponible. Si alpha = 0, les images sont indépendantes et chacune apporte un maximum d'informations nouvelles.

A partir de 3 missions, la formule se complique un peu mais son calcul reste élémentaire ; on procède pas à pas, par le moyen d'une boucle dans un programme informatique. Il suffit d'écrire au sein de la boucle :

$$VU = VU + (1 - \alpha) \cdot \text{prop} \cdot (1 - VU) \quad (1)$$

On trouvera en annexe, le programme FORTRAN correspondant. On suppose que alpha et prop gardent une valeur constante, d'un couple de missions au suivant, ce qui constitue évidemment une simplification.

Résultats

Le tableau 3 rend compte de la proportion de limite réellement vue pour chacune des missions.

Il est possible de comparer le modèle que nous venons d'établir avec l'expérimentation consistant à utiliser le SIG Arc/Info pour construire la limite en utilisant successivement les différentes missions. Les résultats sont fournis dans le tableau 4.

Tableau 3 - Perception de la limite sur les clichés des différentes missions.

Table 3 - Numerical values concerning the observed parts of the marsh boundary.

Mission	Nombre de segments	Longueur totale des segments vus (km)	Proportion de limite vue en pour cent
1960	38	5,319	34,79
1968	21	3,083	23,30
1974	45	6,198	41,85
1980	28	4,089	27,15
1986	26	6,021	42,86
1990	37	5,770	37,82

Tableau 4 - Proportion de limite vue et proportion calculée par simulation en cumulant, dans les deux cas, l'information donnée par les différents clichés.

Table 4 - Percentage of the marsh boundary seen on the photographs and percentage calculated with a link degree of alpha between the aerial views ; in cumulated values.

Mission	Proportion de limite vue	Proportion de limite calculée		
		alpha = 0	alpha = 0,3	alpha = 0,6
1 (1960)	34,8	34,6	34,6	34,6
2 (1968)	46,6	57,2	50,4	43,6
3 (1974)	64,5	72,0	62,4	51,4
4 (1980)	70,3	81,7	71,5	58,2
5 (1986)	76,2	88,0	78,4	64,0
6 (1990)	81,2	92,2	83,7	68,9

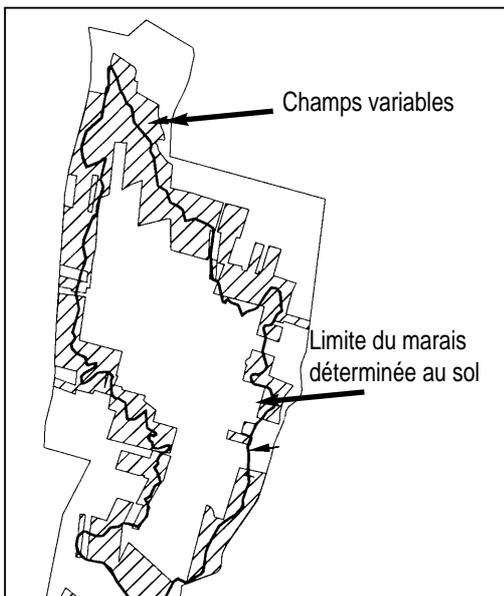


Figure 3 - Représentation de la limite du marais et de tous les champs variables vus sur les 6 missions.

Figure 3 - Real boundary of the marsh and all fields in which this boundary can be seen.

1) Certaines missions sont plus intéressantes que d'autres puisque la proportion de limite vue est comprise entre 23% et 43%, c'est-à-dire varie presque du simple au double (tableau 3).

2) Il est difficile de cerner la raison pour laquelle certaines missions présentent une plus grande proportion de sols nus ou peu couverts. En effet, nous avons vérifié que cela ne correspond pas aux clichés pris plus tôt en saison. D'ailleurs, à part la mission de 1990, toutes correspondent à des dates voisines, à deux ou trois semaines près. La raison de la différence est plutôt à rechercher du côté des accidents climatiques. Il arrive que les blés d'hiver gèlent ou soient noyés. Quand c'est le cas, l'agriculteur retourne le champ et recommence avec des céréales de printemps. La chose est donc difficile à prévoir ; seule l'observation directe d'un cliché peut permettre de déterminer si sa valeur informative est élevée ou non.

3) Les missions ne peuvent pas être considérées comme strictement indépendantes (coefficient de dépendance de 0,3 dans le cas étudié). L'apport de celles qui sont achetées en supplément est donc légèrement inférieur à ce que permet de prévoir un simple calcul de probabilité sur la base d'événements indépendants et aléatoires (figure 4).

