# EXPLOITATION D'IMAGES SATELLITALES À TRÈS HAUTE RÉSOLUTION SPATIALE FOURNIES PAR *GOOGLE EARTH*©. EXEMPLE D'APPLICATION À L'ÉTUDE DE L'ENSABLEMENT D'OLIVERAIES EN TUNISIE.

**Cédric VENARD [1,2,3], Eric DELAITRE [2], Yann CALLOT [1], Mohamed OUESSAR, Dalel OUERCHEFANI [3]**

*1 : ArchéOrient UMR 5133 Université Lumière Lyon 2, 5 avenue Pierre Mendes France, 69500 BRON. Cedric.Venard@univ-lyon2.fr, 04 72 71 58 43; Yann.Callot@univ-lyon2.fr, 04 78 77 26 32*
*2 : Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Unité ESPACE S140, Maison de la Télédétection, 500 rue J-F Breton, 34093 MONTPELLIER CEDEX 5. Eric.Delaitre@ird.fr, 04 67 16 31 94*
*3 : Institut des Régions Arides (IRA), Unité de télédétection et SIG, Route de Jorf, Médenine, Tunisie.*

Soumis le 11 février 2009, accepté le 04 août 2009 - © *Revue Télédétection*, 2010, vol. 9, n° 1, p. 59-71

***Résumé***

*Dans le cadre international de la convention de lutte contre la désertification, l'Observatoire du Sahara et du Sahel a mis en place un Réseau d'Observatoire et de Surveillance Ecologique à Long Terme (ROSELT), fondé sur une approche de l'environnement à l'échelle locale. Des méthodes adaptées ont donc dû être développées. L'une d'entre elles considère les petites formes éoliennes (PFE) comme des indicateurs des dynamiques du paysage dans un contexte de désertification. Surveiller l'évolution des paysages sur la base de tels indicateurs n'est pas simple et des approches faisant appel à la télédétection et à l'analyse d'image sont mises en œuvre. Les PFE étant au mieux de dimension métrique, des images à Très Haute Résolution spatiale sont nécessaires à leur caractérisation. Leur coût élevé a conduit à explorer le potentiel de la plate-forme* Google Earth© *pour l'exploitation des images qu'elle propose à la visualisation. Des méthodes visant à extraire des images, à réaliser une mosaïque couvrant la zone de travail et à introduire des informations de géoréférencement ont été mises au point. Afin d'obtenir la donnée spatiale la plus fiable possible les erreurs associées aux manipulations sont évaluées et des propositions pour les corriger sont faites. Un exemple d'utilisation thématique de cette donnée est fourni. Les résultats obtenus montrent que, dans certaines limites, les images issues de* Google Earth© *peuvent se substituer aux images brutes, sans pour autant les remplacer. Ils soulignent le potentiel en terme de recherche de* Google Earth© *et son intérêt, notamment pour des approches paysagères.*

***Mots-clés** : Google Earth©, Images à Très Haute Résolution, Télédétection, Désertification, Petites formes éoliennes, Géoréférencement.*

***Abstract.***

*Exploitation of very high resolution satellite images provided by . Example of application to the study of the sand encroachment of olive trees parcels in Tunisia*

*Desertification of arid margins of the Sahara has been observed for almost half a century. Monitoring its consequences is a development issue for concerned countries. In this context, the Observatory of the Sahara and the Sahel (OSS) has developed a network of environmental observatories. Based on a local-scale approach of environmental issues, this project involves the development of new observation methods. Among these, a small-aeolian-form-centered approach has been proposed. Small aeolian forms are metric-scale and fleeting formations, difficult to observe in a systematic way. Using Remote Sensing and Image Analysis seems to be suitable for studying this object. However its small size is a problem and requires Very High Resolution images. The cost of such images is high and lead us to consider the*

*potential of* Google Earth© *images for scientific works. This paper presents the procedures we developed in order to extract, georeference and exploit these data. Two types of results are available:*

*1- The retrieval and the formatting of the images. Obtaining usable images with the wanted resolution (1 meter per pixel) requires to extract one by one small screen shots. Inserted (in ) Ground Control Points (GCP) are used to georeference it. A mosaic is then performed, based on the spatial information of each image. This method give good results, as it is demonstrated by the evaluation of the mean error of the positioning of the mosaic which stands equal to the mean error of the GPS used on the field.*

*2- An example of thematic application is provided. The mosaic is suitable for various processings, especially on forms recognition. We performed a photo-interpretation of the mosaic and drawn the agricultural parcel plan. Besides, tools from Mathematical Morphology were applied on formatted images in order to extract several landscape indicators, such as the density of olive trees and the sand dunes. Results provide a good basis to build landscape monitoring and diagnosis.*

*This paper shows the relevance of using image from* Google Earth© *in scientific work, but also its limitations. The main one is that very high resolution is not available everywhere on* Google Earth© *database. As a consequence, if these images can be used for thematic issues, centred in an object, they could be useless for geographic issues, centred in an area, in case this area is not covered by very high resolution in* Google Earth©. *The second limitation concerns the radiometric parameters of images provided by* Google Earth©. *These parameters are not clearly specified by* Google Earth©. *As a consequence, signal processing appears less reliable than edge detection on this kind of images.*

***Key words****: Google Earth©, Very High Resolution Images, Remote Sensing, Desertification, Small Aeolian Forms, Georeferencing.*

## 1. INTRODUCTION

Les marges arides du Sahara connaissent depuis plus d'une trentaine d'années des changements démographiques et sociaux (expansion démographique, sédentarisation, appropriation des terres) couplés à un renforcement de certaines phases d'aridité. Ces évolutions croisées semblent être la cause de déséquilibres dans la relation que les populations entretiennent avec leur milieu (Bernus, 1984 ; Rognon, 1994 ; Auclair *et al.*, 1996). La manifestation la plus spectaculaire de ces déséquilibres est la désertification, définie comme : *la dégradation des terres dans les zones arides, semi–arides et subhumides sèches par suite de divers facteurs, parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaines* (UNCCD, 1994).

Les chercheurs de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD, ex-ORSTOM) comme d'autres instituts (CNRS, INRA…), français ou internationaux, ont étudié ce phénomène depuis longtemps (Floret et Pontanier, 1982 ; Escadafal, 1989). Aujourd'hui encore, le partenariat entre les organismes de recherche et les pays touchés par la désertification donne lieu à de nombreux travaux et réalisations (Genin *et al.*, 2006). L'un des projets-cadres de ces travaux est le programme « Réseau d'Observatoires de Surveillance Environnementale à Long Terme » (ROSELT). Mis en place à partir des années 1990 par l'Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS), il vise à étudier la désertification à travers des observatoires de l'environnement à l'échelle locale répartis sur l'ensemble des marges du Sahara.

Ces observatoires, centrés sur la surveillance des systèmes écologiques à la base, nécessitent le développement d'indicateurs fins, spatialement et temporellement, de leurs évolutions (ROSELT/OSS, 2004). Dans ce contexte, une approche des oliveraies ensablées du Sud de la Tunisie (Figure 1) a été tentée à partir d'images satellitales à très haute résolution spatiale.

