

La géovisualisation interactive basée sur le SIG 3D et le GeoVRML : une approche pour l'analyse des morphostructures

Le Web et la visualisation géospatiale 3D

■ Tarek SLAMA et Noamen REBAI

Le(s) SIG 3D et la réalité virtuelle (RV) constituent actuellement une puissante combinaison pour la visualisation, l'analyse et la diffusion sur le Web de données géospatiales tridimensionnelles. Dans cette étude, plusieurs morphostructures salifères du Nord de la Tunisie sont étudiées en se basant sur leurs MNTs pour visualiser des modèles 3D de terrain et extraire certains paramètres morphométriques. L'ensemble est converti au format GeoVRML pour la visualisation interactive dans un navigateur Web. Les scènes GeoVRML 3D produites montrent une grande facilité d'utilisation ainsi qu'un niveau élevé de précision. Le but est, en effet, de révéler l'importance et la puissance de cet outil dans les sciences de la terre et essentiellement dans les domaines de l'analyse spatiale 3D et de la cartographie géologique interactive sur le Web.

■ MOTS-CLÉS

SIG, scènes 3D, GeoVRML, visualisation, Web, morphostructures, Tunisie.

Les produits SIG 2D étaient pendant longtemps le seul support pour observer, traiter et analyser l'information géographique. Cela n'est plus le cas aujourd'hui grâce à l'évolution des méthodes classiques d'analyse spatiale et l'apparition de nouvelles technologies d'acquisition de l'information tridimensionnelle comme l'altimétrie laser, les sondeurs multifaisceaux et les puissantes techniques de la photogrammétrie numérique.

De ce fait, les sources d'informations deviennent abondantes et beaucoup plus précises mais aussi de taille importante. De plus, le recours aux techniques de la visualisation 3D interactive et dynamique devient une exigence pour plusieurs types d'analyses de l'information géographique (Jones et al., 2009 ; Tonini et al., 2009 ; Zanchi, et al., 2009).

La visualisation tridimensionnelle et l'analyse spatiale 3D de l'information géographique géoréférencée sont

parmi les approches les plus importantes qui ont actuellement révolutionné les Systèmes d'Information Géographique (SIG). La modélisation et la visualisation 3D des phénomènes présentant un grand niveau de complexité constituent des approches analytiques fort intéressantes favorisant la compréhension du phénomène en question (Appleton et al., 2002).

Jusqu'à tout récemment les possibilités "logicielles" pour la visualisation tridimensionnelle des entités géographiques n'étaient pas aisément disponibles pour les utilisateurs des SIG (Sheppard, 2000). Actuellement, l'intégration de la visualisation 3D avec les SIG devient évidente et intéresse plusieurs plates-formes SIG commerciales (Brown, 1999 ; Appleton et al., 2002 ; Tonini et al., 2009 ; Zanchi et al., 2009).

D'autre part, la croissance rapide du Web et en particulier celle des langages de modélisation de la réalité virtuelle (notamment VRML ou Virtual Reality

Modeling Language, qui est parmi les standards Web pour la création d'"univers virtuels" tridimensionnels), offrent de nouvelles voies pour la visualisation 3D des entités géographiques via Internet (Huang et al., 2001). La réalité virtuelle (RV) combinée avec la diffusion des visualisations 3D à travers le Web permettent un large accès aux données spatiales géoréférencées et donnent un autre sens, encore plus large et plus puissant, à l'aide à la décision (Al-Kodmany, 1999 ; Appleton et Lovett, 2004).

Le VRML a évolué rapidement vers le GeoVRML (VRML Géographique, créé en 1998) pour permettre la modélisation et la représentation 3D de l'information géographique géoréférencée sur le Web (Huang et Lin, 1999 ; Rhyne, 1999). Cette importante innovation technologique rend la visualisation tridimensionnelle du terrain beaucoup plus accessible du fait que le modèle GeoVRML peut être visualisé sur n'importe quel ordinateur. Il suffit d'avoir la configuration nécessaire permettant cette tâche. Actuellement, la génération du VRML/GeoVRML est intégrée dans plusieurs logiciels et plates-formes SIG (ArcGIS avec son module ArcScene ou ERDAS Imagine avec son module VirtualGIS).

Plusieurs travaux s'intéressent de plus en plus à cette combinaison SIG et VRML/GeoVRML, ce qui a engendré évidemment la naissance du SIG-VRML (Martin et Higgs, 1997). De nombreuses applications font appel à cette approche qui intègre le SIG (2D, 2.5D et 3D) et la réalité virtuelle (VRML et GeoVRML). Dans le domaine de l'urbanisme cette



technique a été largement utilisée pour la visualisation, la planification et la gestion urbaine, ainsi que pour la création de cités entièrement virtuelles (Doyle et al., 1998 ; Al-Kodmany, 1999 ; Morrison et Purves, 2002 ; Appleton et Lovett, 2004) et pour l'étude de l'impact du changement climatique au sein d'un paysage rural (Dockerty et al., 2004). D'autres domaines ont utilisé le SIG et la RV pour avoir de nouvelles perspectives d'analyse des données géographiques de différentes sources comme par exemple : la modélisation des sols (Grunwald et Barak, 2001), la cartographie dynamique et interactive sur le Web (Fairbairn et Parsley, 1997 ; Mitás et al., 1997), le développement d'outils de RV pour l'éducation (Moore et al., 1999), la visualisation et la gestion des systèmes forestiers (Lim et Honjo, 2003), la visualisation des scènes 3D à partir de modèle numérique de terrain (Honjo et Lim, 2001 ; Morrison et Purves, 2002) et l'aménagement du paysage sur Internet (Honjo et Lim, 2004).

