

Modélisation hydrogéologique et cartographie du potentiel d'infiltration des sols par télédétection : région de Khurutshe, Botswana

J.F. DESPRATS¹, Ph. DUTARTRE², J.M. BARRAT², A. FAYE³

1. BRGM 1039, rue de Pinville, 34000 Montpellier, France.

2. BRGM, 1 avenue de Concyr, 45060 Orléans, France.

3. Université C.A. Diop, Département géologie, Dakar, Sénégal.

Résumé

Le potentiel d'infiltration des sols constitue un des paramètres essentiels intervenant dans les modèles hydrodynamiques décrivant le comportement des nappes. Classiquement, l'estimation de ce potentiel d'infiltration est basée sur la paramétrisation d'une cartographie pédologique des sols, mais celle-ci est souvent non disponible et serait beaucoup trop lourde à mettre en oeuvre en sus des campagnes de prospection hydrogéologique.

Dans ces circonstances, le BRGM a jugé essentiel de tester les possibilités offertes par la télédétection satellitaire. L'objectif est d'aboutir à une cartographie des états de surface des sols fondée sur des relations entre états de surfaces et potentiels d'infiltration. Le résultat est alors directement intégrable dans les processus de modélisation hydrogéologique.

La zone test choisie est située à 100 km au nord de Gaborone, où le BRGM était intervenu, à l'aide d'une campagne hydrogéologique complète, pour contribuer à l'approvisionnement en eau de la capitale du Botswana. Cette zone où l'archive hydrogéologique est importante (géophysique, géochimie, géologie structurale et nombreux forages) offre en outre l'avantage de présenter une couverture végétale faible et donc de montrer assez directement l'état minéral des sols.

L'approche par télédétection s'appuie sur une classification supervisée des images Landsat. Les résultats des classifications ont permis de préciser les interprétations des spatioscartes en terme d'états de surface ; les interprétations sont étalonnées sur le terrain afin d'établir une cartographie de leur potentiel d'infiltration (202 points de

contrôle). Les résultats cartographiques sont intégrées au modèle hydrodynamique MARTHE.

Pour estimer le potentiel de la cartographie par télédétection, la comparaison est faite avec un produit cartographique de référence établi par le modèle MARTHE calé sur une carte pédologique au 1/250 000 réalisée par la F.A.O. en 1988. Les comparaisons des résultats des simulations hydrodynamiques avec et sans télédétection montrent la grande similarité des performances tant au point de vue des valeurs d'infiltration que du point de vue de l'extension spatiale des unités de fonctionnement de la recharge.

Abstract

Soils percolation parameter is a major input for hydrodynamic models used to describe groundwater behaviour. This parameter is usually obtained from a soil map, but often this one does not exist and it would be long and expensive to elaborate it only for a hydrogeological study.

Remote sensing appears as a tool to map soils infiltration capabilities, based on the relationships between soil surface conditions and percolation. Results of this mapping phases can be integrated to the model.

Study area is 100 km north of Gaborone. Water resources are there important for the future supply of the capital. Former BRGM's studies with several tools like geophysics, geochemistry, structural geochemistry and drilling were done here. Vegetation is very limited in this semi desert area.

Remote sensing approach is based on Landsat TM images supervised classification. Results held to image interpretation for soils percolation capabilities, determined by 202 check points on the area. Mapping result were integrated in the MARTHE hydrodynamic model.

In order to validate remote sensing mapping, the results of the model were compared with the results of a former study which used F.A.O. soil mapping (1988), at scale 1:250,000. Results of hydrodynamic simulations are very similar. This prove the interest of remote sensing to estimate percolation parameter when soil mapping does not exist.

1. Description de la zone d'étude

Aperçu géographique

La zone d'étude du projet Khurutshe est située à 100 km au nord-est de Gaborone. Elle est traversée par la route et la voie ferrée reliant Gaborone à Francistown. Elle est couverte par les cartes topographiques à 1/50 000 2326C et D et 2426A et B.

Aperçu géologique

Cette région est couverte par des formations éoliennes d'épaisseur variable, et constituées de mélanges de loess, de sables et de dépôts alluviaux au pied des reliefs. Ces niveaux superficiels masquent les formations sous-jacentes des complexes du Karoo et du Waterberg.

Les cartes géologiques récentes (Mmamabula -QDS 2326D ; Williamson 1991, D. Bonijoly et Ph. Razin, 1993) montrent six niveaux lithologiques différents, constitués de sédiments lacustres, fluviaux et fluvio-deltaïques. Tous les sédiments sont métamorphisés. Seuls les niveaux inférieurs intéressent la zone d'étude ; la transition latérale avec le complexe de Karoo semble être contrôlée par des failles.