Ce site a été choisi d'après l'importance de l'ensablement de la zone, l'une des conséquences les plus problématiques de la désertification, liée en général à des pratiques culturales inadaptées à la fragilité des sols (Figure 2). L'intérêt de l'étude de la dynamique éolienne, par le biais de l'ensablement, à l'échelle d'une parcelle d'oliviers est de présenter des conditions optimales d'analyse : les plants sont régulièrement espacés et il y a une unité des pratiques sur la zone considérée. L'approche par télédétection a été privilégiée afin d'obtenir des résultats à l'échelle d'un géosystème, la télédétection étant un outil efficace d'extrapolation des résultats obtenus localement. En effet, la contrainte liée à l'étude de micro-formes, micro-systèmes et micro-dynamiques est de valider les résultats sur l'ensemble de la zone d'étude.

Il est nécessaire pour pouvoir travailler à une échelle aussi précise de disposer d'outils appropriés. Le lancement de satellites à très haute résolution spatiale (Ikonos et QuickBird) permet de travailler sur des images dont la résolution est au mieux métrique. Les objets tels que les oliviers (par leur couronne) et les formes d'ensablement sont donc désormais accessibles. Le principal problème de ce type de données reste aujourd'hui le coût de l'acquisition et la répétitivité.

Afin de contourner cette contrainte financière, les possibilités offertes par *Google Earth*© ont été explorées. Ce produit, outre son succès croissant auprès du grand public intéresse de plus en plus la communauté des chercheurs. Qu'il s'agisse d'étudier les conséquences en termes de communication environnementale de cet engouement (Sheppard et Cizek, 2009), de développer les possibilités de l'outil (Compieta *et al.*, 2007), de l'utiliser comme moyen de partager des données et des résultats (Conroy *et al.*, 2008), comme support pédagogique (Lisle, 2006) ou comme support de

vérification de résultats (Luedeling et Buerkert, 2008), *Google Earth*© fait aujourd'hui partie du bagage commun des chercheurs dans de nombreuses disciplines.

Une constante peut néanmoins être relevée : *Google Earth*©, ainsi que les images qu'il met à disposition sont toujours présentés comme un support, une illustration. L'objet de cet article est de montrer dans quelle mesure, dans quelles limites et avec quelles précautions on peut envisager d'utiliser les images issues de *Google Earth*© en tant que données soumises à traitement. L'intérêt d'une telle démarche réside tout d'abord dans la gratuité de l'acquisition d'image, sa souplesse (petite ou grande zone, les images qui sont disponibles le sont en permanence – au moins pour le moment) et le rythme de mise à jour des images proposées par *Google Earth*© qui améliore régulièrement la résolution des images disponibles.

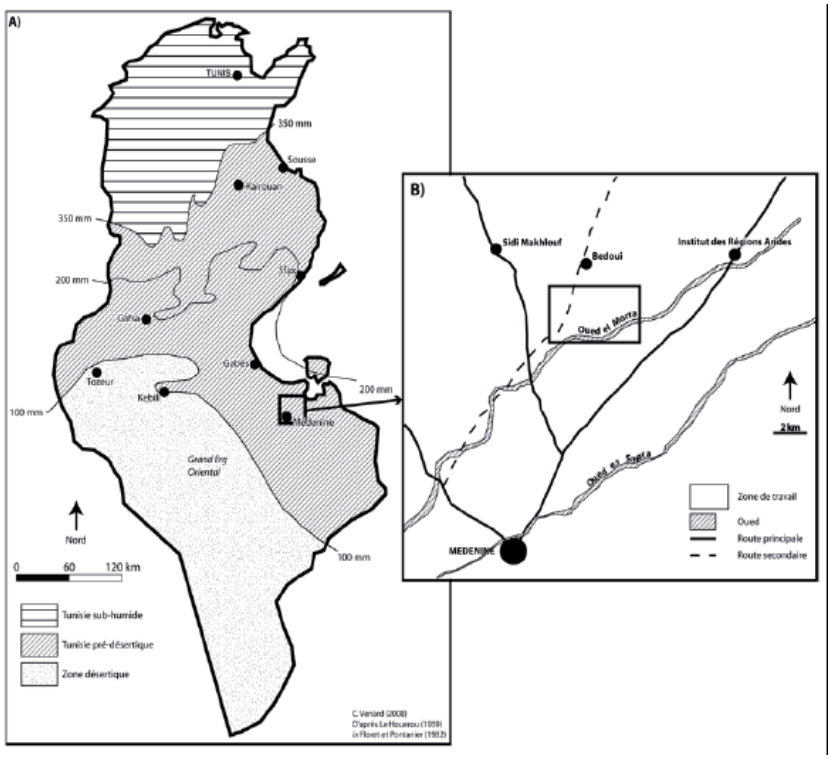



Figure 1 : A) Contexte climatique tunisien ; B) Localisation de la zone de travail.
*Figure 1: A) Tunisian climate context; B) Studied area.*







Figure 2 :
A- Ensablement de type barkhanoïde d'une parcelle d'oliviers. Cliché : É. Delaître (2008).
B- Labour mécanique des parcelles par charrue polydisque, effectué à plusieurs reprises au cours de l'année pour faciliter l'infiltration de l'eau et éliminer la concurrence des autres espèces. Cliché : É. Delaître (2008).

*Figure 2:*
*A- Sand dune in olive trees parcel. Photography: E. Delaître (2008).*
*B- Mechanical tillage performed several times during the year to facilitate water infiltration and eliminate competition between species. Photography: E. Delaître (2008).*

## 2. OBJECTIFS

La présente étude se fixe pour objectifs de répondre aux questions suivantes :

- quels protocoles doivent être élaborés pour faire des images à très haute résolution spatiale issues de *Google Earth*© une donnée exploitable ?

- comment intégrer l'information spatiale à ces images (géoréférencement) et quelle est la qualité de celle fournie par *Google Earth*© ?

- quelles applications peut-on envisager sur ces bases et avec quelles contraintes ?

## 3. MATERIELS ET METHODES

### 3.1. Images à Très Haute Résolution

La base de données utilisée dans ce travail comprend un extrait commun à deux images *QuickBird* prises le 08 janvier 2004 d'après les informations fournies par *Google Earth*© (Identifiant Catalogue *Digital Globe* : 10100100029DC602 ; coordonnées du centre de l'image : 33,538°N / 10,5473°E ; Identifiant Catalogue : 10100100029DC603 ; coordonnées du centre : 33,401°N / 10,5477°E).

Cet extrait d'image a été acquis gratuitement depuis *Google Earth*© directement à partir de l'écran de visualisation. Une telle démarche implique un certain nombre de contraintes. En conséquence, les procédures suivies pour l'extraction figurent dans la partie « Résultats ». Au final, une mosaïque couvrant la zone de travail (18,6 km²), à 1 m de résolution (3280 lignes × 5666 colonnes) a été réalisée.

### 3.2. Données spatiales de terrain

Afin d'évaluer le géoréférencement proposé par *Google Earth*© un certain nombre de relevés de points d'amer a été effectué sur le terrain lors d'une mission réalisée en mars 2008, à l'aide d'un GPS Garmin de type II+. La fiabilité de la répétition des mesures du GPS a été évaluée lors d'une précédente mission en Tunisie, en relevant systématiquement dix points à un repère fixe (poteau en béton) sur une période de deux mois.

Lors de la mission de mars 2008 ce sont essentiellement les routes et pistes empruntées sur le terrain qui ont été relevées automatiquement par le GPS par des prises de points à intervalle de temps régulier avec un mode de sauvegarde automatique de ces derniers.

L'ensemble de la base de données spatiale de cette étude est référencé en projection Transverse de Mercator (UTM) et dans le datum Carthage, pour rester directement compatible avec la majorité des cartes topographiques tunisiennes existantes.

