

# APPORT DE L'IMAGERIE SATELLITAIRE POUR LA RECHERCHE DE DRAINAGES SUPERFICIELS DANS LES AIRES D'ALIMENTATION DE CAPTAGE (AAC) : UNE ANALYSE QUALITATIVE

Sébastien Rucquoi<sup>1</sup>, Christelle Bosc<sup>1</sup>, El Bachir Araqui<sup>1</sup>, Michael Savinaud<sup>2</sup>, Jonathan Guinet<sup>2</sup>, Rosa Ruiloba<sup>2</sup>

1 : Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (CEREMA), Toulouse, France, sebastien.rucquoi@cerema.fr

2 : CS Communication & Systèmes, Toulouse, France

## Résumé

La loi sur l'eau et les milieux aquatiques de décembre 2006 a renforcé les dispositifs existants de lutte contre les pollutions diffuses d'origine agricole en créant des « zones de protection des Aires d'Alimentation de Captage (AAC) » d'eau potable, avec comme principal objectif de préserver ou de restaurer la qualité des ressources en eau. L'objectif de cet article est d'évaluer l'apport de l'imagerie satellitaire pour la caractérisation de ces aires à partir d'un panorama de méthodes d'extraction d'indices de drainages superficiels, d'origine naturelle et artificielle, ainsi que de tests méthodologiques. En effet, la connaissance précise des réseaux de drainage susceptibles de transporter des pollutions constitue l'un des éléments déterminant pour qualifier le captage et son environnement.

L'évaluation s'est basée sur une étude documentaire portant sur la recherche de surfaces drainées en fonction de leurs caractéristiques intrinsèques (morphométrie, radiométrie, ...). Des traitements et mises en application des méthodes ont par ailleurs été effectués sur des images tri-stéréoscopiques Pléiades (mai 2012) ainsi que sur des images Spot 5 et le Modèle Numérique de Surface (MNS) associé (juin 2006).

Les résultats de l'étude indiquent que la technologie satellitaire constitue un puissant outil pour la détection automatique et la modélisation de certains réseaux de drainage, tels que les chevelus hydrographiques, les dépressions topographiques (dolines par exemple) et les éléments linaires (discontinuités géologiques et réseaux artificiels). Pour d'autres indices de drainage, tels que les sous-écoulements dans les horizons superficiels des sols, l'imagerie satellitaire à très haute résolution offre la possibilité de détecter ces éléments par photo-interprétation. Bien que dans ce cas les traitements automatiques paraissent difficiles, la télédétection reste pertinente au regard de la prise de hauteur, du large champ d'observation et de la richesse spectrale des images satellites. Pour les utilisateurs, l'usage de la télédétection peut faciliter la caractérisation des AAC, aussi bien à l'amont des études de vulnérabilité, en permettant de pré-dimensionner le bassin à analyser, qu'au stade du diagnostic, en permettant de rechercher avec précision le cheminement des eaux superficielles et le potentiel d'infiltration à la surface du sol.

**Mots-clés :** captage, indices, drainage, MNT / MNS, réseau hydrographique, doline, extraction automatique, photo-interprétation, radiométrie, morphologie, image satellite, Pléiades

## Abstract

*The law on water and aquatic environments voted in December 2006 strengthened existing pollution control devices against diffuse agricultural pollution by creating « protected water catchment areas (AAC in french) » for drinking water. Its main objective is to preserve or restore the quality of water resources. The objective of this article is to assess the contribution of satellite imagery for the characterization of these areas from a panorama for natural and artificial surface drainage detection methods and some methodological tests. Indeed, the precise knowledge of drainages capable of transporting pollution is a key element to qualify the catchment and its environment.*

*The evaluation is based on a documentary review on drained surfaces according to their inherent characteristics (morphometry, radiometry, ...). Treatments and application of identified methods have also been carried out on tri-stereoscopic Pleiades images (May 2012) and on SPOT 5 images with the associated Digital Surface Model (June 2006).*