Le complexe du Waterberg formé de grès, silts et quartzites est intrudé par des dolérites et affecté par un ensemble de failles de directions NE-SW et E-W. Les formations du complexe du Karoo couvrent la partie ouest de la zone d'étude. Toute les séries du Karoo sont représentées dans cette zone en particulier la formation de Mmamabula représentative d'un milieu d'environnement fluvial et fluvio-deltaïque (grès, silts, charbon). Les formations du Thabala, Mosolotsane, Ntane montrent le début d'une sédimentation de type continentale. La formation volcanique de Ramoselwana est typique de la fracturation des milieux cratoniques en zone de rift. Des séquences épaisses de laves sont préservées dans des structures en graben fonctionnant pendant ou à la fin immédiate des éruptions.

Les formations du Kalahari sont composées de sables, graviers et plus rarement de marnes. L'épaisseur de ces niveaux (qui peut atteindre quelques dizaines de mètres) décroît de l'ouest vers l'est. Elles intéressent essentiellement la partie nord-ouest de la zone d'étude.

Aperçu pédologique

Une première cartographie des sols a été réalisée par la F.A.O. (1988), à l'échelle du 1/250 000. Trois grands types de sols y sont représentés :

- les arénosols ferralitiques : sols sableux, ferrugineux, non lessivés, filtrants ;
- les luvisols ferriques : sols ferrugineux tropicaux lessivés, filtrants ;
- les sols sur dépôts alluviaux, argileux, peu filtrants.

Les deux premiers types de sols couvrent 80 à 90 % de la zone d'étude. L'altération des minéraux est très poussée. Elle se manifeste par la libération de fer et le départ de la silice. La capacité d'échange est faible (inférieure à 20 m.e. par 100 g de terre), le taux de saturation est faible, et le pH est acide.

Les sols sur dépôts alluviaux sont de type AC (horizon humifère net sur matériau originel plus ou moins altéré). De par leur capacité de rétention en eau supérieure aux sols sableux, ces sols peuvent présenter un intérêt pour l'agriculture.

Aperçu hydrogéologique

Ce sont les formations du complexe du Karoo qui présente le meilleur potentiel de ressources en eau souterraine de la zone d'intérêt (Aqua Tech, 1990).

L'aquifère du complexe du Karoo

Sur la zone du projet, les principaux aquifères sont :

- les formations gréseuses de Ntane (principalement leur partie supérieure),
- les niveaux de grès feldspathiques de la formation de Mmamabula.

Ces deux aquifères sont séparés par une épaisse série sédimentaire (silts, carbonates, charbon). La fracturation verticale favorise probablement des relations latérales entre ces deux aquifères d'âge différent. Ils présentent tous deux des porosités primaires et secondaires liées à l'état de fracturation.

Ces deux principaux aquifères des formations du Karoo sont complétés au sein des formations de Ramoselwana (au sommet) et de Dukwi (à la base) par des aquifères qui peuvent présenter des intérêts significatifs.

L'aquifère de la formation du Waterberg

La présence d'eau au sein du Waterberg est intimement liée à l'état de fracturation ainsi qu'à la présence de filons de dolérites. L'aquifère est ainsi constitué de blocs à l'intérieur desquels la porosité primaire est probablement peu élevée (métamorphisme). C'est pourquoi l'implantation de forages doit tenir compte :

- de l'intensité de la fracturation,
- de l'organisation de ces fractures (intersection) et de leurs possibles rejeux récents,
- de la connexion des fractures avec de possibles appareils de concentration de la ressource en surface (paléo-réseau de drainage...).

Globalement, la qualité des eaux (salinité), la partition de l'aquifère en blocs liés à la tectonique, et la porosité primaire faible peuvent constituer de graves facteurs limitant à la mise en valeur de l'aquifère du Waterberg.

2. Données disponibles

2.1. Données satellitaires

La zone d'étude de Khurutshe est couverte à 80 % par une image Landsat TM 172/77 du 29/06/1993. Cette image est dépourvue de nuages et de bonne qualité radiométrique. Acquise en début d'hiver austral, l'emprise de la végétation est minimale. La savane herbacée est sèche, alors que seuls les arbres maintiennent une activité chlorophyllienne décelable sur les données satellitaires.