La présente étude détaille une approche de visualisation tridimensionnelle des morphostructures triasiques du Nord de la Tunisie. Elle est basée sur la combinaison du SIG 3D, qui est le support de la création des scènes 3D à partir du MNT, et du GeoVRML qui est un standard Web assurant une visualisation dynamique et interactive des scènes 3D géoréférencées. Le but étant de produire des modèles 3D au format GeoVRML de certains reliefs présentant une structuration géologique et géomorphologique assez complexe (les extrusions triasiques de la "Zone des diapirs" en Tunisie septentrionale) et d'évaluer cette technique de visualisation et de diffusion sur Internet de l'information géoréférencée dans le domaine de l'analyse morphostructurale.

Le contexte

La production des modèles VRML/GeoVRML des massifs de la zone d'étude entre dans le cadre :

- de la mise en place d'une nouvelle approche d'analyse morphostructurale basée sur la visualisation interactive des données géospatiales des

reliefs étudiés qui font partie de la Tunisie septentrionale, en se basant sur l'exploitation des potentialités des SIG 3D combinés avec la technologie GeoVRML de diffusion sur le Web ;

- d'une future implantation dans le site Web des unités de recherche ayant des activités cartographiques orientées vers le web afin d'assurer une large diffusion et plus d'accessibilité à l'information géographique et d'une manière plus dynamique et plus interactive ;
- de rendre l'accès aux données géographiques 3D plus facile et plus dynamique ;
- d'échanger de l'information tridimensionnelle à travers des groupes d'utilisateurs sur Internet sans recours aux logiciels SIG pour visualiser et analyser son contenu (il suffit de posséder un navigateur Web).

La réalité virtuelle et l'information géographique : le GeoVRML

■ Le VRML

Pour mieux comprendre l'environnement réel existant il faut le visualiser. La création d'un environnement virtuel ou d'une réalité virtuelle permet toutefois de simuler cette réalité en utilisant des objets virtuels. Les langages de modélisation de la réalité virtuelle (comme VRML) permettent d'atteindre ce but.

La réalité virtuelle est une approche multisensorielle et interactive qui constitue un environnement particulier et fascinant basé sur l'interaction entre le Web et l'outil informatique dans lequel l'utilisateur devient un participant actif dans un univers totalement virtuel conçu sur des normes réelles et géoréférencées (Rhyne, 1997 ; Raper et al., 1999). Avec la RV l'utilisateur peut naviguer dans des environnements ambients présentant parfois une grande ressemblance avec le monde réel et allant même, dans un niveau assez avancé, jusqu'à proposer de nouveaux scénarios d'aménagements dans un espace 3D totalement virtuel (Appleton, 2004).

Le VRML est un langage approprié pour les navigateurs Web afin d'effectuer

des visualisations interactives et dynamiques. Il est considéré comme une technologie à part entière qui a révolutionné le "SIG-WEB" ou la cartographie numérique sur Internet surtout avec ses potentialités de visualisation dynamique et d'analyse spatiale 3D (Brown, 1999 ; Huang et Lin, 2002).

En 1996, le VRML 2.0 a été accepté comme une norme standard de visualisation sur le Web sous l'appellation VRML 97. Les fichiers VRML peuvent être consultés et visualisés dans une interface Web, en utilisant un navigateur Internet et un module d'extension (plug in) VRML. Le navigateur VRML permet à l'utilisateur de visualiser les objets tridimensionnels d'une manière interactive et suivant n'importe quelle direction et angle de vue. Les capacités du VRML incluent l'animation interactive 3D, la visualisation à partir de différents angles de vues, l'utilisation de textures pour l'habillage des objets 3D et la possibilité d'interaction avec d'autres plates-formes de type "JavaScript" pour les opérations d'analyses spatiales tridimensionnelles (Huang et Lin, 2002).

Un modèle VRML consiste en un ou plusieurs fichiers présentant conventionnellement le suffixe ".wrl" qui décrivent la géométrie et les attributs des objets dans un univers tridimensionnel bien défini. Les nœuds dans un fichier VRML constituent la composante fondamentale. Ils peuvent être de différents types et sont utilisés pour définir plusieurs paramètres comme les formes, les textures et les relations entre entités (Fairbairn et Parsley, 1997 ; Lange, 2001).

Le fichier VRML peut être créé avec un éditeur de texte ordinaire en utilisant le format caractériel standard ASCII. Ensuite, il est traité et compilé dans un navigateur Web pour visualiser les objets ainsi définis.

La structure "squelettique" d'un fichier VRML typique prend la forme suivante (Le consortium Web3D, 2007) :

- #VRML v2.0 utf 8 (ligne de l'entête du fichier ou MIMEType)
- Objets (sont des nœuds décrits par des champs)
- Group {

```

Children [
]
}
- Définition des caractéristiques
  des nœuds
  - Forme
  - Géométrie
  - Apparence
- Système de coordonnées
- Transformations
  - Translation
  - Rotation
  - Echelle
- Index Face sets
  - Grille des altitudes

```

Plus de détails sur la structuration d'un code source VRML se trouvent sur le site du consortium Web3D (www.web3d.org).

■ Le GeoVRML

Le GeoVRML, qui est le VRML géographique, présente de nouvelles caractéristiques dont l'intégration de données de différentes sources dans un contexte unique, simple et global. Il supporte les systèmes de coordonnées géographiques du type latitude/longitude et UTM. Le but est de permettre la représentation et la visualisation d'informations géographiques géoréférencées, comme les modèles 3D produits à partir du MNT et les cartes, dans un navigateur Web.

Les potentialités du GeoVRML sont incorporées dans une dizaine de nœuds permettant une meilleure représentation des données géographiques que celle réalisée par le VRML standard. L'ensemble des nœuds est exposé brièvement dans le tableau 1.