*The results of the study indicate that satellite technology is a powerful tool for automatic detection and modeling of some drainage networks, such as hydrographic system, topographic depressions (sinkholes for example) or some linear elements (geological discontinuities and artificial networks). For other drainage indices, such as sub-flows in surface soil horizons, satellite imagery at high resolution allow the detection of these elements by photo-interpretation. Although in this case the automatic processes seem difficult, remote sensing remains relevant in view of shooting conditions, coverage scale and spectral quality of satellite images. For end users, the use of remote sensing can help to characterize AAC, both upstream in vulnerability studies, to pre-size the watersheds to analyze, and downstream in diagnosis, to look precisely the flow of superficial water and the potential infiltration at the soil surface.*

**Keywords:** capture, indices, drainage, DEM, hydrographic system, sinkhole, automatic extraction, photo-interpretation, radiometry, morphology, satellite image, Pléiades

## 1. Introduction

En réponse aux demandes de la directive cadre européenne sur l'eau, la loi sur l'eau et des milieux aquatiques de décembre 2006 a renforcé les dispositifs existants de lutte contre les pollutions diffuses d'origine agricole en créant des « zones de protection des Aires d'Alimentation de Captage (AAC) » d'eau potable.

La délimitation des bassins à protéger s'effectue actuellement suivant différentes méthodes développées par le BRGM et ANTEA-GINGER-CALLIGEE qui reposent essentiellement sur la mise en relation d'informations spatialisées de nature morphologique, géologique, hydrographique et hydrologique, archivées ou acquises *in situ*. Dans ce cadre, la connaissance précise du cheminement des eaux superficielles constitue un élément déterminant pour caractériser le captage et son environnement.

L'étude de ces écoulements au travers des méthodes traditionnelles peut s'avérer coûteuse suivant les caractéristiques du milieu local et la disponibilité des informations. Le recours à l'imagerie satellitaire à haute et très haute résolution spatiale est présenté dans cet article comme une méthode alternative pour la recherche d'indices de drainage superficiel.

Les drainages superficiels correspondent aux chenaux préférentiels de circulation des eaux à la surface du sol et dans les sols constituant l'épiderme, autrement dit à la sub-surface. Ces axes d'écoulement sont déterminés entre autre par le relief, par les débits d'alimentation en eau, par le couvert végétal et par les caractéristiques des sols conditionnant le potentiel d'infiltration et les conditions de circulation des eaux.

Au vu des résolutions actuelles des images satellites et notamment des images Pléiades, certains de ces éléments de drainage sont identifiables par télédétection.

L'objectif de l'article est d'évaluer les possibilités d'extraction des éléments drainants suivants :

- Axes d'écoulement des eaux en surface (réseau hydrographique) ;
- Chenaux de drainage dans les horizons superficiels du sol (écoulement hypodermique ou « sous-écoulements ») ;
- Points naturels d'infiltration des eaux en surface (dépressions karstiques de type doline par exemple) ;
- Discontinuités naturelles des massifs géologiques (failles, contacts entre formations géologiques, ...)
- Drainage artificiel des eaux de surface (fossés routiers ou agricoles, drain enterré, ...).

Pour chacun de ces éléments, un panorama de méthodes d'extraction d'une part et une évaluation de leur pertinence vis-à-vis de la problématique des AAC d'autre part sont présentés.

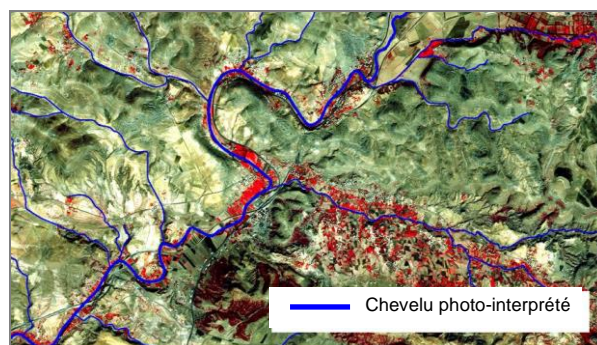
## 2. Méthodes d'extraction

### 2.1 Les réseaux hydrographiques

Les thalwegs, constituant des axes naturels de convergence des eaux de ruissellement, sont organisés en une structure arborescente plus ou moins dense suivant le milieu local et l'échelle d'observation. Ces axes forment soit des drains en eau (réseau actif / réel), soit des drains secs (réseau potentiel).