### 3.3. Logiciels utilisés et traitements réalisés

L'ensemble des données utilisées est traité à l'aide des logiciels *ENVI™ 4.2* (*ITT Corporation*), dédié au traitement d'images, et *ArcGIS® 9.2* (*ESRI™*), dédié au système d'information géographique (SIG), pour développer les approches spatiales. Le logiciel *Aphelion™ 3.2* (*ADCIS*) est enfin utilisé pour les traitements basés sur les méthodes de la *Morphologie Mathématique*.

Cette discipline de l'Analyse d'Image, développée dans les années 1960 par Matheron et Serra (Serra, 1982), permet à l'opérateur de travailler non pas sur la couleur ou la radiométrie des pixels de l'image (comme en traitement du signal) mais sur l'analyse mathématique des contrastes, afin d'extraire des formes.

Par une succession d'opérations, une image est structurée selon les critères morphologiques jugés pertinents pour l'étude (Mering, 1998) en dépassant les limites de la photo-interprétation visuelle, biaisée par la part de subjectivité qu'elle induit et difficile à faire sur de grandes superficies. La reproduction automatique des séquences de traitement est de surcroît possible (Mering et Oulehri, 1994).

La Morphologie Mathématique (MM) a été utilisée pour cartographier les barkhanes du Cap Juby et leurs évolutions spatio-temporelles (Mering et Oulehri, 1994). Elle a été également utilisée pour cartographier les ensembles dunaires du Grand Erg Occidental à partir d'images SPOT à 10 m de résolution spatiale. Elle a permis d'y lever les contraintes liées à la difficulté de mener des missions sur le terrain ainsi que celles dues aux caractéristiques radiométriques du milieu qui rendent difficiles la photo-interprétation visuelle (Callot *et al.,* 1994 ; Drouot, 1994). Enfin, des études ont été conduites pour déterminer la répartition spatiale de catégories de végétaux et de certains types de dunes (Jacqueminet et Mering, 1989) au Sahel, à partir d'une image Landsat MSS.

En plus des opérateurs sur les contours, le logiciel *Aphelion* permet de travailler sur les objets extraits, en générant un tableau résumant leurs caractéristiques. On peut ensuite les discriminer suivant des critères plus fins et plus adaptés,

notamment pour nettoyer les artefacts créés lors de la séquence. Il existe par exemple un critère d'élongation qui tend vers 1 pour une ellipse étroite et allongée et vers 0 pour un disque parfait.

Nous précisons enfin qu'il est possible sans difficulté d'intégrer les résultats des traitements par les méthodes de la MM dans un SIG. Les images traitées sous *Aphelion*™ sont préalablement enregistrées au format *Tagged Image File Format* (TIFF, extension : .tif). Les informations de géoréférencement qu'elles contiennent sont rassemblée dans un fichier connexe portant le même nom que l'image et dont l'extension est : .tfw. Il suffit de conserver ce fichier et de le relier au fichier traité pour retrouver le géoréférencement initial.

Les opérateurs de MM utilisés dans ce travail sont donc (Venard *et al*., 2009) :

- La reconstruction géodésique ;

- L'ouverture par reconstruction ;

- Le Chapeau-Haut-de-Forme ;

- Divers opérateurs d'analyse morphologique des objets extraits.

Les données obtenues par ces traitements sont rassemblées dans un Système d'Information Géographique (SIG) permettant de croiser ces informations. Les cartes thématiques d'analyse du paysage et des dynamiques de l'ensablement en sont dérivées. Cette base de données, destinée à être complétée, sert de support à des recherches futures.

## 4. RESULTATS

Ils sont de deux ordres : ceux liés à la mise au point de méthodes pour l'utilisation d'images *Google Earth*© d'une part, et d'autre part leur application à la cartographie du phénomène d'ensablement.

### 4.1. Estimation de la fiabilité du GPS

À partir des points relevés précédemment sur un repère fixe, il est possible de définir la fiabilité du GPS pour une série de mesures temporelles. Les différentes valeurs obtenues permettent de calculer un écart-type que l'on peut considérer comme l'intervalle de confiance du GPS (Figure 3). Dans ce cas et en utilisant la projection UTM, cette valeur est de 3 m en longitude et 5 m en latitude. La pertinence de ce chiffre est à apprécier à hauteur du nombre de valeurs utilisées pour le calcul (10). Il suffit toutefois pour l'usage qui en est prévu, à savoir estimer la qualité du géoréférencement des images *Google Earth*© qui auront une résolution spatiale finale de 1 m par pixel.

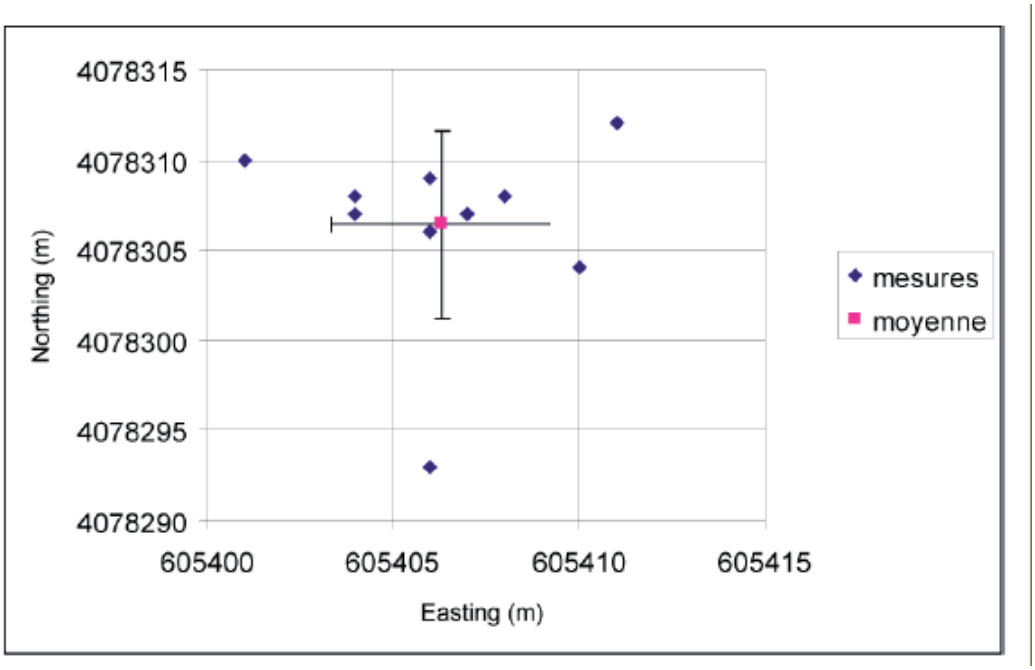



Figure 3 : Calcul de la précision du GPS utilisé (coordonnées en projection UTM, datum Carthage, unité = mètre).
*Figure 3: Calculation of the accuracy of the GPS (UTM coordinates, datum: Carthage, unit = meter).*

## 4.2. Mise en forme de l'extrait des images Quickbird

### *4.2.1. Optimisation de la résolution de l'image finale*

L'utilisation à des fins de recherche scientifique d'images satellitales mises à disposition par *Google Earth*© ne va pas sans poser un certain nombre de problèmes. En premier lieu, il importe de rappeler que *Google Earth*© est une plate-forme grand public. Il n'est pas conçu pour fournir de la donnée, exception faite des liens qui sont proposés vers les sites commercialisant les images. En conséquence, l'extraction d'images ne peut se faire que par captures d'écran (à l'aide de la fonction *enregistrer l'image* de l'interface). Or, la résolution d'une capture, c'est-à-dire le nombre de lignes et de colonnes de l'image enregistrée, est celle de l'écran utilisé pour la visualisation (Figure 4).