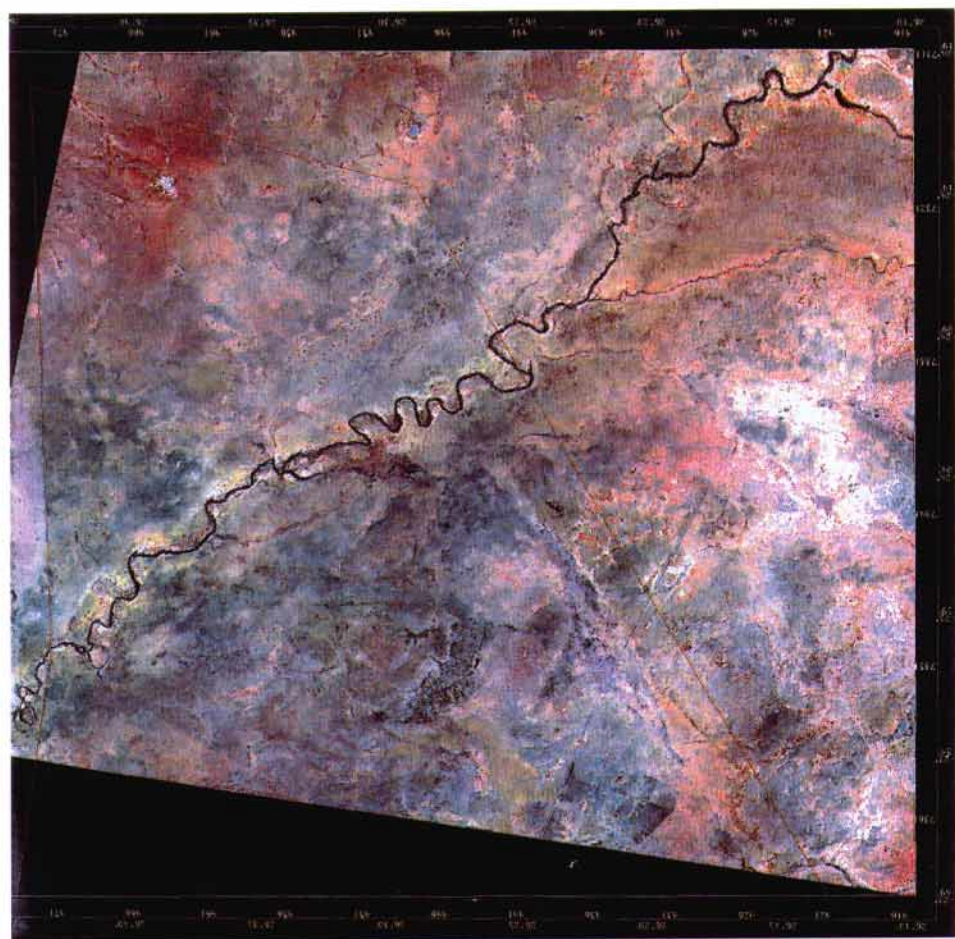


Planche 1. Botswana, composition colorée (p. 185).

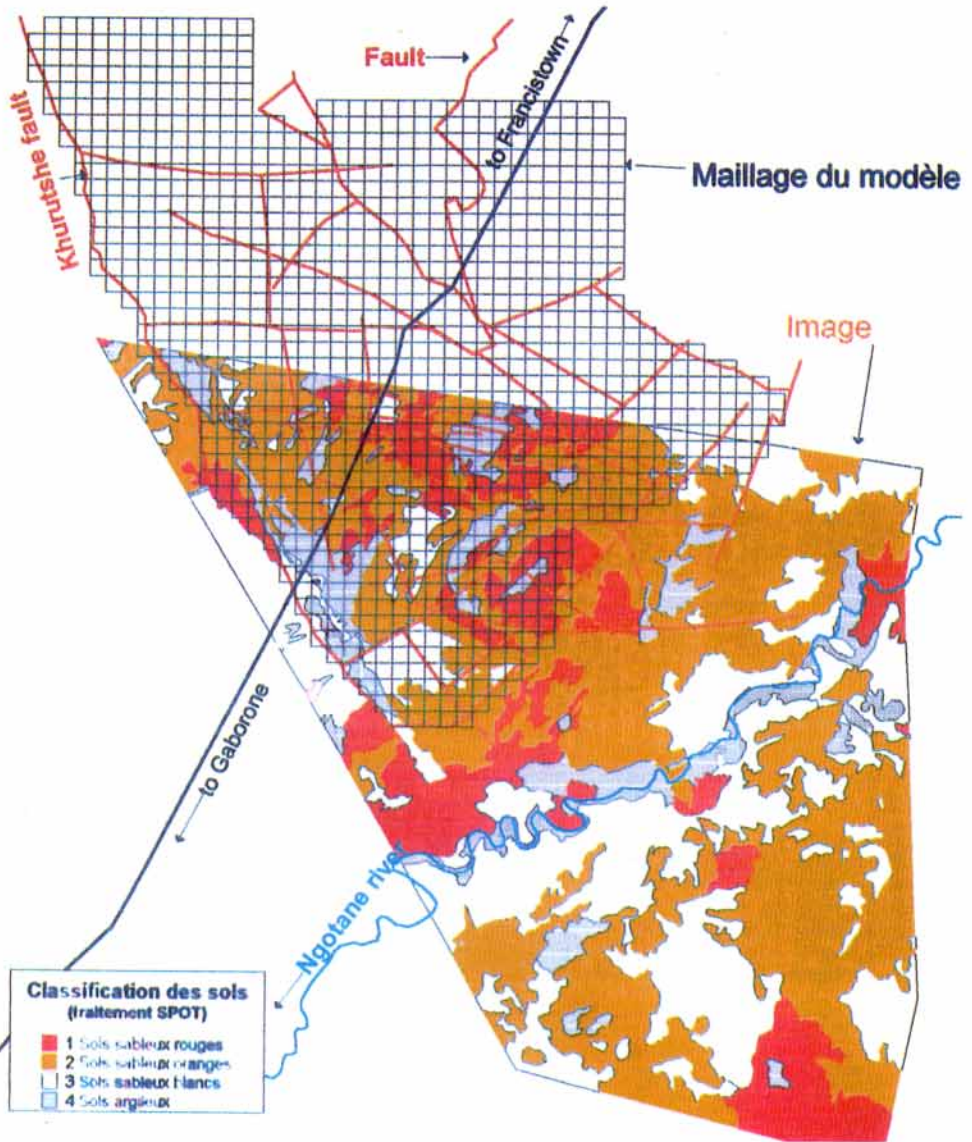


Planche 2. Discretisation des zones d'infiltration en intégrant la carte du potentiel d'infiltration des sols, réalisée par télédétection (p. 189).