Les réseaux d'écoulement superficiels peuvent être extraits à partir d'images satellites, en utilisant des critères radiométriques, et/ou à partir de modèles numériques de terrain ou de surface (MNS / MNT), en utilisant des critères morphologiques :

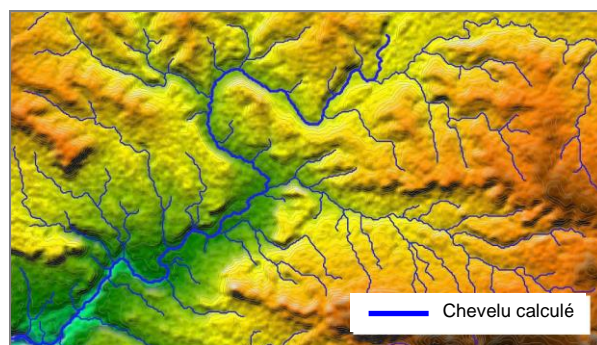
L'approche radiométrique porte principalement sur la recherche de linéaires, de discontinuités, de ruptures radiométriques ou d'alignements par photo-interprétation (cf. figure 1).



**Figure 1 :** Chevelu photo-interprété à partir d'une image Spot 5 - Région de Ras El Oued (Algérie) - © CNES (2006), distribution Airbus DS / Spot Image.

Cette méthode ne permet pas de représenter le réseau hydrographique de manière exhaustive. Par contre, elle peut constituer une information complémentaire aux méthodes d'extraction utilisant des critères morphologiques, détaillées ci-après.

L'approche morphologique, basée sur le traitement de MNS / MNT, consiste à modéliser automatiquement le réseau sur la base de critères hydrologiques (calcul du cheminement des eaux en fonction de la topographie, cf. revue proposée par Wilson et *al.*, 2008), de critères géomorphologiques (différenciation des zones convergentes et divergentes du relief), ou de méthodes hybrides combinant à la fois des critères hydrologiques et géomorphologiques [Thommeret et *al.*, 2010].



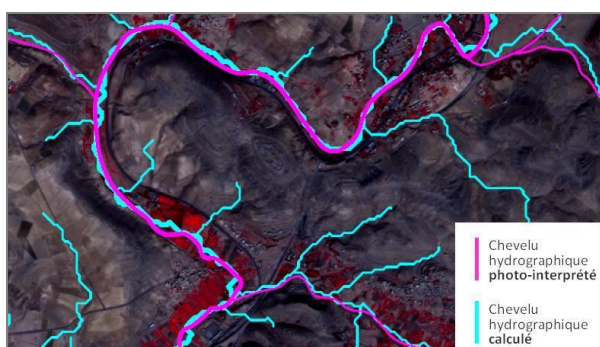
**Figure 2 :** Chevelu calculé à partir d'un MNE Spot 5 - © CNES (2006), distribution Airbus DS / Spot Image.

La figure 2, intéressant la même zone que la figure 1, montre clairement la distribution spatiale des fonds de thalwegs, principaux et secondaire, confirmant l'efficacité de la méthode automatique.

En première approche, l'analyse comparative des précédents chevelus montre que :

- le chevelu photo-interprété (approche radiométrique) propose une représentation réaliste des drains en eau, mais non exhaustive ;
- le chevelu calculé (approche morphologique) représente de manière beaucoup plus exhaustive les drains en eau ainsi que les drains secs, mais avec une modélisation des flux anguleuse et quelques imprécisions locales.

Ces différences apparaissent sur la figure 3 (superposition des deux chevelus), ciblée sur le grand méandre formé par le cours d'eau et visible sur les figures précédentes.