4) L'information supplémentaire apportée par chaque mission diminue au fur et à mesure que le nombre de missions déjà exploitées augmente. La deuxième fait gagner 15% d'information, la troisième 12% et la quatrième 9% (tableau 4).

5) Mais la première mission ne révélant qu'un tiers de la limite considérée, on peut se demander comment procède habituellement le cartographe, dans un travail de routine, pour ne pas être obligé de parcourir

Pour simplifier les choses, on a considéré le seul cas où les missions sont utilisées dans leur ordre chronologique. Par ailleurs, le modèle est bâti et employé en supposant que chaque mission apporte la même quantité d'information. Ici nous avons pris, pour cette quantité, la valeur moyenne donnée par le tableau 3. On suppose donc qu'on voit, chaque fois, 34,63% de la longueur totale de la limite. Par tâtonnement, on trouve que le degré de dépendance entre les images (alpha) est à peu près de 0,3.

Avec 6 missions, on détecte autour de 83% de la limite. C'est ce qui est matérialisé sur la figure 3 où on a superposé les champs variables des 6 missions. On voit qu'ils permettent de découvrir, une grande partie de la limite.

## Discussion

L'exercice auquel nous nous sommes livrés amène à différentes conclusions :

presque tout le terrain. En fait, l'homme de l'art ne base pas ses tracés uniquement sur le suivi de la limite mais aussi sur la prévision du contenu des plages qu'il tente de séparer. C'est le problème que nous allons examiner maintenant.

## APPROCHE PAR LES CONTENUS

### Bases de la modélisation

#### 1) Principe

Nous allons utiliser une méthode assez voisine de celle employée dans la première partie. Plus précisément, on espère voir, en différents endroits du secteur étudié, des parcelles avec un sol nu, ce dernier étant alors directement identifiable par sa couleur (noir pour le marais, clair sinon). En utilisant plu-

sieurs missions, on aura des chances de multiplier ces sortes de fenêtres dans la couverture végétale pour percer la nature du support pédologique dans un maximum de positions.

Mais la mise en œuvre de ce principe n'est pas très simple. En effet, à l'œil, on observe trois types de parcelles dans la zone étudiée :

Les «champs variables» évoqués en première partie ; rappelez qu'ils sont nus et à cheval sur la limite du marais,

Les «champs blancs». Certains champs, ont une teinte claire. Nos observations de terrain montrent qu'il y a deux explications. Dans le premier cas, il s'agit d'un colza en fleur. On se trouve alors hors du marais. En effet, dans le marais, les colzas sont très rares et en retard de végétation. Dans le second cas possible, ces champs blancs correspondent à un terrain nu (semis de maïs) ou peu couvert par un blé ou par

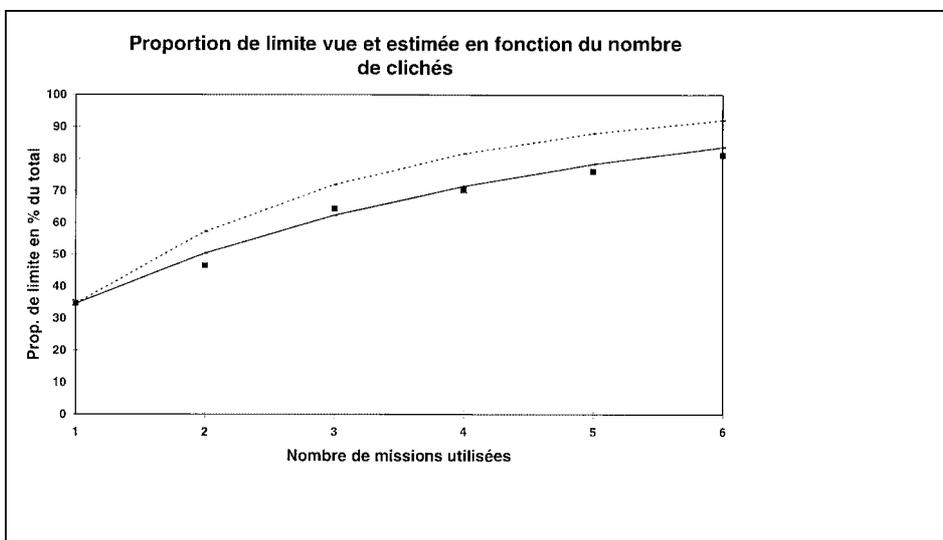
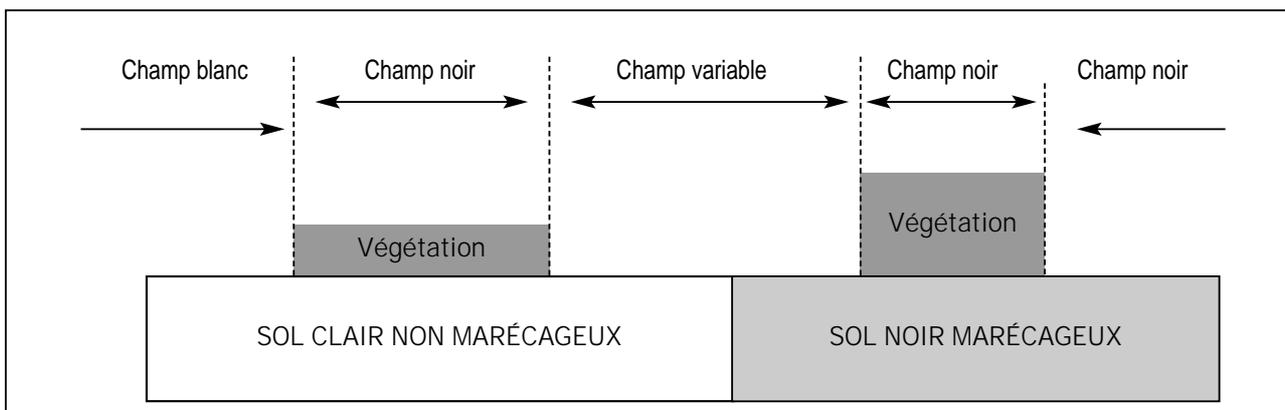