L'utilisation des données cartographiques, qu'elles soient satellitaires ou exogènes, par les systèmes de traitement d'image et d'informations géographiques, passe par leur mise en conformité géométrique avec le système de référence cartographique du pays concerné : ici UTM zone 35. La correction géométrique de l'imagerie satellitaire est réalisée sur la base d'un modèle de déformation calculé à partir de points d'appuis saisis sur les coupures à 1/50 000. Dix points de contrôle communs à l'image Landsat et aux cartes topographiques ont été identifiés. Ils sont répartis de manière assez homogène sur l'ensemble de la zone. Un modèle de déformation établi sur la base d'une loi polynomiale d'ordre 1 permet la correction des 7 canaux de l'image avec une erreur quadratique moyenne de 1,5 pixels, soit 45 mètres.

L'image géocodée couvrant la zone étendue de Khurutshe est restituée à l'échelle du 1/100 000 (Planche 1).

2.2 Données thématiques

Deux documents cartographiques sont disponibles :

- une carte pédologique F.A.O. de l'ensemble de la région à 1/250 000,
- une carte géologique détaillée à 1/125 000 (Ph. RAZIN, D. BONJOLY 1993), appuyée sur des travaux de levés de terrain, les données des nombreux forages de reconnaissance hydrogéologique (S. PUYOO, F. BALLIN) et une prospection géophysique détaillée multi-méthodes (Ch. VACHETTE, F. MATHIEU)

Ces documents sont intégrés à la base de données numériques et intégrés au système d'informations géographiques (SIG ARC/INFO), chaque contour polygonal géoréférencé étant associé à des labels permettant de qualifier leur contenu.

3. Approche méthodologique

La cartographie des états de surface est basée sur l'interprétation visuelle des spatio-cartes appuyée sur les résultats d'une classification supervisée et calée sur les résultats des travaux de terrain : observations des sols, analyses de terre, observations de la végétation.

La classification supervisée d'image est un outil de cartographie adapté des unités de paysage homogènes. Cependant, il reste à vérifier que la classification, supervisée par le choix de parcelles d'entraînement, est bien représentative de l'état de surface des sols et non pas de leur type d'occupation ou d'utilisation. C'est pourquoi la démarche de classification est menée en parallèle à une démarche d'interprétation visuelle.

Le premier élément à vérifier dans une démarche de cartographie des sols est l'influence de la couverture végétale dans la radiométrie globale des sols. Le choix des parcelles d'entraînement est fonction de ce critère qu'il convient de minimiser. L'indice

de végétation est calculé sur une surface de plus de deux hectares (25 pixels Landsat) autour des points contrôlés et géoréférencés sur le terrain. Il fait apparaître le rôle mineur de la végétation au moment de l'acquisition de l'image. Les 202 points ont un indice de végétation inférieur à 0,15 avec cependant un léger « gradient végétation » lié au bush, allant croissant du nord-ouest de la zone vers le sud-est.

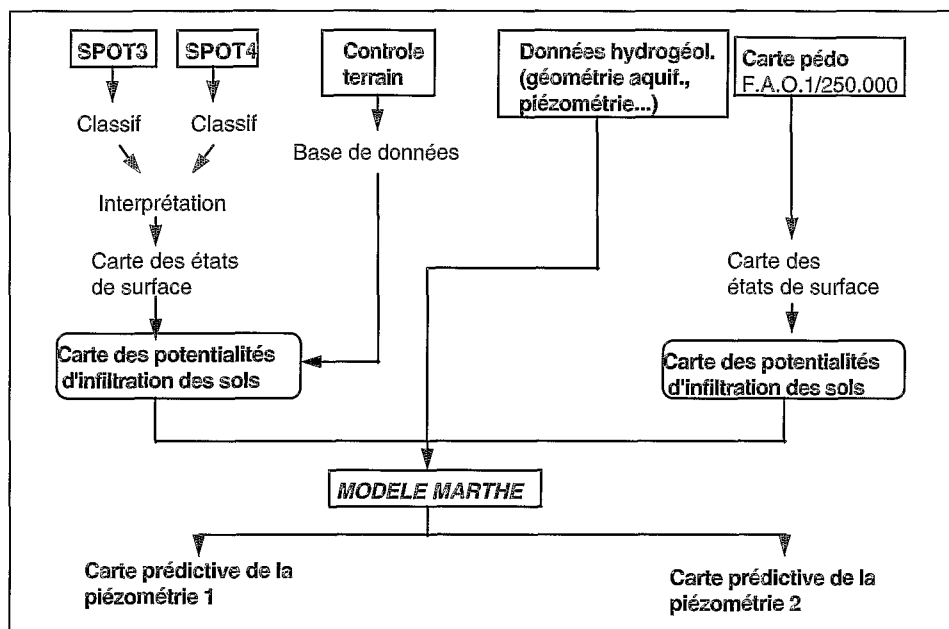


Figure 1. Méthodologie suivie.