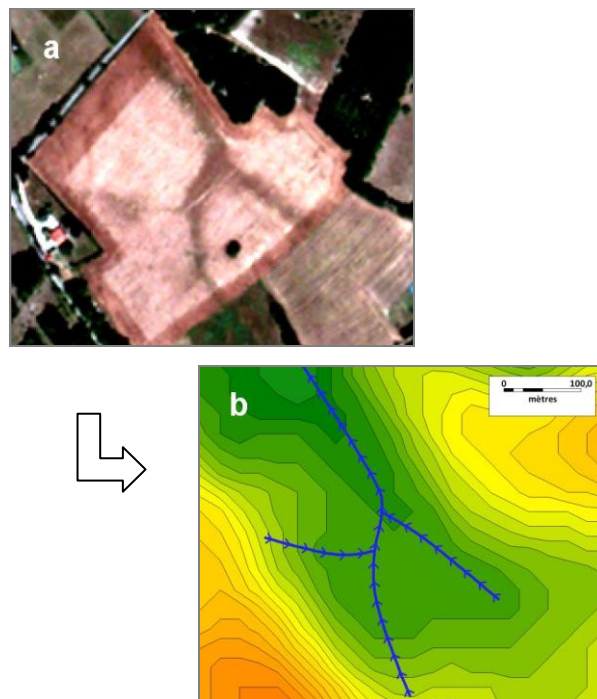
**Figure 3 :** Comparaison entre le chevelu photo-interprété et le chevelu calculé.

### 3.2 Les chenaux de drainage dans les horizons superficiels du sol (« sous-écoulements »)

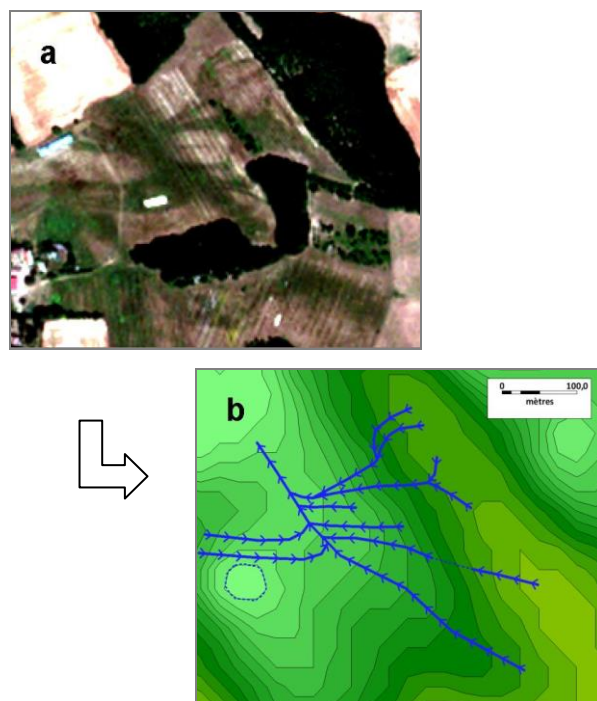
Les écoulements de sub-surface correspondent à des circulations d'eau dans les horizons perméables ou semi-perméables des sols superficiels, formant des axes naturels de drainage d'extension spatiale variable (chenaux), généralement temporaires.

Dans certaines conditions, les traces d'humidité résiduelles laissées par ces écoulements permettent de les détecter par photo-interprétation à partir d'images satellites à très haute résolution spatiale, comme le montrent les exemples suivants extraits d'une image Pléiades acquise sur la région de Lenclio dans le département du Lot en mai 2012.

Les figures 4 & 5 ci-contre reflètent le caractère ponctuel et globalement peu marqué des écoulements de sub-surface, pouvant rendre difficile leur détection. De plus, les nombreuses confusions possibles avec d'autres zones d'humidité et la variabilité temporelle du phénomène (aspect en surface dépendant directement des conditions hydriques des sols et donc des saisons) requièrent systématiquement l'expertise d'un spécialiste en photo-interprétation. À noter que ce type d'analyse peut en revanche être facilité par l'exploitation des différentes bandes spectrales de Pléiades, notamment dans l'infrarouge pour l'évaluation de l'humidité.



**Figure 4 :** a- Paléochenaux alluviaux supposés en fond de vallon, visibles sur une image Pléiades - © CNES (2012), distribution Airbus DS / Spot Image ; b- Sur la même zone, représentation des axes et sens d'écoulement photo-interprétés - MNT © IGN.