SIG 3D et extraction de l'information morphostructurale

■ Zone d'étude

La région étudiée, le secteur de Mejez el Bab, se situe en Tunisie septentrionale (Figure 1). Elle correspond à une partie du domaine géographique de la Moyenne Mejerda et fait partie de la "Zone des diapirs". Elle présente des structures qui s'intègrent dans l'avant-pays de la chaîne alpine nordique. C'est

Nœuds	Utilités
GeoCoordinate	Incorporation du système de coordonnées
GeoElevationGrid	Définition du champ des altitudes
GeoLocation	Localisation spatiale du modèle
GeoLOD	Visualisation des détails du modèle
GeoMetadata	Intégration des métadonnées sur le modèle
GeoOrigin	Positionnement plus précis
GeoPositionInterpolator	Animation du modèle
GeoTouchSensor	Manipulation de coordonnées
GeoViewpoint	Spécification d'un angle de vue
InlineLoadControl	Module de chargement du modèle

Tableau 1. Les nœuds du modèle GeoVRML.

une région qui englobe plusieurs corps triasiques, autour desquels se sont développées des structures anticlinales et synclinales variées, ainsi que des fossés d'effondrements à remplissage tertiaires et quaternaires.

L'emplacement de cette région, entre la chaîne alpine au nord et l'Atlas tunisien à fossés au centre de la Tunisie, permet d'étudier les différents types de déformation dans l'avant pays des chaînes nordiques de Kroumirie et des Mogods.

La région de Mejez el Bab, comme le reste de la "zone des dômes", présente un grand intérêt minier. Plusieurs massifs triasiques font partie de cette zone dont Jebel el Mourra (Figure 2), Jebel Kechtilou et Jebel Jebbs (Figure 3), et sont caractérisés par une configuration morphostructurale assez complexe et intéressante pour une étude géomorphologique et morphostructurale.

■ Approche méthodologique

Un SIG 3D est un environnement capable d'analyser l'information spatiale 3D issue de la réalité géographique (Verbree et al., 1999). Il trouve largement son application dans plusieurs domaines présentant des phénomènes naturels assez complexes. En géologie, par exemple, les structures triasiques extrusives, les bassins d'effondrements, les structures cassantes à ampleur kilométrique présentent des géométries structurelles complexes.

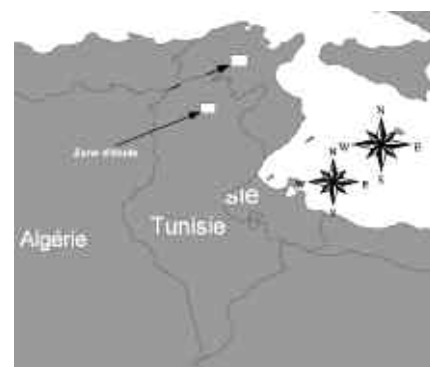


Figure 1. Localisation de la zone d'étude : région de Mejez el Bab, Nord de la Tunisie.

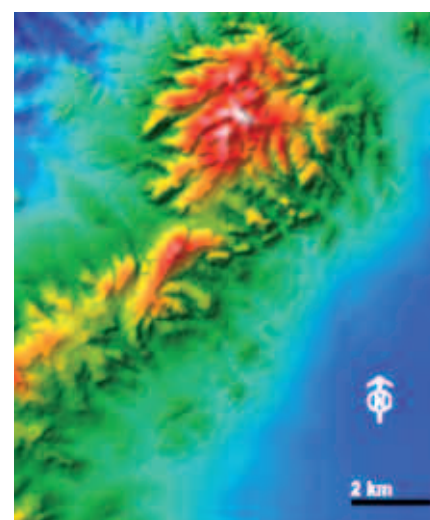


Figure 2. Modèle numérique de terrain (MNT) de Jebel el Mourra, Sud de Mejez el Bab. La résolution est de 10 m (RMSE = 1,2 m), la projection cartographique est dans le système de coordonnées UTM, zone 32. Source : carte topographique scannée n° 27, résolution raster = 300 dpi.