Figure 4 - Proportion de limite réellement vue (points), proportion de limite estimée par modélisation (courbe en trait plein) et proportion de limite qui serait vue si les clichés étaient parfaitement indépendants (pointillés).

Figure 4 - Percentage of boundary really seen (points), percentage estimated by the model (line) and percentage that would be seen if the photographs were statistically independent (dashed line).

Figure 5 - Les différents types de champs et leur relation avec les sols.

Figure 5 - Different kinds of fields in relation with soil and vegetation darkness.



une orge en cours de levée. On est alors aussi hors du marais puisque le sol nu est clair. Au total, dans un cas comme dans l'autre, on arrive à la même conclusion : il n'y a pas de marais à ces endroits. Malheureusement, ces champs blancs couvrent une faible proportion de la surface. Ils représentent donc une information sûre mais rare.

Les «champs noirs». De nombreux champs ont une teinte foncée. Ils couvrent plus de la moitié de la surface totale. Ils correspondent soit à une culture en pleine végétation (blé, orge) installée sur un sol quelconque, soit un semis (maïs) qui, installé dans le marais drainé, laisse voir la couleur sombre du sol. Contrairement au cas des champs blancs, il y a donc indétermination. En d'autres termes, le marais est noir quel que soit le stade végétatif des cultures maïs, inversement, toute la surface noire ne correspond pas au marais. Ainsi, la teinte sombre constitue-t-elle un indice utile, fréquent spatialement, mais peu fiable, de la présence du marais. Lui accorder trop d'importance revient à exagérer la surface occupée par cette unité. C'est ce flou dans la correspondance entre noir et marais que nous allons nous efforcer de réduire. La figure 5 résume la situation.

## 2) Remarques importantes

La division que nous avons introduite entre champs variables, champs blancs et champs noirs peu paraître trop simpliste et qualitative. Mais, il s'agit de rester dans l'esprit de la pratique ordinaire du cartographe. Celui-ci ne mesure pas le niveau de gris de ses clichés ! Pour chaque secteur de sa photographie, il prend des décisions de type oui/non, c'est-à-dire : ce secteur appartient-il, oui ou non, au marais ?

Un quatrième type de champs, les «champs autres» a été ajouté pour rendre compte du fait que certains secteurs, correspondant à des bois ou à des habitations, gardent la même occupation du sol d'une mission à l'autre. Pour nous, ils sont fort peu intéressants puisque ils nous délivrent toujours le même type d'information.

Le croisement, au moyen d'un SIG, de tous les champs sur toutes les missions amène à l'obtention de 946 polygones. Ces polygones sont traités ci-dessous en se référant essentiellement à la surface qu'ils couvrent lorsque qu'ils sont regroupés selon les catégories que nous avons définies. Au plan agronomique, certains sont des champs entiers, voire des groupes de champs. D'autres sont de simples planches de culture qui, sur une mission au moins, se distinguent de leurs voisines. D'autres enfin sont des polygones microscopiques et artificiels liés aux erreurs de superposition dans Arc/Info. Quoiqu'il en soit, leur nombre est grand et on peut appliquer les lois du calcul des probabilités sans trop de restrictions.