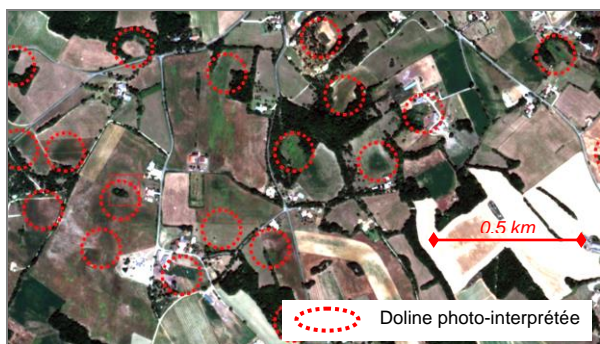
**Figure 5 :** a- Sous écoulements sur un versant, visible sur une image Pléiades - © CNES (2012), distribution Airbus DS / Spot Image ; b- Sur la même zone, représentation des axes et sens d'écoulement photo-interprétés - MNT © IGN.



### 3.3 Les points d'infiltration d'eau en surface : exemple des dolines en milieu karstique

Les dolines correspondent à des dépressions topographiques fermées de forme globalement sub-circulaires ou elliptique, d'échelle généralement pluri-métrique à pluri-décamétrique. Elles constituent des points naturels d'infiltration des eaux de surface, bien que le fond des dolines puisse être comblé par des résidus argileux qui peuvent contribuer à l'imperméabilisation de la dépression.

Les géologues admettent que les dolines représentent avant tout des indicateurs morphologiques (micro-reliefs) caractérisant les milieux karstiques. La radiométrie de ces cuvettes et leur répartition spatiale, très variables suivant les contextes, représentent des facteurs d'identification secondaires, difficilement exploitables par le biais de méthodes automatiques. L'extrait d'image Pléiades suivant fait ressortir la diversité spectrale des dolines dans un paysage de terre agricole, les dépressions étant caractérisées par des différences de teinte importantes qui laissent percevoir de fortes variations d'humidité.

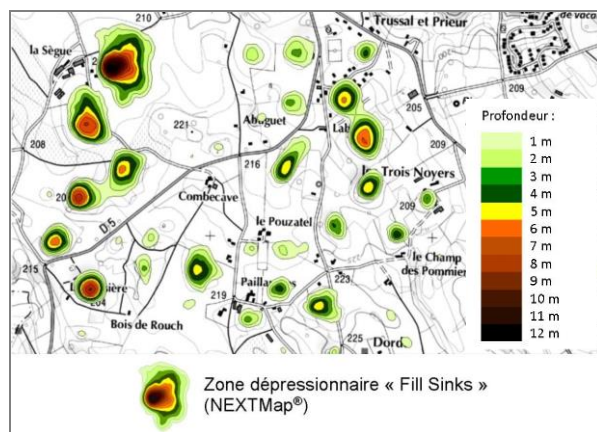


**Figure 6 :** Extrait d'une image Pléiades sur zone montrant la diversité spectrale des dolines dans un paysage de terre agricole (dolines photo-interprétées à partir d'un couple d'images aériennes) - © CNES (2012), distribution Airbus DS / Spot Image.

À l'instar des réseaux hydrographiques, l'extraction des dolines peut se baser sur le traitement de MNT, en notant que le niveau d'échelle de ces micro-reliefs requiert l'utilisation de modèle à haute résolution.

Il existe pour cela des algorithmes de modélisation des surfaces convergentes (« Convergence Index », Köthe & Lehmeier, 2004) et des algorithmes de correction de MNS / MNT qui consistent à substituer les dépressions locales par des surfaces horizontales en effectuant une opération de remplissage (« Fill Sinks », Planchon & Darboux, 2001). Ces outils peuvent être utilisés pour extraire automatiquement les dolines d'un MNT.

Un exemple d'application de la méthode « Fill Sinks », montrant la distribution, l'étendue et la profondeur des dolines est proposé ci-après. Ce test a été réalisé à partir du MNT NEXTMap® d'Intermap au pas de 5 m, correspondant globalement aux caractéristiques d'un MNT dérivé d'un couple d'image Pléiades.



**Figure 7 :** Extraction de dépression topographique à partir de l'algorithme « Fill Sinks » appliqué sur le MNT NEXTMap® - © Intermap, © Geosys.