Une base de données cartographique sur les observations faites sur le terrain est constituée à partir des 202 points d'observation géoréférencés en UTM à l'aide d'un GPS de type Magellan NAV 1000 PRO. La précision globale des mesures en mode deux dimensions est de 25 mètres (résolution spatiale compatible avec celle des données Landsat utilisées ici).

Pour chaque station sont relevées les caractéristiques principales des sols (des prélèvements pour analyse étant fait pour les plus représentatives), de la végétation spontanée et des cultures :

- la localisation du point en coordonnées UTM (x,y) ;
- les valeurs des moyennes radiométriques et des écarts type calculées sur les canaux PIR, MIR, Rouge et Vert sur une surface de 2,2 hectares autour du point d'observation,
- l'indice de végétation sur cette même surface ;
- les observations relatives à la végétation (strates arborée, arbustive et herbacée).

Les résultats de la phase cartographique sont finalement intégrés dans la procédure de la modélisation de recharge des systèmes aquifères. Les cartes prédictives de la piézométrie issues du modèle sont comparées à la carte piézométrique issue du modèle initial intégrant les données F.A.O. à 1/250 000.

4. Cartographie des états de surface

Les résultats des classifications sont utilisés pour optimiser les interprétations des états de surface réalisées sur les compositions colorées optimales, c'est à dire combinant les canaux vert, proche infrarouge et moyen infrarouge. Les interprétations sont finalement présentées sous forme de cartes des sols sur la base des relations entre états de surface et potentiel d'infiltration, et cela suite au calage et à la reconnaissance sur le terrain

4.1. Classification

La classification est réalisée conjointement à l'interprétation visuelle des données satellitaires. Elle se base sur la connaissance des sols acquise lors de la mission terrain. Cette connaissance amène à la définition de 4 types de sols correspondant à 5 classes radiométriquement différentes. Elles correspondent sur l'image matérialisée par la composition colorée PIR en rouge, MIR en vert, vert en bleu aux :

- surfaces liées à des sols rouges sableux filtrants : vert foncé (1) ;
- surfaces liées à des sols orangés sableux filtrants sans végétation : vert cru (2), ou couverts d'un peu de végétation : rose-rouge (3) ;
- sols sableux très clairs et filtrants : blanchâtre (4) ;
- sols assez argileux et humiques, compactés, plutôt ruisselants : bleu gris (5).

Une sélection de zones représentatives de ces 5 classes constituent des parcelles d'entraînement à partir desquelles vont être extraites les statistiques qui permettront ensuite la classification selon l'algorithme du maximum de vraisemblance de la totalité de l'image.

Bien que ces 5 types d'état de surface soient radiométriquement différents, de nombreuses confusions apparaissent dans la classification.

4.2 Photo-interprétation de l'image SPOT4

L'interprétation visuelle est réalisée sur la composition colorée de qualité optimale, c'est à dire celle combinant les canaux Vert, Proche Infrarouge et Moyen Infrarouge. Une analyse en composantes principales montre que ces trois canaux exploitent à eux seuls 95 % de la variance exprimée. Le nombre de classes de sols interprétées est alors limité à 4.

- les surfaces correspondant aux sols rouges sableux filtrants (vert foncé sur l'image) ;
- les surfaces correspondant aux sols orangés sableux filtrants (vert cru ou rose-rouge sur l'image) ;
- les sols sableux très clairs et filtrants (blanc sur l'image) ;
- les sols assez argileux et humiques, compactés, plutôt ruisselants (bleuâtres sur l'image).

L'interprétation se base sur la traduction de la radiométrie telle qu'elle est exprimée sur la composition colorée, mais aussi sur les résultats de la classification et sur les résultats de l'enquête terrain, analyses de sol comprises.

Les sols ruisselants se retrouvent dans les vallées et les dépressions ; il s'agit de sols compactés dont les teneurs en argile et en humus sont élevées. Les sols filtrants ferralitiques sont beaucoup plus communs. Leur différenciation spectrale tient à la teneur en fer qui rend ces sols ferrugineux plus ou moins ocre rouge.

La cartographie du potentiel d'infiltration des sols réalisée est avant intégration dans le modèle comparable à la carte F.A.O. 1/250 000. Elle est cependant plus précise, bien que ce surplus de précision ne soit pas réellement nécessaire pour le type de modélisation envisagé, avec un maillage de 500 mètres de coté.