## Modélisation probabiliste

### a) Calcul pour un seul cliché

Soit  $P(M / N)$  la probabilité d'être dans le marais (M) si le champ est noir (N) ; c'est la valeur que l'on cherche à estimer ;

Soit  $P(N / M)$  la probabilité d'avoir un champ noir si on est dans le marais. D'après ce que nous avons dit cette probabilité vaut 1 ;

Soit  $P(M)$  la probabilité d'être dans le marais ; c'est la surface relative du marais dans le périmètre étudié, ceci à condition d'assimiler les fréquences aux probabilités, ce que nous ferons ci-dessous à plusieurs reprises ;

Soit  $P(\text{non}M)$  la probabilité d'être hors du marais ; c'est la surface de la partie hors marais en proportion de la surface totale étudiée.

Soit  $P(N / \text{non}M)$  la probabilité d'avoir un champ noir hors du marais ; c'est donc la proportion de champs noirs, hors du marais.

$$P(N/\text{non}M) = \frac{\text{Surface noire hors marais}}{\text{Surface hors marais}}$$

Dans ces conditions, la formule des probabilités totales (e.g. Ross, 1990, p 61) permet de calculer la probabilité pour qu'une surface noire corresponde effectivement au marais et non à une culture en pleine végétation :

$$P(M/N) = \frac{P(N/M) \cdot P(M)}{P(N/M) \cdot P(M) + P(N / \text{non}M) \cdot P(\text{non}M)}$$

qui se simplifie immédiatement en :

$$P(M/N) = \frac{P(M)}{P(M) + P(N / \text{non}M) \cdot P(\text{non}M)} \quad (2)$$

### b) Généralisation à plusieurs clichés

Si on utilise deux ou plusieurs missions, le problème se complique un peu. Il faut remplacer, dans la formule (2) la valeur  $P(N / \text{non}M)$  par la fréquence des surfaces qui, hors marais, restent toujours noires, donc couvertes de végétation quelle que soit la mission. Ces surfaces ne laissent donc pas voir qu'elles correspondent à un sol non marécageux. Appelons  $P(\text{tj}N / \text{non}M)$  ces surfaces toujours noires hors marais. La formule définitive est donc :

$$P(M/N) = \frac{P(M)}{P(M) + P(\text{tj}N / \text{non}M) \cdot P(\text{non}M)} \quad (3)$$

$P(\text{tj}N / \text{non}M)$  se calcule par un procédé strictement analogue à celui que nous avons vu en première partie (formule 1). On emploie donc une boucle au sein d'un programme informatique. L'itération porte sur l'expression suivante, présentée sur deux lignes :

$$P(\text{tj}N / \text{non}M) = P(\text{tj}N / \text{non}M) - (1 - \alpha) \cdot \{1 - P(N / \text{non}M)\} \cdot P(\text{tj}N / \text{non}M) \quad (4)$$

Dans cette formule  $\alpha$  représente, comme précédemment, le degré de liaison entre les clichés. Au départ, l'expression vaut la proportion moyenne de champs noirs

hors marais, puis elle diminue progressivement pour tendre vers zéro au fur et à mesure que le nombre de clichés augmente.

On trouvera en annexe un petit programme FORTRAN permettant de calculer (3) y compris (4).

### c) Validation logique de l'expression (3)

La formule (3), assez complexe en apparence, doit être validée par quelques tests logiques. Par exemple :

ζ Si  $P(N / \text{non}M) = 1$ , et si donc  $P(tjN / \text{non}M) = 1$  (revoir formule 4), autrement dit, si la zone hors marais est entièrement cultivée et en pleine végétation aux dates de prise de vue (pas de champs blancs), la formule devient :

$$P(M/N) = \frac{P(M)}{P(M) + P(\text{non}M)} = P(M) \quad (3)$$

autrement dit, tout le cliché est noir et la teinte n'apprend rien !

ζ Si le nombre de clichés  $n$  est très élevé,  $P(tjN / \text{non}M)$  tend vers zéro, alors  $P(M / N)$  tend vers 1 ; il n'y a plus d'erreur possible, la couleur noire révèle intégralement le marais.

ζ Si  $P(N / \text{non}M) = 0$  et donc si  $P(tjN / \text{non}M) = 0$  ; il n'y a pas de culture en pleine végétation autour du marais, cette zone est intégralement visible et claire, et donc la couleur noire révèle intégralement le marais et cette fois encore  $P(M / N) = 1$ .