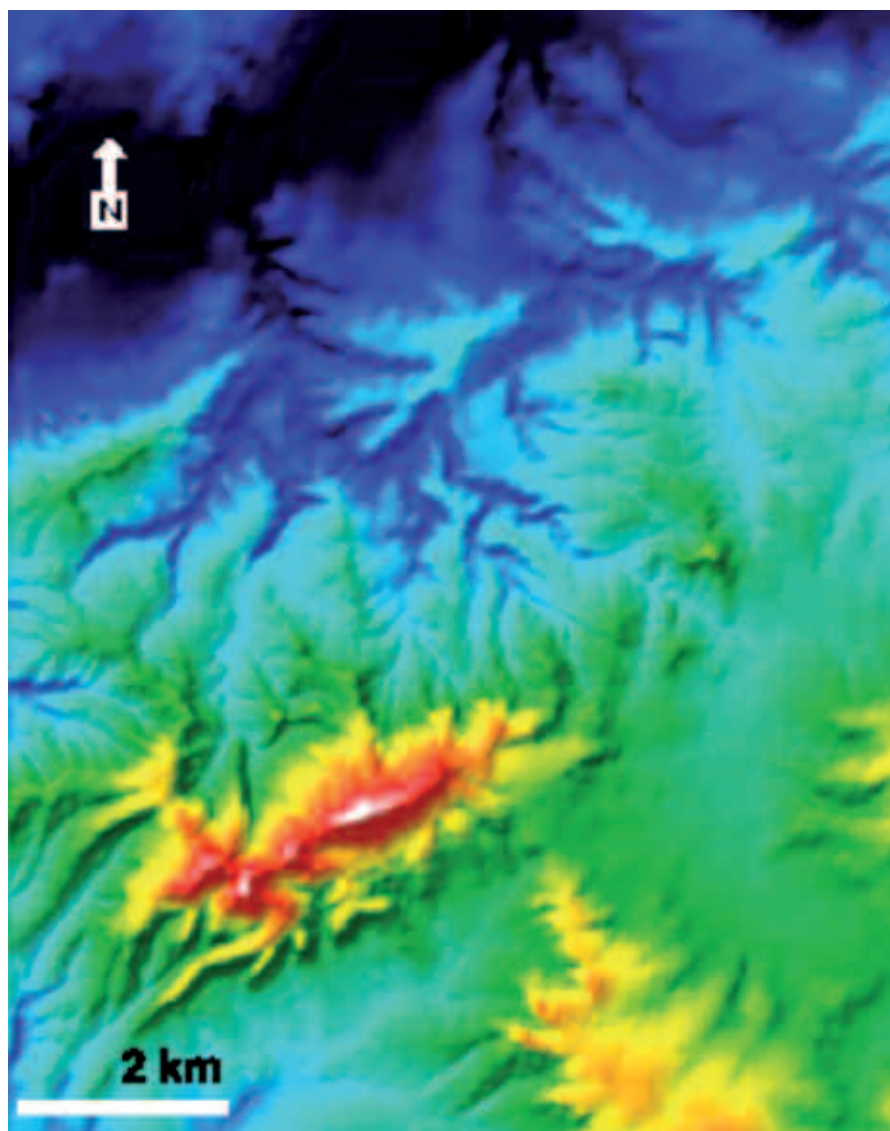


Figure 3. Modèle numérique de terrain (MNT) de Jebel Kéchtitou-Jebel Jebes, Sud ouest de Mejez el Bab. La résolution est de 10 m (RMSE = 1,2 m), la projection cartographique est dans le système de coordonnées UTM, zone 32. Source : carte topographique scannée n° 27, résolution raster = 300 dpi.



En géomorphologie structurale, de nombreux paramètres de nature quantitative, qui sont qualifiés de “paramètres géomorphométriques”, sont indispensables pour l’étude de la relation qui existe entre la morphologie du relief et la tectonique locale (Deffontaines et Chorowicz, 1991 ; Montgomery et Greenberg, 2000 ; Grohmann, 2004).

Il a été démontré que la configuration du relief peut exprimer cette interaction entre phénomènes endogéniques (tectonique) et exogéniques (érosion) sous forme de plusieurs paramètres morphométriques dont le relief local et la dénudation (Deffontaines et al., 1994).

Ces deux paramètres dépendent étroitement des caractéristiques tridimensionnelles du relief. La géovisualisation avec le VRML peut offrir un “environnement virtuel” d’interprétation et d’analyse des structures géologiques complexes. Plus encore, le VRML facilite la migration vers un environnement de visualisation des données géographiques géocodées (ou données géospatiales) indépendamment des plateformes SIG (Figure 4). Dans notre cas c’est le Web.

De ce fait, des modèles de relief en 3D sont ainsi générés à partir des MNT dans un environnement SIG 3D. Les analyses sont basées sur les procé-

dures d’algèbre cartographique pour produire les cartes de relief local et de pente des deux structures géologiques. Plus de détails dans la figure 4.

Conception du modèle GeoVRML et visualisation

■ La modélisation virtuelle du terrain

L’application de la réalité virtuelle pour la visualisation d’un terrain et de ses paramètres offre une nouvelle approche d’analyse tridimensionnelle dans un environnement totalement virtuel. En effet, la technologie VRML permet la création (par procédure de conversion à partir d’un fichier SIG) d’un modèle 3D du terrain géologique, la visualisation des données géospatiales (par un module de navigation VRML) et l’utilisation des services et des options Internet disponibles. Ainsi, la diffusion des modèles virtuels de MNT en 3D sur Internet devient accessible, de même que la visualisation interactive et dynamique de ces derniers. La notion de “Terrain-RV” prend naissance et occupe de plus en plus de place dans le monde scientifique ainsi que sur le Web (Honjo et Lim, 2004).

Les tentatives d’intégrations des SIG avec la RV sont nombreuses et montrent clairement que celles-ci constituent de nouvelles approches très puissantes et innovatrices, car elles permettent d’effectuer à la fois une analyse tridimensionnelle et une géovisualisation interactive dans un univers virtuel (Huang et Lin, 1999, Huang et al., 2001).

Les modèles issus du SIG (2D et principalement le 3D) sont convertis au format GeoVRML en utilisant l’une des solutions logicielles disponibles actuellement (Figure 4). Le programme dem2geoeg.exe, écrit par Dr. Martin Reddy, permet la conversion du modèle numérique de terrain (MNT) au format ASCII vers le format GeoVRML. Ce programme est disponible gratuitement sur Internet.