5. Intégration de la carte du potentiel d'infiltration des sols dans le modèle de recharge des nappes

5.1. Objectif et données existantes

L'objectif recherché dans ce projet est l'obtention d'une meilleure discrimination de la capacité d'infiltration des sols en corrélation avec les données hydrogéologiques.

La zone de Mmamabula a fait l'objet d'une modélisation hydrodynamique des écoulements souterrains. Cette modélisation représente la synthèse de nombreuses études de terrain (géologie, structurale, photo-interprétation, géophysique, forages de reconnaissance, tests de pompage, tests d'infiltration).

L'objectif de cette modélisation était :

- d'évaluer les ressources en eaux souterraines exploitables dans cette région en vue de l'alimentation en eau potable de la ville de Gaborone,
- de simuler différents scénarios d'exploitation des aquifères sur 25 ans.

L'outil de modélisation utilisé a été le code de calcul par différences finies MARTHE du BRGM. Ce modèle permet de simuler les écoulements souterrains d'un fluide en milieu poreux, anisotrope, à travers des aquifères libres ou captifs et des épontes semi-perméables, en régime permanent ou transitoire. Toutes les données existantes ou interpolées ont été discrétisées dans des mailles carrées de 500 mètres de côté pour la géométrie du système modélisé (cotes du sol, du toit et du mur de chaque aquifère) et pour les paramètres hydrodynamiques (perméabilité, emmagasinement, charge piézométrique, débit de prélèvement, débit d'infiltration). Après la construction

du modèle, celui-ci est ensuite « calé », c'est à dire que certains paramètres sont ajustés de façon à pouvoir restituer la piézométrie mesurée à partir des données d'entrée du modèle. Lorsque le calage est jugé satisfaisant, le modèle mathématique ainsi construit est ensuite utilisé pour simuler différents schémas d'exploitation des eaux souterraines.

Un des paramètres très important dans la modélisation hydrodynamique est celui de la recharge des nappes. Ce paramètre étudié sur 2 stations test a été discrétisé sur l'ensemble de la zone modélisée en distinguant quatre zones distinctes où ce paramètre a été affecté de valeurs différentes. Cette zonation avait été basée sur l'expérience de terrain de l'hydrogéologue en charge du projet qui a séjourné deux années sur le site ; elle incluait de manière subjective la nature des terrains, le couvert végétal et la géomorphologie. Les valeurs d'infiltration proprement dites pour chaque zone ont été obtenues de manière empirique lors du calage du modèle, en s'appuyant sur les expériences de terrain.

La carte d'infiltration des sols obtenues par télédétection, complétée par un échantillonnage sur 200 stations sur le terrain vient dans le modèle se substituer à la zonation présentée précédemment (Planche 2).

La carte ainsi obtenue a permis de différencier des sols avec un degré de précision bien supérieur à ce qui était nécessaire pour l'étude hydrogéologique où le maillage unitaire du modèle couvre une surface de 1 km².

5.2. Simulations effectuées

La zonation des sols obtenu par interprétation de l'image a été discrétisée selon le maillage du modèle hydrodynamique avec quatre zones pour représenter le pouvoir filtrant des sols.

Malheureusement, l'image ne recouvre que partiellement la zone modélisée. Pour faire tourner le modèle sur la même base, on a pris en compte la zone non couverte d'origine du modèle bien qu'elle soit basée sur d'autres critères. Puis à chaque zone, une valeur d'infiltration a été affectée.

Le calage d'un modèle hydrodynamique est toujours un compromis entre une distribution de paramètres interdépendants tels la perméabilité de l'aquifère et le débit d'infiltration pour reproduire la hauteur d'eau dans l'aquifère. Ce compromis est souvent fastidieux à obtenir, aussi les simulations opérées lors de ce travail ont été faites à partir des mêmes valeurs de paramètres obtenues lors de la phase de calage du modèle hydrodynamique : ainsi la distribution des valeurs de perméabilité n'a pas été modifiée ; seules les valeurs d'infiltration par zone ont fait l'objet de test de sensibilité.

5.3. Résultats obtenus

La répartition des sols issue de l'interprétation de l'image est quelque peu différente de la répartition des zones d'infiltration déterminée initialement lors de la construction du modèle hydrodynamique.