Figure 4 : Visualisation de l'ensemble de la zone d'étude sous *Google Earth*©.
Lignes × colonnes : 875 × 1440, aire couverte : 5,16 km par 2,86 km.
*Figure 4: Google Earth© image for the studied area.*
*Lines by columns: 875 × 1440, covered area: 5.16 km by 2.86 km.*

Dans *Google Earth*©, la possibilité de zoomer en avant et en arrière permet de visualiser de plus ou moins grandes surfaces de terrain, mais avec une résolution d'écran fixe, *Google Earth*© dégradant ou au contraire améliorant la résolution de l'image. De fait, la résolution spatiale des images enregistrées dépend de deux paramètres :

- la résolution de l'écran de l'opérateur, fixe (dans notre cas : 1680 x 1050 pixels, générant une image utilisable de 1440 × 875 pixels) ;

- l'altitude de visualisation de l'image dans *Google Earth*© (variable) qui est donnée par la barre d'état, en bas à droite de l'écran.

L'outil *règle* proposé par *Google Earth*© permet de mesurer la longueur et la largeur (en équivalence réelle) de l'image visualisée. En fonction de la résolution de l'écran, on ajuste l'altitude de visualisation pour obtenir la résolution voulue. Pour obtenir des images dont la résolution spatiale est de 1 mètre par pixel, il faut visualiser à l'écran une zone de 1440 m par 875 m. L'enregistrement a donc été effectué à une altitude de visualisation de 1,3 km. Les images ainsi enregistrées ont comme dimension : 875 l. × 1440 col. Pour couvrir la zone de travail (3280 l. × 5666 col.) en prévoyant des zones de recouvrement entre 2 images voisines, il a fallu enregistrer 16 images.

### *4.2.2. Réalisation d'une mosaïque à référence spatiale*

La question du géoréférencement se pose alors. Afin de le réaliser dans les meilleures conditions possibles, chaque extrait enregistré contient cinq points d'amer insérés depuis *Google Earth*© par l'outil : *ajouter / repère* (Figure 5). Les cordonnées X et Y de chacun de ces amers sont fournies par *Google Earth*© en Lat/Long WGS 84. Elles sont visibles dans la barre d'état du logiciel, en bas de l'écran. Chaque extrait a au moins deux amers communs avec les extraits qui l'encadrent.

Deux procédures sont alors possibles : réaliser d'abord une mosaïque avec les extraits, puis la géoréférencer ; ou bien géoréférencer chaque extrait un à un avant d'en faire une mosaïque automatiquement grâce à la référence spatiale qu'ils intègrent. La première option est écartée car la projection, dans *Google Earth*©, des images sur une sphère entraîne un décalage systématique d'une capture d'écran à une autre. Pour pallier ce problème, il faudrait donc recaler chaque image par rapport à celles qui l'encadrent, ce qui revient à faire deux fois la même opération (recalage des extraits relativement les uns par rapport aux autres puis géoréférencement de la mosaïque). Dès lors, autant géoéréférencer d'abord chaque capture d'écran séparément puis les assembler en mosaïque en se basant sur les informations spatiales contenues dans chaque image.