Le module ArcScene d’ArcGIS (ESRI, 2006) intègre la possibilité d’une conversion de ces scènes tridimensionnelles au format GeoVRML

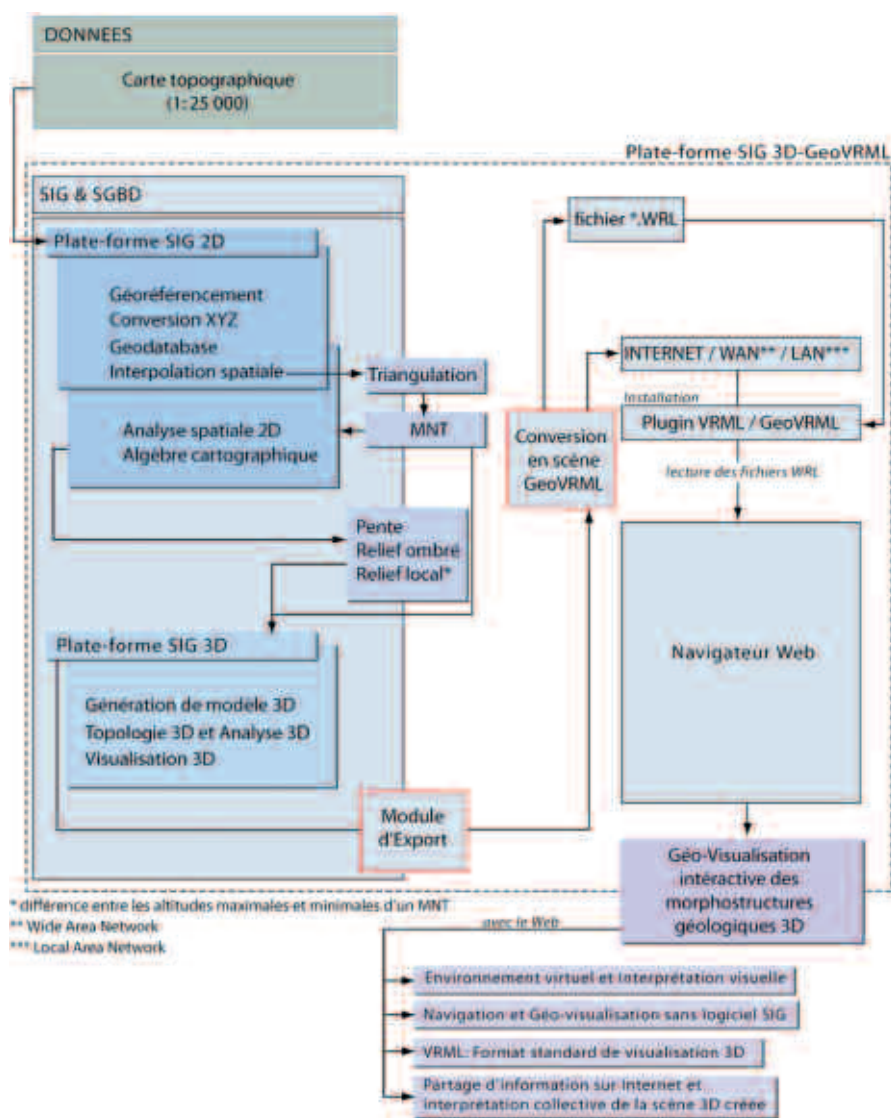


Figure 4. Organigramme simplifié montrant l'approche méthodologique utilisée dans ce travail. Une structuration en SIG 3D-GeoVRML est ainsi proposée.

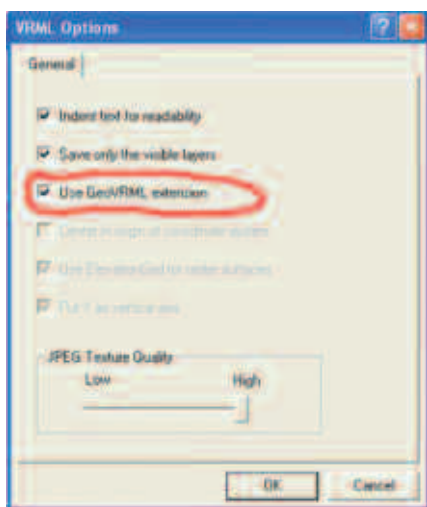


Figure 5. Module d'exportation GeoVRML d'ArcScene (ArcGIS, 2006).

(Figure 5). Cela offre d'importantes possibilités de combinaisons entre les fonctionnalités SIG 2D et 3D du logiciel et celles du moteur GeoVRML.

La nature de l'information tridimensionnelle exige une importante quantité d'informations. D'ailleurs, les fichiers MNT produits (format raster en 2D) pour le présent travail sont de grandes tailles : plus de 3 800 Ko pour le MNT de J. el Mourra et ~ 4 480 Ko pour celui du secteur de J. Kechtilou – J. Jebbs. Les modèles de triangulation de ces massifs sont également de grandes tailles (dépassant 5 Mo pour les deux fichiers générés). Les modèles 3D représentant les paramètres morphométriques de ces massifs sont aussi de tailles assez considérables.

Cependant, les fichiers GeoVRML produits (au format.wrl) montrent des tailles beaucoup plus faibles que les fichiers sources utilisés. Par exemple, le modèle GeoVRML 3D du TIN du J. el Mourra (Figure 6) est de 1 876 Ko contre 5 231 Ko du fichier TIN du même massif.

La géovisualisation interactive

Le niveau d'interactivité dans la visualisation 3D est largement préféré par les utilisateurs car elle permet une grande liberté dans le choix des paramètres de navigation dans l'espace tridimensionnel. En effet, l'angle de vue (viewpoint), la distance et la hauteur par rapport au modèle visualisé sont les principales clés de cette interactivité assez étendue (Verbree et al., 1999). La visualisation des données géoréférencées, au format GeoVRML, intègre plusieurs paramètres de la réalité géographique du terrain comme le système de coordonnées (GeoCoordinate), le niveau de détail (GeoLOD), la position géographique (GeoLocation), le système de coordonnées local (GeoOrigin) et l'angle de vue par rapport au modèle 3D de terrain (GeoViewpoint).

La géovisualisation des modèles GeoVRML créés est effectuée dans un navigateur Web (Explorer ou Netscape) en utilisant un navigateur VRML (Figures 6 et 7). Il existe actuellement plusieurs types de navigateurs VRML et qui sont disponibles gratuitement sur Internet, par exemple : Cosmo Player, Cortona ou WorldView. Dans notre étude nous avons utilisé Cosmo Player sous Internet Explorer (Microsoft, 2003).