ζ Si  $P(M) = 1$  ; autrement dit si le marais est présent partout,  $P(\text{non}M) = 0$  et donc  $P(M / N) = 1$ . On ne peut se tromper !

### d) Méthode de calcul simplifiée

Les personnes utilisant seulement une calculette peuvent éviter le calcul par itération lié à la formule (3). Il suffit alors d'employer l'expression approchée :

$$P(M/N) = \frac{P(M)}{P(M) + \{P(N / \text{non}M)\}^w \cdot P(\text{non}M)} \quad (2)$$

dans laquelle on a

$$W = \{n - (n-1) \times \alpha\} \quad (6)$$

où  $n$  est le nombre de missions et  $\alpha$  est, comme précédemment, le degré de liaison entre deux missions aériennes.

Utiliser cette expression revient à traiter le problème en considérant que les missions aériennes, au delà de la première, ne comptent plus à part entière. Par exemple, si  $n = 2$ , alors  $w = 1,7$ . Ainsi, nos 6 missions un peu corrélées apportent-elles une information qui équivaut à celle fournie par 4,5 missions qui seraient strictement indépendantes. On note au passage que si  $\alpha$  vaut 1, alors  $w = 1$  quelle que soit la valeur de  $n$  car il ne servirait à rien d'exploiter en même temps des clichés qui seraient strictement semblables !

Cette expression n'est qu'une approximation mais donne des résultats peu différents (à 1 ou 2% près) de l'approche rigoureuse uniquement parce que nous traitons, dans la pra-

tique, un faible nombre de missions. Il ne faut pas l'employer au delà de  $n = 7$  ou 8. Les résultats fournis dans le tableau 6 sont calculés en utilisant la formulation exacte (expression 3).

## Résultats

### a) Analyse des données brutes

Les tableaux 5a, 5b et 5c donnent toutes les valeurs expérimentales correspondant aux champs «Noirs», «Blancs», «Variables» et «Autres» pour chacune des missions, ceci dans le marais, hors du marais et, globalement, pour toute la zone étudiée. Les valeurs sont données en ha. Nous les présentons avec deux décimales, pour éviter de propager les erreurs dans les calculs qui suivent. Mais on verra plus loin que la précision est l'ordre de quelques ha seulement.

Dans les tableaux précédents, la colonne «Moyen.» représente la moyenne de la surface obtenue sur les 6 missions pour une teinte déterminée. La colonne «Cumul» représente la surface qui ne change jamais de teinte d'une mission à l'autre. Par exemple : 47,36 ha sont toujours restés noirs hors du marais.

La lecture attentive des tableaux 5 montre les difficultés de la démarche que nous avons entreprise.

Certes, les «champs autres» ont une surface assez stable d'une année sur l'autre (54 à 65 ha) ce qui est normal puisqu'il s'agit de bois, de rideaux d'arbres et de villages. Mais, on n'en retrouve que 42 ha par superposition (tableau 5a, ligne A, col. Cumul). Bien sûr, cette unité n'est pas strictement invariable : des bois peuvent disparaître et des maisons être bâties. Mais il faut aussi tenir compte de l'erreur de position géographique. Celle-ci intervient lorsque l'on superpose, dans Arc/Info, les limites tracées sur les différents clichés. Comme les plages en cause dans «champs autres» sont petites et dispersées, l'erreur sur les limites se traduit par une erreur relative importante sur les surfaces.

Par ailleurs, dans le marais, la surface toujours noire est de 261 ha (tableau 5b, ligne N, col. Cumul). Or, on aurait pu s'attendre à 424 ha, valeur qui représente la surface totale de cette unité puisque, d'après nos hypothèses, la couleur du marais est toujours noire qu'il y ait ou non de la végétation. Pour expliquer cela, on ne peut évoquer un problème de précision. En effet, le marais représente une grosse surface d'un seul tenant et le décalage des limites ne peut avoir beaucoup de poids sur l'erreur. En fait, l'observation de la figure 6, qui présente la surface toujours noire sur les six missions, permet de comprendre que cela est dû aux champs variables constituant le pourtour du marais. En effet, il ne faut pas oublier que la partie de ces champs, qui est dans le marais, est en fait toujours noire sans être comptabilisée dans la catégorie correspondante. Plus encore, un champ noir qui devient champ variable sur une mission ultérieure sert à amputer la surface toujours noire d'une manière un peu artificielle. Ainsi, le déficit de surface constaté

Tableau 5 - Résultats des observations portant sur la teinte des champs, sur les différentes missions. Avec N=noir, B=blanc, V=variable, A=Autres.