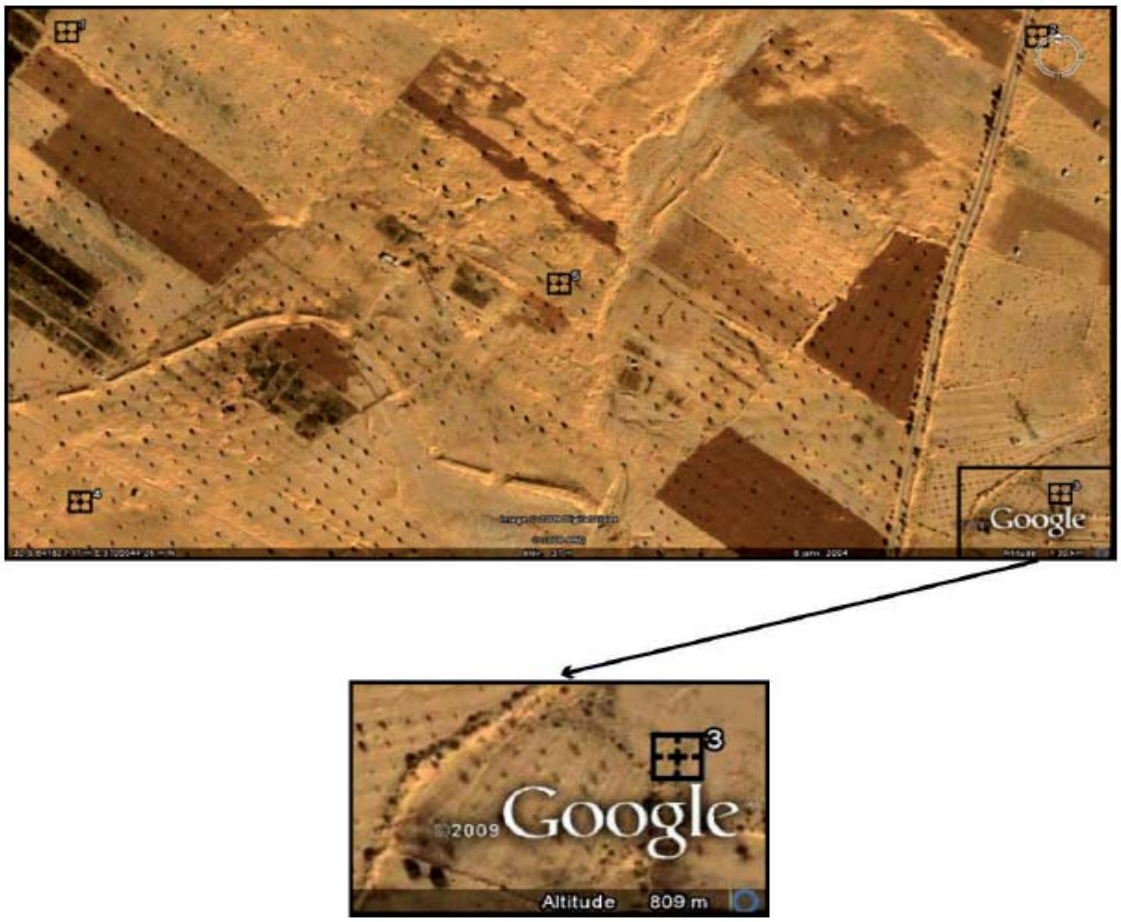


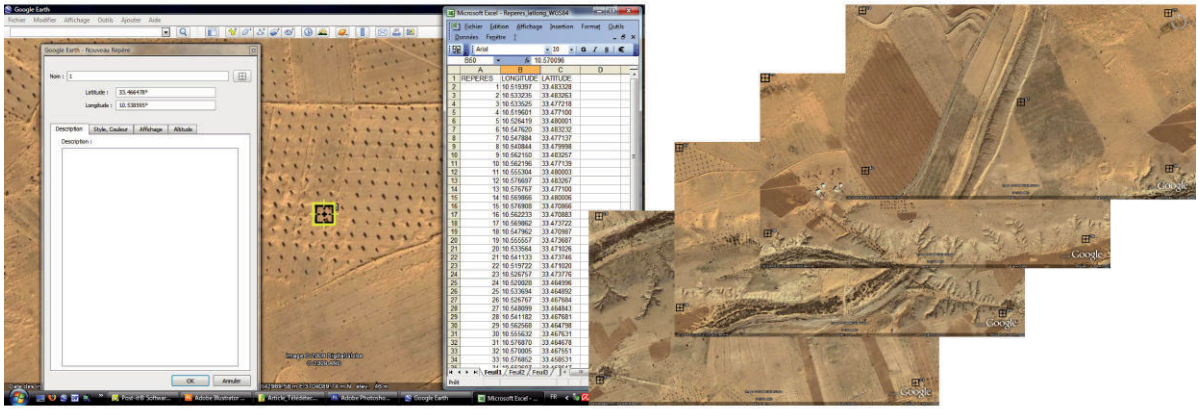

Figure 5 : Exemple d'image extraite et de point d'amer inséré dans *Google Earth*©. Lignes par colonnes de l'extrait : 875 × 1440.
*Figure 5: Extracted image with GCP inserted in* Google Earth©. *Lines by columns: 875 × 1440.*

C'est donc cette démarche qui a été suivie (Figure 6). Elle commence dans *Google Earth*© : lorsque l'on insère un repère, une fenêtre s'ouvre où l'on peut renseigner le nom du repère (nous lui donnons un numéro), sa forme (nous avons choisi une croix incluse dans un carré) et où s'affichent les coordonnées qui s'actualisent en fonction de l'endroit sur l'écran où l'on positionne le repère. Par *copier/coller*, on relève ces coordonnées que l'on enregistre dans un tableur Excel. Cette opération est répétée autant de fois qu'il y a de repères par image, puis autant de fois qu'il y a d'extraits enregistrés.

La base de coordonnées ainsi obtenue est en Lat/long WGS84. Il faut ensuite convertir le fichier au format texte et utiliser l'outil *ASCII coordinate conversion* de ENVI™ pour obtenir un fichier avec les coordonnées dans le système voulu (en l'occurrence UTM Carthage). On effectue alors l'opération de géoréférencement à l'aide de l'outil *Map/registration/Image to map* en précisant que l'arrière-plan doit être affecté de la valeur 255 (pour être blanc), puis on assemble les images en une seule mosaïque en utilisant l'outil *Basic tools/mosaicking/georeferenced*, en précisant que la procédure doit ignorer la valeur 255 au moment de l'assemblage, afin d'éviter les effets de bord entre les extraits. Une correction radiométrique est ensuite appliquée à l'ensemble de la mosaïque. Cette procédure permet d'obtenir une image « propre », homogène et exploitable pour une photo-interprétation ou des traitements morphologiques, voire une classification, même si les incertitudes concernant les paramètres radiométriques des images de *Google Earth*© rendent cette opération plus délicate à envisager.

La qualité du géoréférencement est le second critère qui nous intéresse ici puisque nous voulons mettre en place un SIG combinant des données provenant d'autres sources. Le géoréférencement est validé par comparaison avec les points relevés sur le terrain le long des pistes et des routes (Figure 7). Cette comparaison révèle que l'erreur de positionnement est de l'ordre de 5 m en longitude et 15 m en latitude. Ces derniers chiffres sont à mettre en rapport avec ceux obtenus lors de la vérification de la précision du GPS (cf. *supra*) qui pourraient nuancer la critique du géoréférencement, puisque le GPS qui sert de référence n'est lui-même pas parfaitement précis. Ces résultats montrent que la méthode suivie permet d'obtenir une information spatiale de qualité, compte tenu des incertitudes difficilement solvables qui accompagnent chaque étape de la procédure.

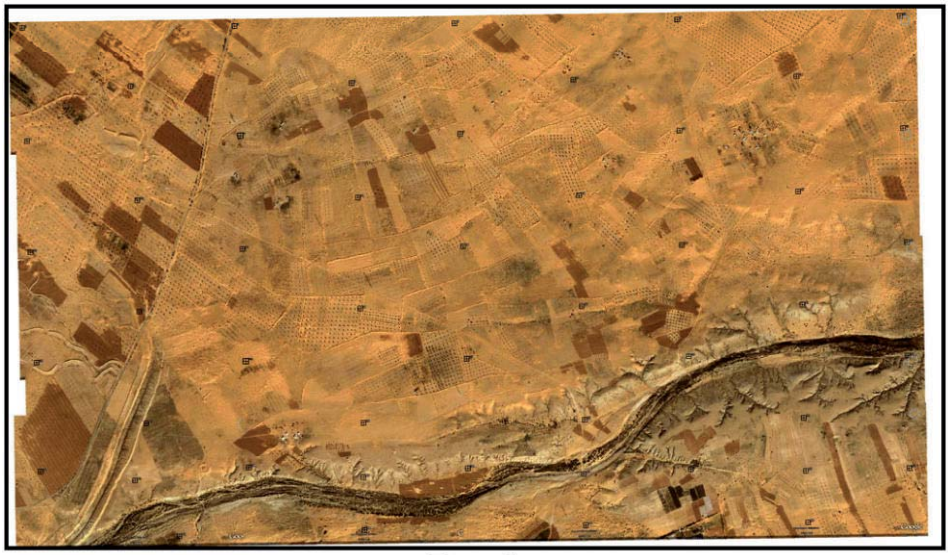
Etape 1)
Enregistrement, sous *Google Earth*, au format .jpg des extraits qui vont composer la mosaïque
Chaque extrait contient 5 points d'amer dont les coordonnées (en Lat/long WGS84)
ont été relevées dans un fichier Excel



Etape 2)
Conversion du fichier des coordonnées à l'aide de l'outil "ASCII coordinates conversion" de *ENVI*
Géoréférencement des captures d'écran de *Google Earth* sous ENVI à l'aide des repères



Etape 3)
Réalisation d'une mosaïque automatique par géoréférencement et amélioration radiométrique sous *ENVI*



Etape 4)
Utilisation des images obtenues pour traitement sous *ArcGIS*, *ENVI* ou *Aphelion*

Figure 6 : Procédure suivie pour obtenir des images exploitables depuis *Google Earth*©.
*Figure 6: Procedure used to obtain usable images from* Google Earth©.