Il est important de signaler que la visualisation d'un modèle GeoVRML nécessite l'installation de l'application GeoVRML 1.1.exe.

Perspectives

Le langage VRML présente d'importantes potentialités pour décrire la géométrie et les différentes caractéristiques des objets 3D. De plus, il permet d'avoir plusieurs types d'hyper-liaisons avec d'autres documents et sources sur le Web et de représenter des interrelations entre différentes entités géo-

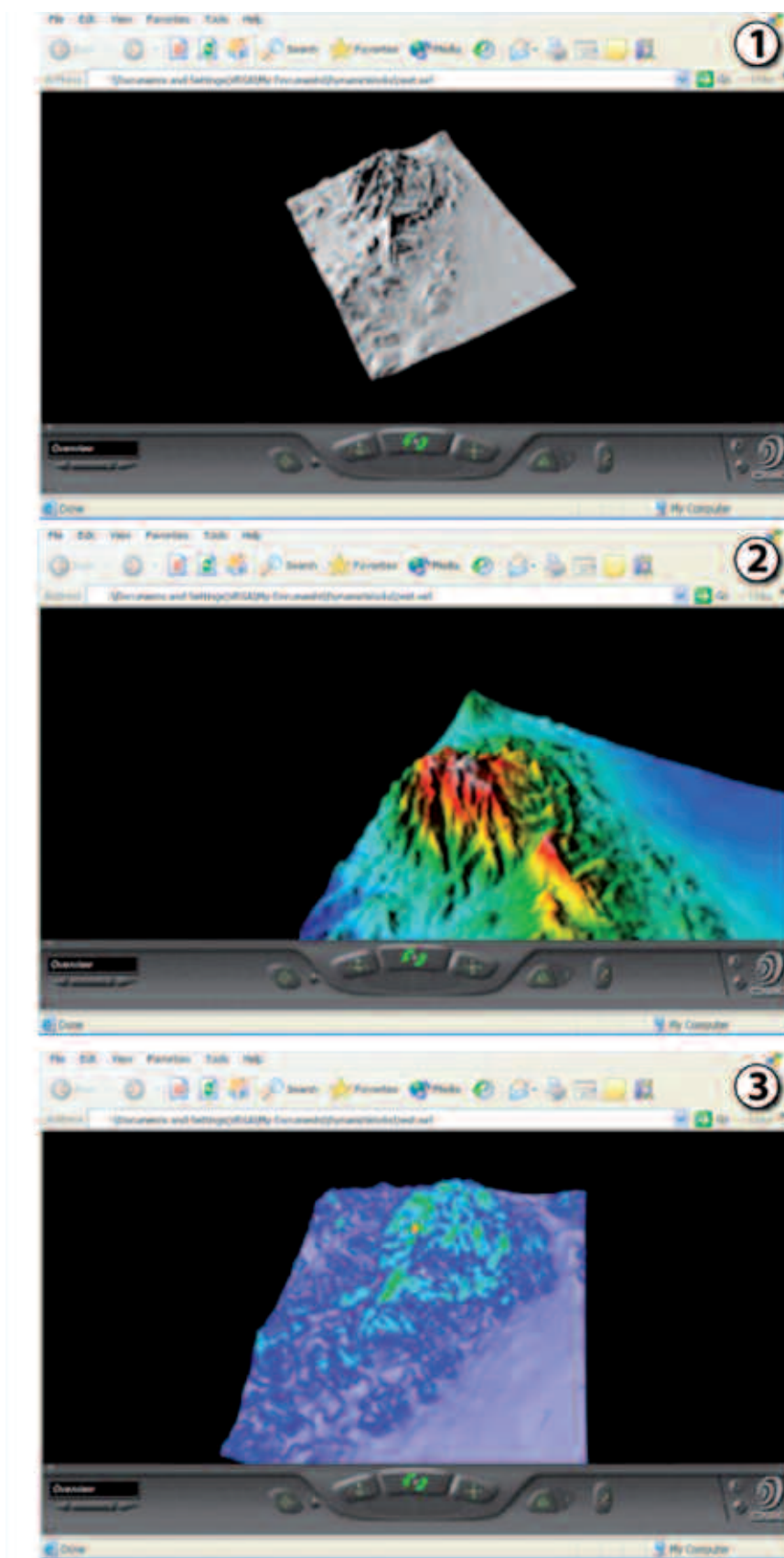


Figure 6. Visualisation des modèles GeoVRML du Jebel el Mourra en utilisant Internet Explorer et Cosmo Player. De haut en bas : les modèles 3D du relief produit par ombrage directionnel (1), du MNT (2) et du relief local produit par la soustraction du MNT à partir de sa surface des sommets (3) issus de l'analyse spatiale du massif.

graphiques qui peuvent être employées pour l'analyse et la visualisation 3D (Brown, 1999). Ce qui, en fait, facilite son intégration avec le SIG 3D (Verbree et al., 1999).

Ainsi, nos perspectives convergent principalement vers la mise en place d'une interface utilisateur (toolkit) du type JavaScript /GCI ou GUI (Graphic User Interface) permettant l'analyse spatiale 3D en intégrant les possibilités de la production de profils suivant des tracés précis sur la surface tridimensionnelle de terrain, l'analyse des bassins versants, les calculs volumétriques et l'extraction de paramètres morphométriques du terrain géologique ainsi que d'autres types d'analyses spatiales 3D.

Ce type de "toolkit" est le plus souvent mis en œuvre par le mécanisme d'intégration de la plate-forme SIG-Internet et la programmation HTML (ou le "Markup Language" d'une manière générale) sous une architecture Client-Serveur.