Table 5 - Results of the observations concerning the field darkness on the different aerial photographs. With : N = black, B = white, V = variable and A = others.

	1960	1968	1974	1980	1986	1990	Moyen.	Cumul
N	662,41	755,50	702,84	721,91	703,94	608,54	692,52	307,80
B	144,60	120,66	100,52	119,03	107,56	225,59	136,33	0,24
V	146,17	66,01	137,52	102,66	132,23	115,39	116,66	1,99
A	53,58	62,60	65,17	62,54	62,48	55,62	60,33	41,86

	1960	1968	1974	1980	1986	1990	Moyen.	Cumul
N	361,67	377,14	371,33	371,92	365,02	350,20	366,21	260,61
B	6,63	9,41	4,53	3,95	6,88	27,55	9,83	0,00
V	41,95	15,96	34,05	34,26	37,25	33,35	32,80	0,07
A	14,32	22,06	14,65	14,44	15,41	13,47	15,73	7,89

	1960	1968	1974	1980	1986	1990	Moyen.	Cumul
N	300,96	379,08	329,11	348,96	338,88	258,13	325,85	47,36
B	135,20	107,91	95,46	115,17	99,75	196,73	125,04	0,25
V	104,27	50,42	104,83	68,79	94,87	82,90	84,35	1,92
A	39,44	42,44	50,46	46,94	46,37	42,13	44,63	34,00

au niveau des champs toujours noirs ne signifie pas que notre approche manque de validité.

#### b) Application du modèle probabiliste

La surface du marais représente  $424,9/1006,15 = 42\%$  de la surface étudiée. Par ailleurs, d'après les chiffres obtenus,  $P(N / \text{nonM})$ , la probabilité de trouver un champ noir hors du marais lorsque l'on utilise un seul cliché vaut :

$$\frac{N \text{ extér.}}{\text{Surf. extérieure}} = \frac{325,85}{581,66} = 0,56$$

Enfin, nous adoptons, comme coefficient de dépendance entre les clichés, celui qui a été déterminé lors de l'étude sur les limites ( $\alpha = 0,3$ ).

Le tableau 6 présente alors les résultats de la modélisation avec 4 valeurs de  $P(N / \text{nonM})$ , la deuxième correspondant à ce que nous avons observé sur le terrain.

Par exemple, si la couverture du sol est limitée à 20% (deuxième colonne), la probabilité pour qu'une tache noire soit liée à la présence du marais est de 0,89 dès qu'on utilise deux clichés.

On peut vérifier ces valeurs, au moins dans un cas. En effet, en utilisant les tableaux 5, on sait calculer la probabilité

pour que les champs restés noirs sur les 6 missions appartiennent au marais. Elle correspond à 260,61 (tableau 5b, ligne N, col. Cumul) divisé par 307,80 (tableau 5a, ligne N, col. Cumul) soit : 0,85. Cette valeur n'est pas très éloignée de celle donnée par notre modèle dans le tableau ci-dessus (0,89). Rappelons en effet qu'on se situe dans le cas où  $P(N / \text{nonM})$  vaut 0,56. On tient donc là un élément précis de validation car alpha a été calculé sur les champs variables et non pas sur les champs noirs ou blancs. La validation ne met donc pas en cause les mesures ayant servi à la calibration du modèle.