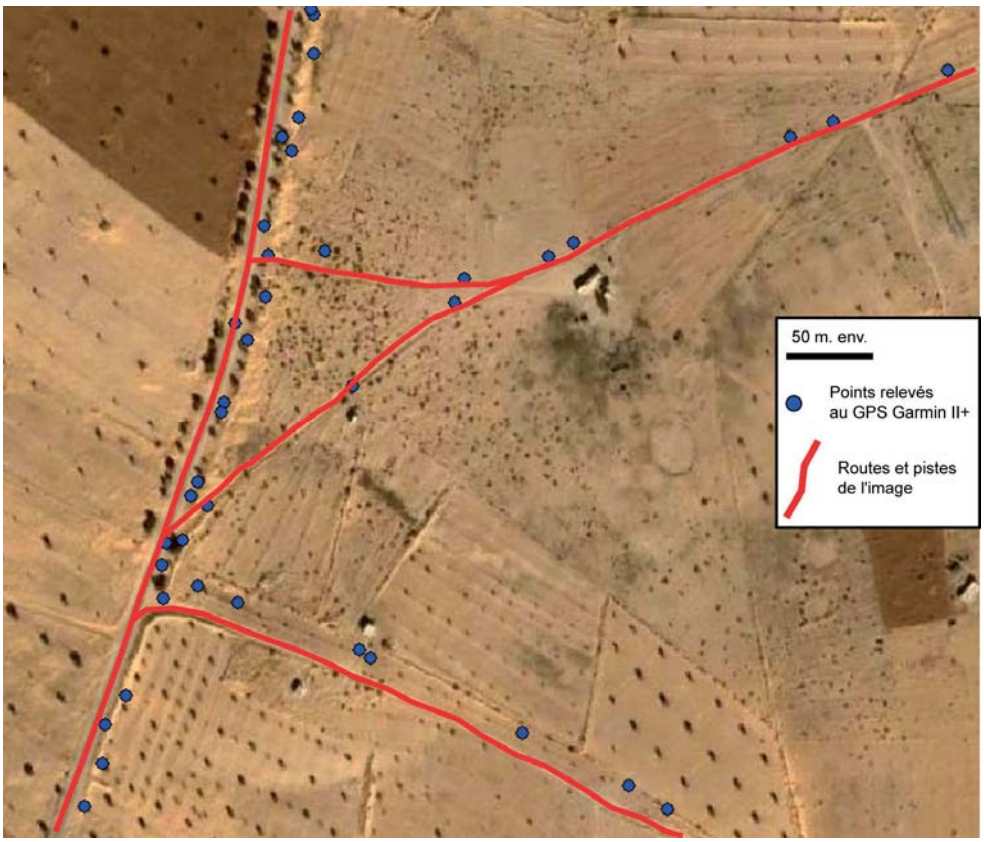



Figure 7 : Evaluation de la qualité du géoréférencement des extraits composant la mosaïque ; comparaison des routes GPS et des routes de l'image
*Figure 7: Estimation of the quality of the georeferencing for extracts used to perform the mosaic; comparison between GPS tracks and roads on the image.*

### 4.3. Traitements appliqués à la mosaïque

En mettant en forme les images *Google Earth*©, nous obtenons donc une mosaïque dont la résolution est de l'ordre de 1 m par pixel. Une telle résolution permet d'appréhender des objets, des formes et des contours indétectables dans des résolutions plus grossières. En conséquence, des traitements complémentaires à des traitements du signal sont possibles. Ils vont permettre de poser les bases d'une interprétation quantitative des paramètres qui nous intéressent sur la zone. A titre d'illustration nous en présentons deux :

- le parcellaire agricole de la zone considérée a été vectorisé à partir de l'interprétation de l'image. On a ainsi relevé 459 parcelles sous la forme de polygones distincts (Figure 8). Cette couche vecteur est intégrée au SIG et fournit le support des traitements ultérieurs, les parcelles correspondant aux individus ;

- une application des méthodes de la MM à l'extraction des oliviers, repérés à leur ombre portée (Figure 9), et des formes d'ensablement des parcelles (Figure 10). Les images ainsi obtenues sont ensuite intégrées au SIG afin de compiler les données qu'elles contiennent pour créer des cartes thématiques.

### 4.4. Cartes thématiques

Tel qu'il est présenté ici, le SIG comporte 4 couches : la mosaïque initiale, le parcellaire (Figure 8), les oliviers extraits (Figure 9) et les formes d'ensablement. Il est destiné à être complété par diverses données obtenues lors de recherches ultérieures.

Dans la perspective d'utiliser les images fournies par *Google Earth*© afin d'analyser les paramètres de l'ensablement de cette zone d'oliveraies, l'état présent du SIG nous permet toutefois de réaliser un certain nombre de cartes thématiques. Ces dernières constituent un état de référence de cet ensablement susceptible d'être exploité dans le cadre d'un suivi. Il est le préalable à un diagnostic paysager. Il est enfin fondé sur des données quantitatives obtenues automatiquement pour la plupart, donc *a priori* comparables.

Les cartes thématiques que nous présentons sont donc :

- une carte de la densité d'oliviers sur la zone de travail (Figure 11) ;

- une carte croisant l'information de la densité d'oliviers par parcelle et les formes d'ensablement (Figure 12).

Elles visent à montrer comment, à partir d'une donnée gratuite et accessible à tous, des traitements adéquats permettent de générer une information pertinente et utile dans le cadre de recherches sur les processus bio-physiques affectant le paysage.




Figure 8 : Parcellaire agricole de la zone de travail dessiné par photo-interprétation.
*Figure 8: Agricultural parcel plan drawn by photo-interpretation for the studied area.*

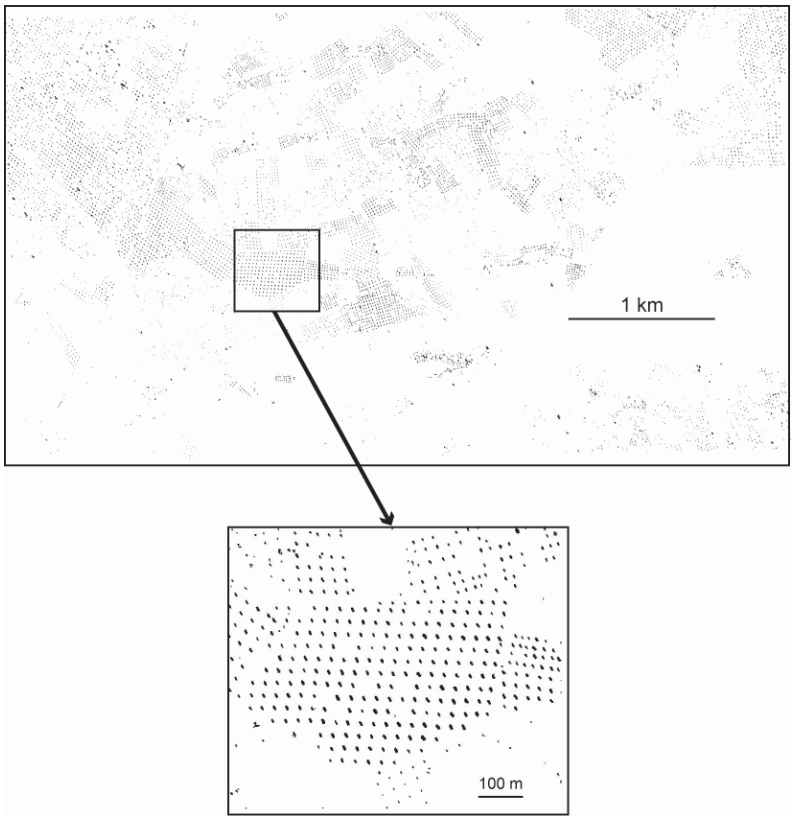



Figure 9 : Oliviers extraits depuis la mosaïque par les outils de la *Morphologie Mathématique*.
*Figure 9: Olive trees extracted from the mosaic using tools from* Mathematical Morphology.