Conclusion

Les deux changements les plus récents dans le domaine de la cartographie et l'analyse spatiale sont évidemment l'émergence du SIG 3D et la distribution électronique, via Internet, de l'information géospatiale tridimensionnelle. De ce fait une toute nouvelle technologie d'hypermédia prend naissance dans le monde scientifique sous la forme d'un environnement dynamique et interactif de type SIG-WEB 3D. Toutefois, la technologie de la réalité virtuelle (RV) constitue évidemment son moteur principal.

Le VRML/GeoVRML est un langage évolutif présentant de nombreuses capacités de visualisation 3D sur le Web. Sa limite est pratiquement celle de l'imagination de son utilisateur car de nombreuses fonctionnalités peuvent être ajoutées aux scènes tridimensionnelles pour plus d'interactivité et d'efficacité durant l'opération de la géovisualisation des données géographiques.

Ce travail a souligné l'importance de cette technologie émergente de la réa-

lité virtuelle qui permet aujourd'hui la visualisation des données géoréférencées sur Internet. L'intégration avec le SIG est réalisable et les possibilités d'applications sont presque sans limites.

L'analyse morphostructurale qui se base sur plusieurs paramètres et indices morphométriques extraits du modèle tridimensionnel de terrain, qui est lui aussi un domaine émergent de la modélisation numérique de terrain, trouve bien ses applications et sa place dans cet univers virtuel.

L'interaction des modèles géographiques et géologiques 3D avec la réalité virtuelle constitue le futur de l'analyse spatiale 3D. VRML/GeoVRML est considéré comme un puissant outil dont il est temps d'explorer les immenses potentialités pour visualiser et analyser les données géocodées issues d'une plate-forme SIG. ●

Remerciements

Les auteurs remercient Monsieur le Professeur Mohamed Moncef Turki, Département de géologie à la Faculté des Sciences de Tunis, pour ses critiques et corrections de la version définitive du manuscrit.

Contacts

Tarek SLAMA et Noamen REBAI

Département de Géologie,
Faculté des Sciences de Tunis
trslama3d@yahoo.fr
noamenrebai@yahoo.com

Bibliographie

AL-KODMANY K., 1999. *Using visualization techniques for enhancing public participation in planning and design: process, implementation, and evaluation.* Landscape and Urban Planning, vol. 45, p.37-45.

APPLETON K., LOVETT A., SÜNNENBERG G., DOCKERTY T., 2002. *Rural landscape visualization from GIS data: a comparison of approaches, options and problems.* Computers, Environment and Urban Systems, vol. 26, p.141-162.