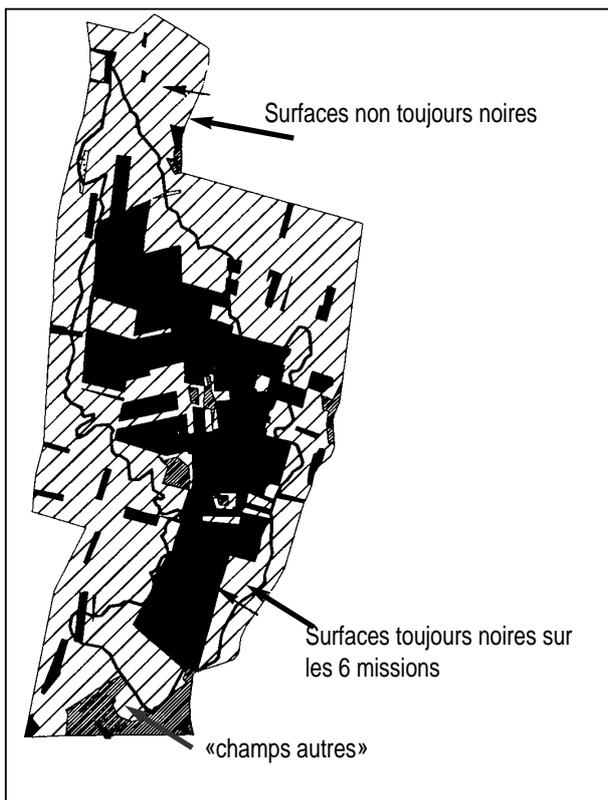
#### Discussion générale

La lecture des tableaux 4 et 6 montre que, dans la pratique quotidienne de son art, le cartographe utilise sa photographie aérienne comme un auxiliaire précieux mais au pouvoir informatif limité, surtout si elle est en noir et blanc. Dans le cas pris ici comme exemple, le cartographe voit, sur son cliché, 34,6% de la limite qu'il cherche. Il observe par ailleurs des taches sombres dont seulement 56% cachent un ou des marais (tableau 6). Il voit aussi des taches claires qu'il sait hors marais, mais celles-ci, après calculs, ne représentent que 14% de la surface qu'il doit étudier (tableau 5). C'est donc bien pour

combler le manque d'information que le cartographe va sur le terrain et on peut admettre que le temps qu'il passe à l'extérieur de son laboratoire est proportionnel au déficit d'information, c'est-à-dire à la quantité «100-34,6» dans l'exemple traité ici, si on se réfère aux limites.

Figure 6 - Représentation des champs qui restent noirs sur toutes les missions.

Figure 6 - Presentation of the fields that remain (or not) black on all the photographs.



Supposons maintenant que notre cartographe achète une seconde mission, avant de se rendre sur le terrain. Il va voir ainsi 15,8% de limites supplémentaires (tableau 4). Il peut alors espérer gagner :

$$\frac{15,8}{100 - 34,6} \times 100 = 24 \% \text{ de son temps normal de prospection.}$$

Le problème se ramène donc à l'interrogation suivante : est-il rentable d'acheter une seconde mission photographique pour économiser un quart ou un cinquième du temps de prospection ? Il est évident que la réponse dépend de toutes sortes de facteurs. En particulier, il n'est pas démontré que les photos aient la même valeur informative dans d'autres cas que le nôtre. D'après nos calculs, l'achat d'une deuxième mission serait utile dans les cas où la consommation de photographies n'est pas considérable (grandes échelles). Pour le vérifier, des cartographes de terrain pourraient tenter l'expérience, sinon sur tout un périmètre d'étude, du moins en quelques secteurs de celui-ci. Le problème que nous évoquons va d'ailleurs se poser avec un acuité qui augmentera au fil des années, c'est-à-dire au fur et à mesure du renchérissement de la main-d'œuvre et de la diminution du prix des biens de consommation.

Ce que nous avançons peut cependant être critiqué car les photographies aériennes apportent des informations autres que celles exploitées ici. En particulier, elles donnent la possibilité d'une vision stéréoscopique. Ceci est important. Il est évident, par exemple, que le marais est obligatoirement situé en fond de dépression. Les photos apportent aussi des informations liées à l'influence de l'homme. Par exemple, dans le marais, il y a des peupliers, des canaux, des traces de drainage mais pas d'habitations. Or, tout cela est déjà observable au moyen de la première mission et il n'est donc pas prouvé que la seconde apporte la proportion d'informations nouvelles que nous avons calculée. En conséquence, la rentabilité de son acquisition pourrait être moins bonne que prévue. Cependant,

Tableau 6 - Valeurs de P(M/N), c'est-à-dire probabilité pour qu'un champ restant noir sur plusieurs missions corresponde au marais.  
Table 6 - Values of P(M/N) i.e. probability to be in the marsh if the field remains black on several aerial photographs.

Nombre de missions	Valeurs de P(M / N) pour les 4 valeurs de P(N / nonM) qui suivent :			
	0,20	0,56	0,75	0,90
1	0,78	0,56	0,49	0,45
2	0,89	0,65	0,54	0,46
3	0,94	0,73	0,59	0,48
4	0,98	0,80	0,63	0,50
5	0,99	0,85	0,68	0,52
6	0,995	0,89	0,72	0,54

cela pourrait être compensé en achetant seulement, au niveau de la seconde mission, un cliché sur deux, la vision stéréoscopique étant déjà assurée par la première.