Certaines sources de données recensent les dolines (carte topographique de l'IGN et carte géologique du BRGM notamment), sachant que ces informations ne sont ni homogènes, ni exhaustives. La méthode d'extraction « Fill Sinks » basée sur le traitement d'un MNS / MNT est robuste, rapide, efficace et rapide à mettre en œuvre pour extraire automatiquement des dépressions sur des surfaces horizontales ou sub-horizontales (plateaux, causses, ...). Suivant le niveau de précision du MNS / MNT, elle peut permettre de détecter des dolines de petites dimensions et de profondeur métrique, sachant que la résolution du modèle doit correspondre à l'échelle des plus petites dépressions à identifier. De plus, des traitements radiométriques effectués à partir d'images satellites THRS sont également envisageables pour affiner le recensement. En effet, une grande partie des dolines a tendance à accumuler une certaine humidité qui peut avoir un effet sur l'activité chlorophyllienne, induisant une signature spectrale spécifique.

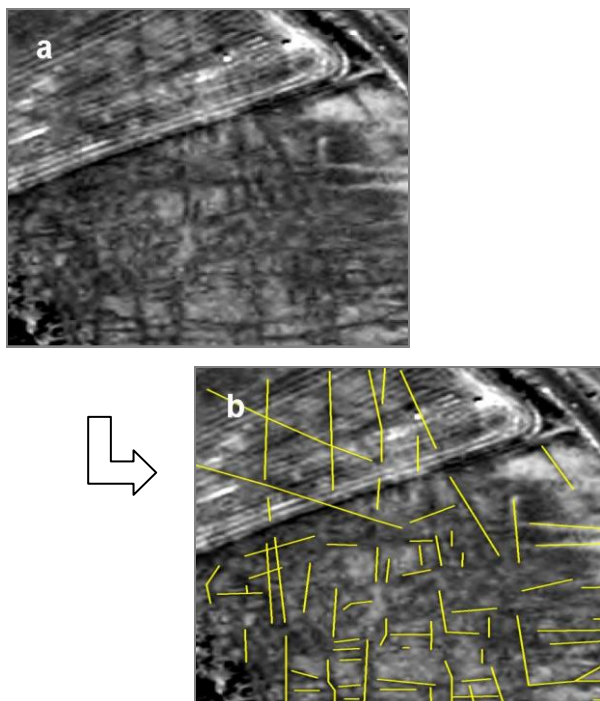
À noter enfin que les premiers tests effectués à partir du MNT NEXTMap au pas de 5 m sont tout à fait prometteurs car cohérents avec des analyses par photo-interprétation, ce qui laisse penser que les MNT Pléiades seront très bien adaptés à cette thématique.

### 3.4 Les discontinuités géologiques drainantes et les réseaux de drainage artificiel

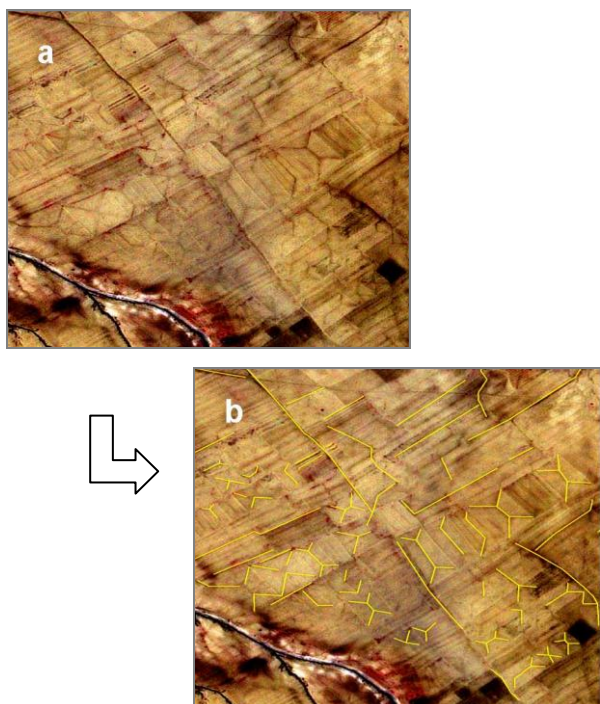
Les failles géologiques forment généralement des éléments structuraux rectilignes qui correspondent sur les images satellites à des linéaments de géométrie, d'orientation et de distribution variable suivant le développement de la fracturation. Ces discontinuités peuvent constituer des plans préférentiels de circulation hydraulique. Les dispositifs artificiels de drainage (fossés, drains enterrés, voies d'eau, ...) constituent des aménagements également linaires pouvant être structurés en un réseau plus ou moins dense, convergeant vers un collecteur.