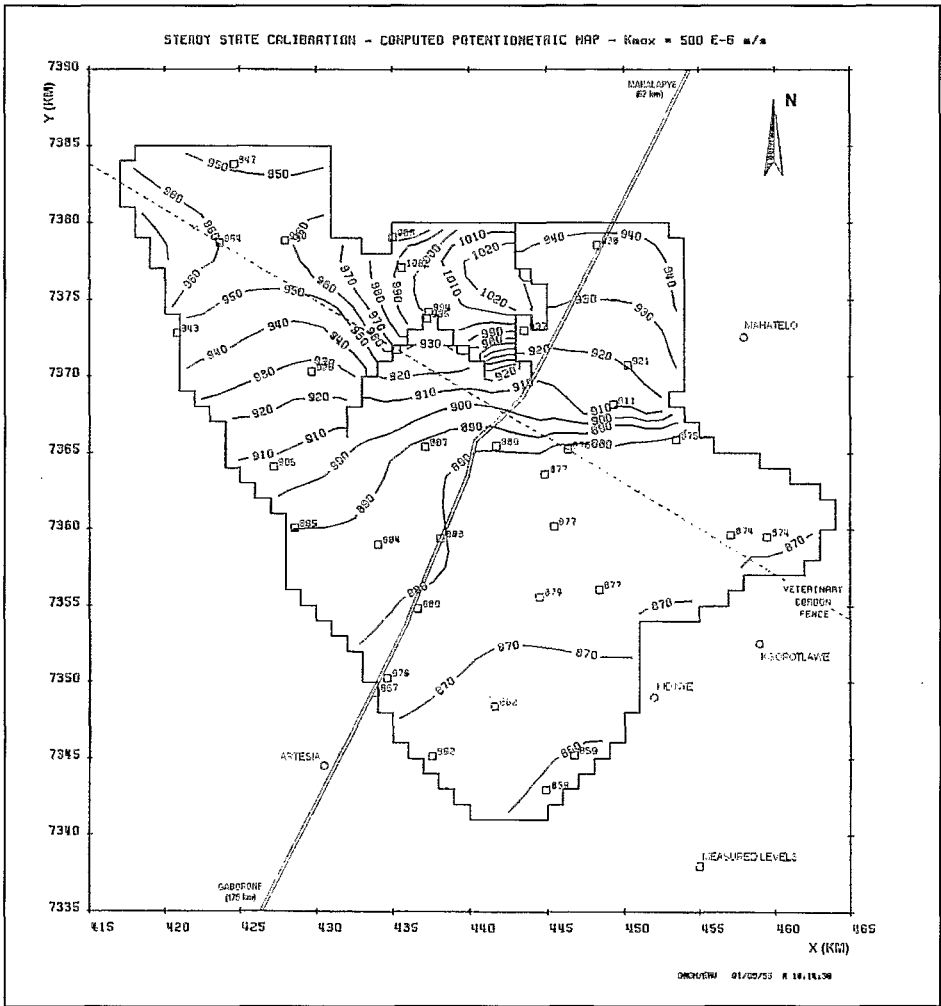


Figure 2. Carte piézométrique simulée lors du calage du modèle. Etat de référence (intégration de la carte F.A.O.).

Cependant, la comparaison des résultats (cartes piézométriques simulées avec les 4 zones définies lors du calage puis avec les 4 zones définies avec l'image) ne met pas en évidence de différence significativement notable (Fig. 2 et 3) en adoptant la zonation déterminée d'après l'interprétation de l'image. Dans cette simulation, les mêmes valeurs d'infiltration ont été affectées aux 4 zones définies lors de la modélisation et aux 4 zones définies d'après l'image.