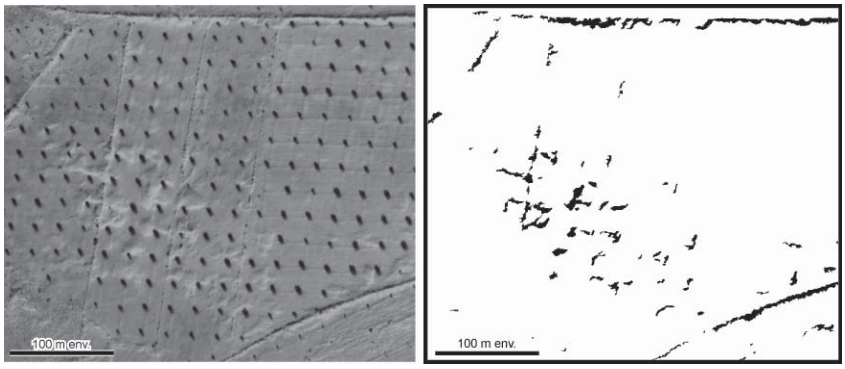



Figure 10 : Formes éoliennes extraites depuis un zoom de la mosaïque.
*Figure 10: Aeolian forms extracted from a zoom of the mosaic.*

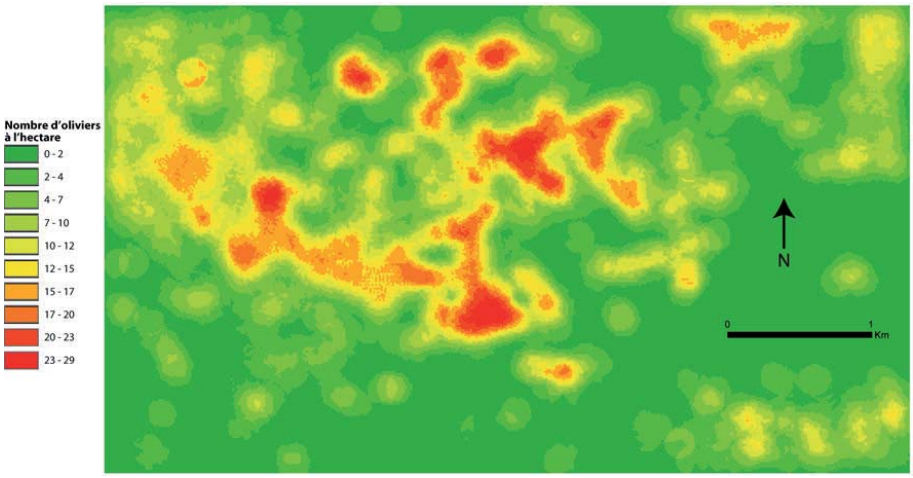



Figure 11 : Densité des oliviers sur la zone de travail.
*Figure 11: Density map of olive trees on studied area.*

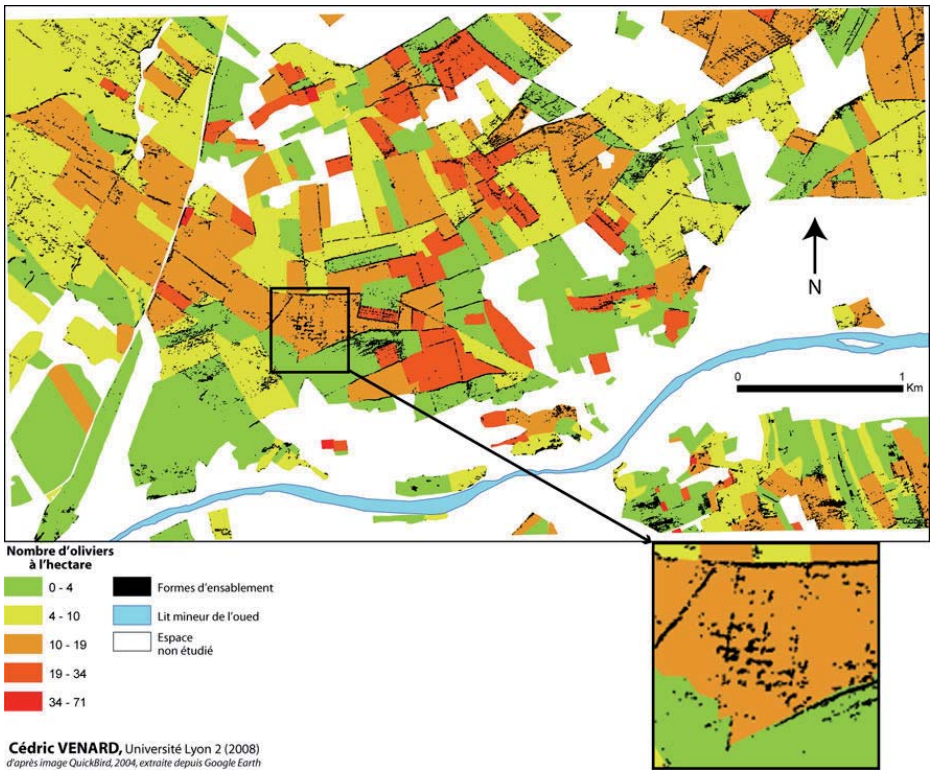



Figure 12 : Densité des oliviers et ensablement accumulé par parcelle agricole.
*Figure 12: Density map of olive trees for each agricultural parcel.*

# 5. DISCUSSION

## 5.1. Intérêt des extraits de *Google Earth*© en tant que donnée.

Le présent travail a montré les possibilités d'exploitation des images *Google Earth*©. Les difficultés et contraintes liées à l'extraction des images depuis le logiciel ne sont pas rédhibitoires. Néanmoins, plus la zone à étudier est étendue, plus le travail pour obtenir une image à très haute résolution spatiale est important. Le géoréférencement de ces images dans *Google Earth*© peut être considéré comme bon, suffisamment fiable pour que, même à partir d'images à 1 m de résolution spatiale, la correspondance avec le terrain via un GPS soit satisfaisante.

D'un point de vue spatial, *Google Earth*© apparaît donc comme suffisamment précis. La principale critique que l'on peut émettre envers ces images vient de leurs caractéristiques radiométriques : incertitudes quant aux traitements de mise en forme opérés par *Google Earth*© et surtout trop faible résolution spectrale, les seuls canaux disponibles lors de l'enregistrement étant les trois couleurs du format *JPEG* : le rouge, le vert et le bleu. De surcroît, certaines images sont mises en ligne sans aucune rectification colorimétrique et présentent parfois de fortes teintes dominantes.

Il ressort donc que, au-delà des avantages liés à son utilisation, *Google Earth*© ne permet pas de se passer d'images satellites « brutes », dès lors que l'analyse est orientée vers un traitement du signal.

## 5.2. Intérêt des résultats obtenus.

D'un point de vue thématique, l'exploitation des images *Google Earth*© nous a permis, par l'accès à une très haute résolution spatiale, de poser les bases d'un diagnostic paysager, préalable à un suivi analytique. L'échelle que nous présentons ici peut être qualifiée d'intermédiaire, mais les méthodes que nous avons suivies peuvent s'appliquer à différentes échelles. La très haute résolution spatiale permet d'accéder aux petites formes et ainsi de définir des indicateurs paysagers adaptés à chaque échelle d'analyse.

L'utilisation conjointe de la télédétection et des SIG quant à elle permet d'intégrer les échelles d'analyse et d'extrapoler les résultats. Les images *Google Earth*© offrent la possibilité d'inclure une échelle de transition entre les données du terrain et les images satellites à résolution décamétrique. La gratuité de l'accès à ces images et la possibilité de les exploiter dans le cadre de recherches (à la condition de mentionner la source de ces images) en font un outil amené probablement à être de plus en plus utilisé.

## 5.3. Perspectives.

Le travail présenté ici montre que les possibilités attachées à l'exploitation des images *Google Earth*© sont nombreuses et dépassent la simple illustration. Il est possible de formater ces images pour en faire une donnée utilisable à des fins de recherche. Les limites soulevées sont contraignantes mais pas rédhibitoires.