En général, il ne semble pas réaliste de chercher à utiliser plus de 2 deux missions, étant donné que la quantité d'information nouvellement apportée diminue à chaque fois que l'on considère une mission supplémentaire. Toutefois, on note que l'utilisation simultanée de 5 ou 6 missions c'est-à-dire de l'ensemble de ce qui est disponible, depuis les années 50, dans la plupart des pays développés, peut permettre de délimiter des objets (84% de la limite visible, 89% du contenu identifié) dans des situations où on ne veut pas se rendre sur le terrain, pour une raison ou pour une autre. C'est là une possibilité qui pourrait être exploitée dans certains cas très particuliers.

## CONCLUSION GENERALE

L'exercice auquel nous nous sommes livrés a permis de modéliser le gain de précision lié à l'utilisation simultanée de plusieurs missions photographiques aériennes, en cartographie des sols. Cela nous amène à prédire que les cartographes pourraient faire des économies de temps appréciables en utilisant conjointement deux missions aériennes. La modélisation peut sembler compliquée à certains égards, mais les programmes informatiques que nous avons établis sont d'un emploi fort simple (voir en annexe). Ils permettront au lecteur intéressé de refaire très facilement les calculs pour les adapter à un autre cas.

Nous pensons en effet que le travail réalisé est d'application très générale en cartographie même si, pour en simplifier l'exposé, nous nous sommes constamment référés au cas de la délimitation du marais de l'Orbe. Pour s'en rendre compte, il suffit de reprendre l'exposé de la question sous la forme : «Combien faut-il utiliser de clichés pour délimiter une plage cartographique dont les limites exactes sont occultées par des masques mobiles (champs en pleine végétation chlorophyllienne) dont la proportion est connue et dont l'occurrence précise est plus ou moins aléatoire ? On remarquera aussi que le problème inverse relève largement de la même démarche : «Quelle est la probabilité pour que les taches observées au sol relèvent bien du phénomène qui est étudié et présente une dynamique dans le temps et l'espace (salinité, battance, début de désertification, etc.) alors que l'on est en présence d'éléments perturbateurs d'occurrence fixe tels que affleurements marneux ou rocheux ?»

Au total, nous croyons que la démarche adoptée ici, convenablement adaptée, peut servir dans beaucoup d'études.

## ANNEXES

### Programmes informatiques en Fortran

Pour calculer la proportion de limite vue (première partie de l'article):

```
PROGRAM LIGNE
  PRINT *, ' PROPORTION DE LIMITE VUE ?'
  READ (*, '(F5.3)') prop
  PRINT *, ' NOMBRE DE PHOTOS TRAITEES ?'
  READ (*, '(I3)') nbre
  PRINT *, ' DEGRE DE DEPENDANCE ENTRE IMAGES ?'
  READ (*, '(F5.3)') alpha

  VU = prop
  DO i= 1,nbre
  IF (i.EQ.1) GOTO 2
  vu = vu + (1 - alpha) * prop * (1 - vu)
2  WRITE (*,*) vu
  END DO
  STOP
  END
```

Pour calculer la probabilité qu'une surface noire corresponde au marécage (seconde partie de l'article):

```
PROGRAM CONTENU
  PRINT *, ' surface des marais dans le paysage (fraction)?'
  READ (*, '(F5.3)') PM
  PRINT *, ' surface noire hors marais en moyen.(fraction) ?'
  READ (*, '(F5.3)') PNHM
  PRINT *, ' nombre de missions traitees ?'
  READ (*, '(I3)') nbre
  PRINT *, ' degre de dependance entre les missions (fraction) ?'
  READ (*, '(F5.3)') alpha

  PASVU = PNHM

  DO i= 1, nbre
  IF (i.EQ.1) GOTO 2
  PASVU = PASVU - (1.- alpha) * (1. - PNHM) * PASVU
2  PMSiN = PM/(PM + PASVU * (1. - PM))

  WRITE (*,*) 'PMSiN vaut', PMSiN*100., ' avec', i, ' missions'
  END DO

  STOP
  END
```

## BIBLIOGRAPHIE

- Green E.J., Strawderman W.E. and Airola T.M., 1993 - Assessing classification probabilities for thematic maps. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 59, n°5, pp 635-639.
- Skidmore A.K. and Turner B.J., 1988 - Forest Mapping Accuracies Are Improved using a Supervised Nonparametric Classifier with Spot Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol 54, n°10, pp 1415-1421.
- Skidmore A.K., 1989 - An Expert System Classifies Eucalyptus Forest Types Using Thematic Mapper Data and a Digital Terrain Model. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol 55, n°10, October, pp 1449-1464.
- Legros J.P., 1996 - *Cartographies des Sols*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 321 p.
- Ross S.M., 1990 - *Initiations aux probabilités*. 3ème édition, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 415 p.