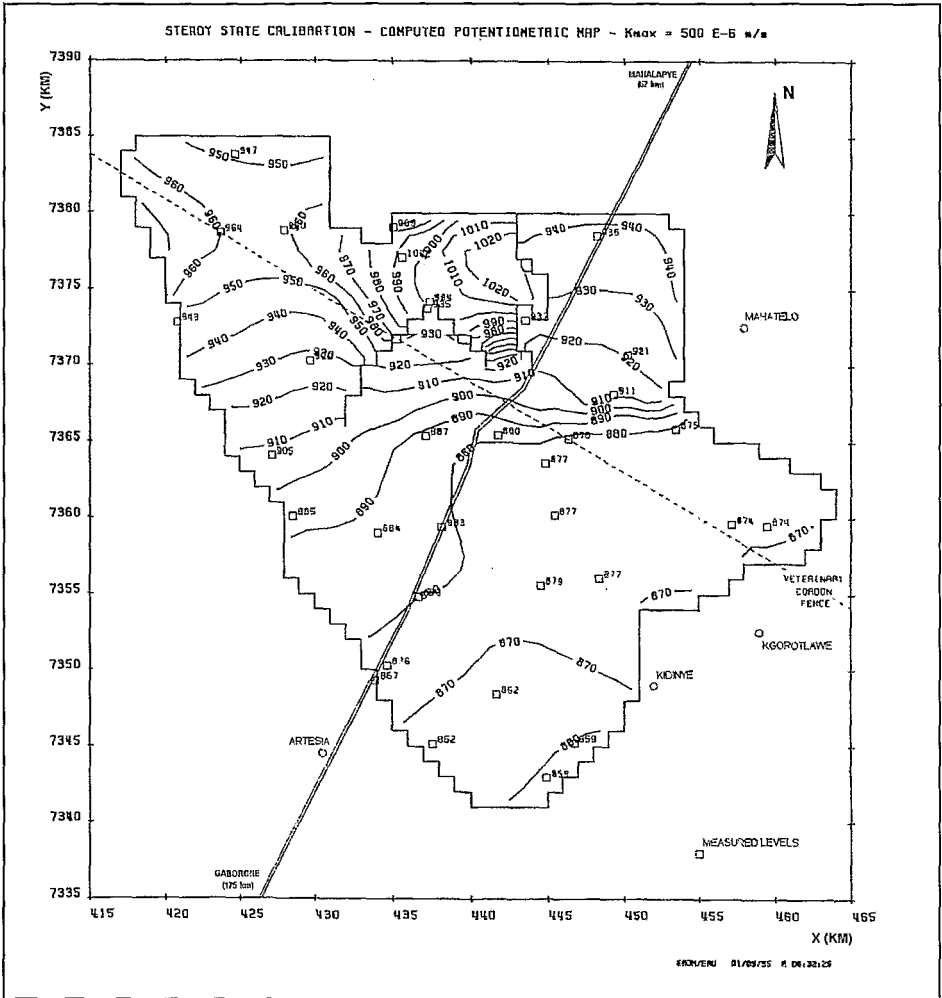


Figure 3. Carte piézométrique simulée lors du calage du modèle (intégration des résultats de télédétection).

Cette phase de modélisation n'a malheureusement pu être réalisée que sur une partie du modèle initial, et la zone couverte par l'image Landsat se trouve correspondre à la partie de l'aquifère qui possède les plus fortes valeurs de perméabilité, ce qui a pour conséquence d'atténuer les hétérogénéités des valeurs d'infiltration. La zone Nord du modèle est quant à elle très sensible aux variations d'infiltration car les perméabilités de l'aquifère peuvent être jusqu'à 500 fois plus faibles que dans la zone Sud.

L'infiltration dans les sols conduisant à la recharge des aquifères n'est pas liée uniquement à la perméabilité des sols en surface, même sous climat semi-aride ou aride. Un autre facteur déterminant est celui de la morphologie.

Conclusion

Dans le cadre d'une étude hydrogéologique visant à estimer les potentialités de recharge d'un aquifère, la télédétection apporte deux types d'informations complémentaires : des informations structurales qui conduisent à l'identification des grandes failles susceptibles de favoriser le drainage de l'eau infiltrée puis son stockage, et des informations sur les états de surface qui permettent d'approcher la cartographie des sols. Ces derniers qui favorisent plus ou moins l'infiltration des eaux de surface constituent des paramètres essentiels à prendre en compte dans la décision d'implantation de forages qui doivent fournir de manière pérenne, des débits suffisants.

Le résultat de la phase cartographique intégré dans une étude hydrogéologique démontre l'intérêt de cette approche rapide et peu coûteuse. Le modèle hydrodynamique substitue sans différence finale remarquable la cartographie obtenue par télédétection à une carte F.A.O. au 1/250 000. La rapidité de mise en oeuvre, la capacité de spatialisation et la nécessité d'un contrôle de terrain limité rendent cette approche très intéressante dès lors qu'il n'existe pas de cartographie des sols suffisamment précise. Or la cartographie pédologique, si elle est globale aux petites échelles (1/4 000 000, 1/1 000 000), n'existe que rarement à des échelles plus grandes répondant aux besoins de précision d'un modèle hydrodynamique.

Remerciements

Cet article est la publication scientifique BRGM n° 95016. Cette étude a pu être réalisée grâce au support financier de la Direction de la Recherche du BRGM et a bénéficié d'un cofinancement par le programme SPOT4/MIR du CNES.

Bibliographie

- BARRAT J.M., BARTHELEMY Y., PUYOO S. (1993). « Evaluation of groundwater resources investigation. Phase II - Khurutshe area », Rapport BRGM N0162.
- DELPONT G., DESPRATS J.F., GIRAULT (1993). « Apport du canal MIR (1.55-1.75 μ m) à la cartographie géologique en milieu couvert : exemple de la région d'Elven, Bretagne, France », *Géologie de France*.
- DESPRATS J.F., DUTARTRE Ph. (1993). « Régionalisation par télédétection des mesures pour l'évaluation des ressources en eau souterraine », Rapport BRGM R37922.
- DUTARTRE Ph., POINTET T. (1988). « Utilisation de l'imagerie satellitaire SPOT pour la prospection hydrogéologique en milieux fissurés », Rapport BRGM88 DT 040 TED
- JOSHUA W.D. (1991). « Physical properties of the soils of Botswana », F.A.O., UNDP project. Field document 33. Soil mapping and Advisory Services.

- ROGNON P. (1994). « Les conséquences de la sécheresse sur la pédogénèse », *Sécheresse*, septembre 1994.
- SMITH R.A. (1984). « The lithostratigraphy of the Karoo Supergroup in Botswana », Bulletin 26, Department of Geological Survey.
- TIMBERLAKE J. (1980). Vegetation map of South-East Botswana. Ministry of Agriculture
- WIJNEN, MILVILLE F., THIERY D., VAUBOURG P. (1993). « Evaluation of ground water resources. Mmamabula groundwater investigation - phase 2. Kurutshe area », Republic of Botswana. Inception Report BRGM.
- WILLIAMSON L.T., in press. « The geology of the area Mmamabula and Dibete including an account of the greater Mmamabula coal field. An explanation of GDS 2326D, 2326C and part 2327C », District memoir. Department of Geological Survey.