Les failles géologiques et les réseaux de drainage artificiels peuvent être soulignés en surface par des discontinuités radiométriques assez nettes (variations brutales d'humidité, alignements de végétation, ...), qui présentent une certaine variabilité temporelle.

Ces formes particulières sont facilement identifiables par analyse visuelle (photo-interprétation). Elles peuvent également être extraites par télédétection automatique à partir de filtres linéaires ou d'algorithmes d'analyse de structure géométrique [Grompone von Gioi et al., 2012], comme le montrent les figures 8 & 9.



**Figure 8** : a- Petite fracturation en milieu calcaire visible sur une image Pléiades (secteur de Mauroux, Lot) ; b- Sur la même zone, extraction automatique des discontinuités - © CNES (2012), distribution Airbus DS / Spot Image.



**Figure 9** : a- Drainage agricole parcellaire (réseau en « croix ») visible sur une image Spot 5 (Algérie) ; b- Sur la même zone, extraction automatique des drains enterrés - © CNES (2006), distribution Airbus DS / Spot Image.

La bibliographie et les tests menés montrent que la télédétection spatiale permet d'extraire les dispositifs de drainage artificiels et les réseaux de fractures de massifs géologiques par le biais de méthodes automatiques ou par photo-interprétation. Dans ce domaine, les travaux de recherche menés jusqu'à présent conduisent à des résultats très satisfaisants d'un point de vue qualitatif et quantitatif. Toutefois, ils ne permettent pas encore de déterminer le potentiel hydraulique réel des réseaux et donc de différencier les éléments conducteurs actifs et inactifs, même en présence d'indicateurs spécifiques (alignement de végétation active et dense par exemple).

#### 4. Conclusion

La connaissance précise des réseaux de drainage superficiels, naturels et artificiels, constitue un élément déterminant pour la caractérisation et la délimitation des Aires d'Alimentation de Captage.

Les méthodes traditionnelles de recherche d'indices de drainage en surface et sub-surface reposent essentiellement sur l'exploitation de données locales, sur des relevés sur site et sur des analyses par photo-interprétation d'images aériennes. Ces sources d'information sont caractérisées par des échelles géographiques souvent variables.

La télédétection spatiale, grâce à sa vision synoptique, sa richesse d'information, sa haute résolution spatiale et sa capacité de revisite, permet d'étudier de manière homogène, relativement précise et fréquente de vastes champs géographiques (méthode « à grand rendement ») et constitue un puissant outil pour la détection automatique de certains réseaux de drainage, tels que les chevelus hydrographiques, les dépressions topographiques (dolines) et certains éléments linéaires (discontinuités géologiques et drainages artificiels).

Pour d'autres éléments de drainage, tels que les sous-écoulements dans les horizons superficiels des sols, l'extraction des informations est difficile en mode automatique et requiert une expertise humaine (photo-interprétation ou analyse détaillée *in situ*) pour identifier précisément les zones. Toutefois, la télédétection reste pertinente au regard de la prise de hauteur, du large champ d'observation et de la richesse spectrale de l'imagerie satellitaire, avec des canaux sortant de la lumière perceptible par l'œil humain.

Dans tous les cas, le traitement numérique de données satellitaires hautement résolues apporte une aide informatique précieuse pour la cartographie d'indices de drainage superficiels et peut permettre à partir de MNS / MNT dérivés d'images stéréoscopiques de caractériser de manière tridimensionnelle certains éléments (réseaux hydrographiques et dépressions).

Les informations extraites peuvent faciliter l'analyse des captages et de leur environnement, aussi bien à l'amont des études de vulnérabilité, en permettant par exemple de pré-dimensionner le bassin à analyser, qu'au stade du diagnostic, en permettant de rechercher avec précision le cheminement des eaux superficielles et d'apprécier le potentiel d'infiltration des eaux à la surface du sol.