Deux points peuvent être avancés qui permettent d'envisager des recherches sur la base de ce produit :

- les méthodes que nous avons présentées peuvent être utilisées pour faire des tests sur de petites zones et ainsi cibler le potentiel d'un site envisagé, avant de travailler sur une grande surface en faisant l'acquisition de « vraies » images satellite ;

- la contrainte de la disponibilité des images à très haute résolution est la plus problématique. *Google Earth*© est mis à jour régulièrement, mais tout le globe n'est pas encore couvert par du *QuickBird* ou de l'*Ikonos*. Néanmoins, cette contrainte n'est rédhibitoire que dans le cas de recherches régionales, où un secteur précis veut être étudié. Dans le cas de recherches thématiques, comme dans ce travail, il est possible d'échantillonner dans les secteurs où la très haute résolution est disponible.

Enfin, dans un contexte universitaire, les atouts pédagogiques de *Google Earth*© peuvent être soulignés. Il permet en effet l'accès à des images gratuites, mais dont l'utilisation requiert un certain nombre de manipulations qui sont toutes propres à former les étudiants à la rigueur, au suivi de protocole et à la critique vis-à-vis de la donnée.

# 6. CONCLUSION

Cet article a cherché à poser les bases méthodologiques de l'utilisation des images *Google Earth*©. Leur exploitation a montré leurs potentiels, leurs limites et les contraintes et les erreurs qui leur sont associées. *Google Earth*© apparaît dès lors comme une belle opportunité de mener des recherches, qu'elles soient préliminaires ou au cœur du projet, à moindre coût mais avec des résultats satisfaisants.

Parmi les limites de ces images, nous retiendrons surtout les incertitudes liées à leur traitement radiométrique, à leur faible résolution spectrale et à l'impossibilité d'effectuer des études diachroniques, sauf en obtenant par d'autres biais des images plus anciennes. D'un autre côté, leur très haute résolution spatiale faisant apparaître des objets à une échelle extrêmement fine, les méthodes de détection de contours semblent justifiées par rapport aux méthodes de traitement du

signal. La *Morphologie Mathématique* permet alors de s'affranchir des incertitudes radiométriques tout en offrant des outils adaptés à l'analyse d'objets à des échelles aussi précises.

La diffusion croissante d'images à très haute résolution spatiale semble devoir s'accompagner d'une plus grande utilisation de ces outils, y compris dans les sciences humaines. Les possibilités en terme d'approche spatiale qui sont offertes par ces méthodes sont très prometteuses.

Enfin, la couverture incomplète offerte par *Google Earth*© en images hautes résolution limite les possibilités d'étude sur un secteur précis, ou tout au moins la rend tributaire de l'existence d'une image couvrant le secteur. Elle est par contre bien moins gênante lors d'approches thématiques où la nécessité d'étudier un lieu précis est remplacée par celle de trouver un objet précis (par exemple des aires ensablées) identifiable sur des images à haute définition. Ce type d'approche permet de choisir un site d'étude en fonction des images disponibles

## 7. REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier particulièrement l'Institut des Régions Arides de Médenine (Tunisie), en la personne de son directeur M. Houcine Khatelli, et M. Mohammed Ouessar, responsable de l'unité télédétection et SIG de l'IRA, pour leur aimable facilitation des relevés de terrain utilisés dans ce travail

## REFERENCES

Auclair L., Chaize-Auclair M., Delaître E., Sandron F. (1996), « Dynamique sociale et désertification, le cas de Menzel Habib dans le sud tunisien". *Revue des régions arides*, Institut des Régions Arides, Médenine, 8 p.

Bernus E. (1984), « Les causes de la désertification, les thèses en presence ». *Bulletin de la société languedocienne de géographie*, vol. 18, Montpellier, 8 p.

Callot Y., Mering C., Simonin A. (1994), "Analysis of sand hills massifs on high resolution images : an application to the Great Western Erg (Algeria)". *International Journal of Remote Sensing*, vol. 15, n° 18, pp. 3799–3822.

Compieta P., Di Martino S., Bertolotto M., Ferrucci F., Kechadi T. (2007), "Exploratory spatio-temporal data mining and visualization". *Journal of visual languages and Computing*, vol. 18, pp. 255-279.

Conroy G.C., Anemone R.L., Van Regenmorter J., Addison A. (2008), "Google Earth©, GIS, and the Great Divide : A new and simple methode for sharing paleontological data". *Journal of Human Evolution*, vol. 55, pp. 751-755.

Drouot J-L. (1994), Application de la Morphologie Mathématique à la cartographie dunaire dans le Grand Erg Occidental à partir d'une image SPOT panchromatique. Mémoire de Maîtrise sous la direction de Y. Callot, Université de Tours, 133 p.

Escadafal R. (1989), *Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et télédétection.* Etudes et Thèses, Editions de l'ORSTOM, Paris, 317 p.

Floret Ch., Pontanier R. (1982), *L'aridité en Tunisie pré–saharienne, climat, sols, végétation et aménagements*. Travaux et documents de l'ORSTOM, n°150, Paris, 552 p.

Genin D., Guillaume H., Ouessar M., Ouled Belgacem A., Romagny B., Sghaier M., Taâmallah H. (Ed.) (2006), *Entre désertification et développement, la Jeffara Tunisienne*. IRD-CERES-IRA, 351 p.

Jacqueminet C., Mering C. (1989), « Définition d'indicateurs morphologiques sur des images satellitaires du Sahel ». *Photo-Interprétation* 5 et 6, fasc. 2, pp. 23 – 28.

Lisle R.J. (2006), "Google Earth© : A new geological resource". *Geology today*, vol. 22, pp. 29-32

Luedeling E., Buerkert A. (2008), "Typology of oases in northern oman based on Landsat and SRTM imagery and geological survey data". *Remote sensing of environment*, 112, pp. 1181-1195

Mering C. (1998), *Images satellitaires et analyse spatiale (Volume 1).* Université Denis Diderot Paris VII (HDR), 689 p.

Mering C., Oulehri T. (1994), *Cartographie automatique des barkhanes à partir d'images SPOT panchromatique l'exemple du Cap Juby au Maroc*. Actes du 2e Colloque Africain sur la recherche en informatique, Ouagadougou, pp. 605–628.

UNCCD (1994), Convention internationale sur la lutte contre la désertification. Organisation des Nations Unies, site de la convention : www.unccd.int (consulté en 2008), 65 p.

Rognon P. (1994), *Biographie d'un désert*. L'Harmattan, Paris, 347 p.

ROSELT/OSS (2004), Document Scientifique n° 3, Concepts, méthodes et mise en œuvre pour un SIEL (Système d'Information sur l'Environnement à l'échelle Locale). ROSELT/OSS, Montpellier, 70 p.

Serra, J. (1982), *Image analysis and mathematical morphology*. Academic Press, London, New-York, 600 p.

Sheppard S.R.J. et Cizek P. (2009), "The ethics of *Google Earth*© : Crossing thresolds from spatial data to landscape visualization". *Journal of environmental management*, vol. 90, pp. 2090-2101.

Venard C., Delaître É., Mering C., Callot Y. (2009), Using *Mathematical Morphology* methods in order to define landscape indicators from VHR images. Accepted for presentation. 10th European Congress of Stereology, Milan, 22-26 juin.