Enfin, il faut noter que les traitements automatiques basés sur des critères morphologiques seront très prochainement appliqués à des MNS Pléiades, en prenant en compte les contraintes que peut apporter la très haute résolution spatiale en terme de bruit.

### Références

- Abílio de Carvalho Júnior O., Fontes Guimarães R., Montgomery D.R., Gillespie A.R., Arnaldo Trancoso Gomes R., de Souza Martins E., Correia Silva N., 2014. *Karst Depression Detection Using ASTER, ALOS/PRISM and SRTM-Derived Digital Elevation Models in the Bambuí Group, Brazil*. Remote Sensing, n°6, 330-351.
- Aubert J., Doridot M., 1981. *Photographie aérienne et études d'impact*. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Env. VI-3, 235-246.
- Charleux-Demargne J., 2001. *Qualité des Modèles Numériques de Terrain pour l'Hydrologie – Application à la Caractérisation du Régime de Crues des bassins Versants*. PHD Thesis, Université de Marne-la-Vallée.
- Douay D., Lardieg E., 2010. *Délimitation des AAC prioritaires du bassin Adour-Garonne – Méthodologie de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des captages d'eau superficielle*. Report Antéa - Ginger – Calligée, 28.
- Grompone von Gioi R., Jakubowicz J., Morel J.M., Randall G., 2012. *LSD: a Line Segment Detector. Image Processing On Line (IPOL)*, 35-55.
- Hoffmann J., Sander P., 2007. *Remote sensing and GIS in hydrogeology*. Hydrogeology Journal, n°15, 1-3.
- Kiss R., 2004. *Determination of drainage network in digital elevation models, utilities and limitations*. Journal of Hungarian Geomathematics, volume 2, 16-29.
- Koussoubé Y., Savadogo A.N., Nakolendoussé S., 2003. *Les différentes signatures des fractures de socle cristallin en zone Sahélo-Soudanienne du Burkina-Fasso*. Revue Télédétection, volume 3, n°5, 419-427.
- Maréchal D., 2011. *Du drain potentiel au drain réel : utilisation de données satellitaires à très haute résolution pour l'étude de l'origine géomorphologique des chemins de l'eau sur des bassins versants méditerranéens soumis aux crues éclair*. PHD Thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne.
- Martz L. W., Garbretch J., 1999. *An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM*. Computers & Geosciences, volume 25, n°7, 835-844.
- Paré G., Dubois J.M., Gwyn Q., 2005. *Méthode de cartographie des géorisques karstiques à l'aide d'une image radar : application à l'île d'Anticosti, Québec*. Revue Télédétection, volume 4, 303-328.
- Puech C., Bailly J.S., 2010. *Cheminement des eaux superficielles et télédétection pour la modélisation hydrologique distribuée*. La Houille Blanche, n°3, 39-44.
- Sorokoby M. V., Saley M. B., Kouamé F. K., Djagoua E. V., Bernier M., Kouadio A., Biémi J., 2010. *Utilisation des images Landsat ETM+ et du SIRS pour la cartographie linéamentaire et thématique de Soubre-Meagui (sud-ouest de la côte d'Ivoire) : contribution à la gestion des ressources en eau souterraine*. Revue Télédétection, volume 9, n°3-4, 209-223.
- Thommeret N., Bailly J.S. and Puech C., 2010. *Extraction of thalweg networks from DTMs : application to badlands*. Hydrology and Earth System Sciences, n°14, 1527-1536.
- Vernoux J.F., Wuilleumier A., Dörfli N., 2007. *Délimitation des bassins d'alimentation des captages et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses*. Methodological guide, report BRGM/RP-55874-FR, 75.
- Wilson P., Agget G., Deng Y., Lam C.S., 2008. *Water in the Landscape : A Review of Contemporary Flow Routings Algorithms*. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, Advanced in Digital Terrain Analysis, 213-236.
- Youan M., Lasm T., Jourda J.P., Kouamé K.F., Razack M., 2008. *Cartographie des accidents géologiques par imagerie satellitaire Landsat-7 ETM+ et analyse des réseaux de fractures du socle Précambrien de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire)*. Revue Télédétection, volume 8, n°2, 119-135.