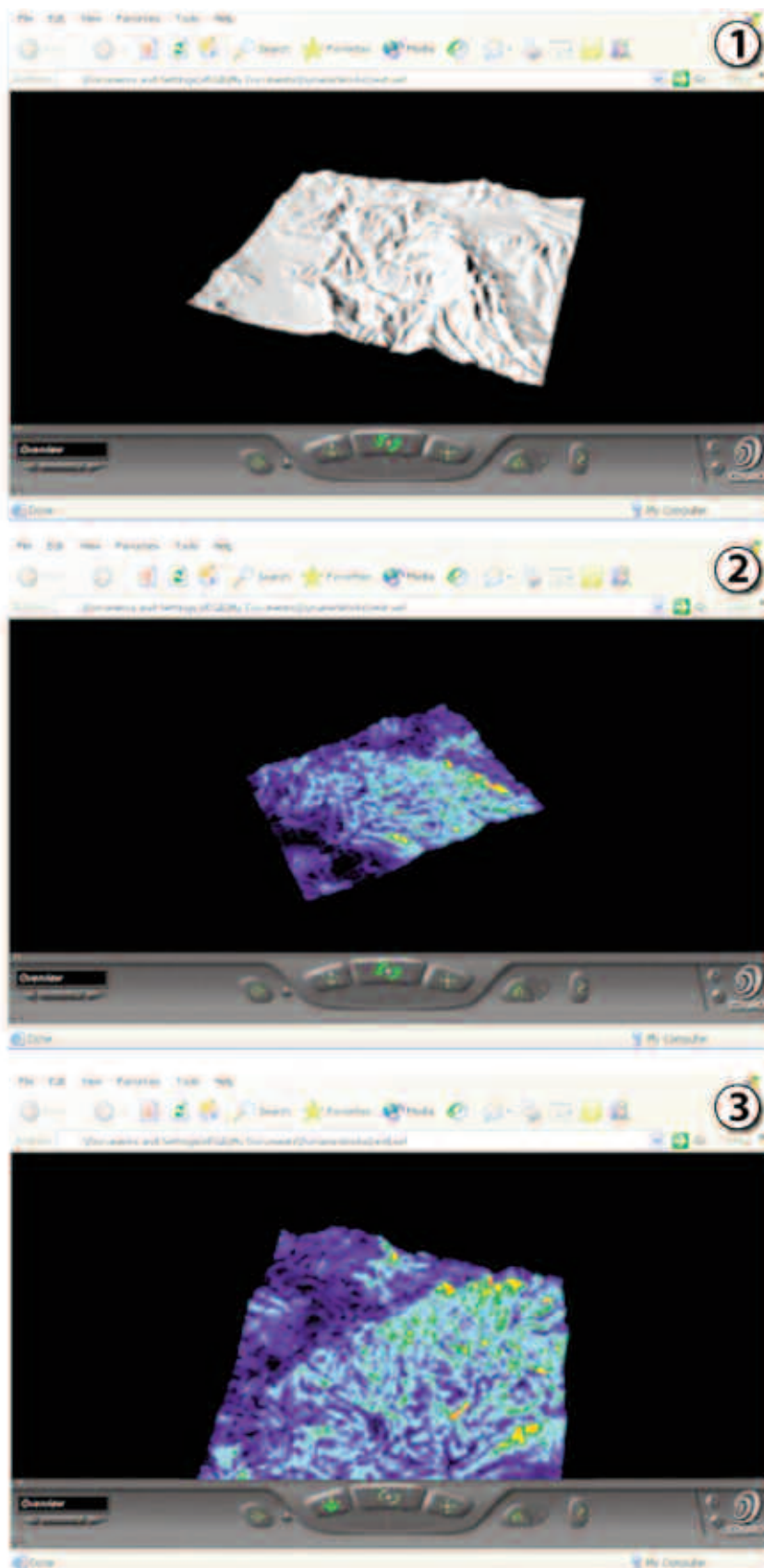


Figure 7. Visualisation des modèles GeoVRML du secteur de J. Kechtilou-J. Jebes en utilisant Internet Explorer et Cosmo Player. De haut en bas : les modèles 3D du relief produit par ombrage directionnel (1) et du relief local produit par la soustraction du MNT à partir de sa surface des sommets (2 et 3) issus de l'analyse spatiale du massif.



APPLETON K., LOVETT A., 2004. *GIS-based visualization of development proposals: reactions from planning and related professionals.* Computers, Environment and Urban Systems, (in press).

BROWN I.M., 1999. *Developing a virtual reality user interface (VRUI) for geographic information retrieval on the internet.* Transaction in GIS, vol. 3, p. 207-220.

Consortium Web 3D,
<http://www.Web3d.org/vrml>, 2004.

CRAWFORD C., 2000. *Virtualising the 3D real world.* Geomatics Info Magazine, vol. 14, n° 9, p. 37-39.

DEFFONTAINES B., CHOROWICZ J., 1991. *Principal of drainage basin analysis from multisource data: Application to the structural analysis of Zaire Basin.* Tectonophysics, vol. 194, p. 237-263.

DEFFONTAINES B., LEE J.C., ANGELIER J., CARVALHO J., RUDANT J.P., 1994. *New geomorphic data on the active Taiwan orogen: a multiple approach.* Journal of Geophysical Research, vol. 99, p. 20243-20266.

DOCKERTY T., LOVETT A., SÜNNENBERG G., APPLETON K., PARRY M., 2004. *Visualizing the potential impacts of climate change on rural landscapes.* Computers, Environment and Urban Systems, (in press).

DOYLE S., DODGE M., SMITH A., 1998. *The potential field of Web-based mapping and virtual reality technologies for modeling urban environments.* Computers, Environment and Urban Systems, vol. 22, p. 137-155.

FAIRBAIRN R.A., PARSLEY S., 1997. *The use of VRML for cartographic presentation.* Computers and Geosciences, vol. 23, p. 475-481.

GROHMANN C.H., 2004. *Morphometric analysis in geographic information systems: applications of free software GRASS and R.* Computer and Geosciences vol. 30, p. 1055-1067.

Grunwald S., Barak D., 2001. *The use of VRML for virtual soil landscape modeling.* SAMS, vol. 41, p. 755-776.

HONJO T., LIM E., 2001. *Visualisation of landscape by VRML system.* Landscape and Urban Planning, vol. 55, p. 175-183.

HONJO T., LIM E., 2004. *Landscape design and visualization on the Web.* Online landscape architecture conference, Dessau, Allemagne, 13-14 mai, Anhalt University

of Applied Sciences, p. 1-9.

HUANG B., LIN H., 1999. *GeoVR : A Web-based tool for virtual reality presentation from 2d GIS data.* Computers and Geosciences, vol. 25, p. 1167-1175.

HUANG B., JIAN, B., LIN H., 2001. *An integration of GIS, virtual reality and the internet for visualization, analysis and exploration of spatial data.* International Journal of Geographic Information Science, vol. 15, n° 5, p. 440-456.

HUANG B., LIN H., 2002. *A Java/CGI approach to developing a geographic virtual reality toolkit on the internet.* Computers and Geosciences, vol. 28, p. 13-19.

JONES R.R., MCCAFFREY K.J.W., CLEGG P., WILSON R.W., HOLLIMAN N.S., HOLDSWORTH R.E., IMBER J., WAGGOTT S., 2009. *Integration of regional to outcrop digital data: 3D visualization of multi-scale geological models.* Computers & Geosciences, vol. 35, p. 4-18.

LANGE E., 2001. *The limits of realism: perceptions of virtual landscape.* Landscape and Urban Planning, vol. 54, p. 163-182.

Le groupe de travail GeoVRML.
<http://www.geovrml.org/>, 2004.

LIM E., HONJO T., 2003. *Three-dimensional visualization forest of landscapes by VRML.* Landscape and Urban Planning, vol. 63, p. 175-186.

MARTIN D., HIGGS G., 1997. *The visualization of socio-economic GIS data using virtual reality tools.* Transactions in GIS, vol. 1, p. 255-266.

MITAS L., BROWN W.M., MITASOVA H., 1997. *Role of dynamic cartography in simulations of landscape process based on multivariate fields.* Computers and Geosciences, vol. 23, p. 437-446.

MONTGOMERY D.R., GREENBERG H.M., 2000. *Local relief and the height of Mount Olympus.* Earth Surface Processes and Landforms, vol. 25, p. 385-396.

MOORE K., DYKES J., WOOD J., 1999. *Using Java to interact with geo-referenced VRML within a virtual field course.* Computers and Geosciences, vol. 25, p. 1125-1136.

MORRISON W.K., PURVES S.R., 2002. *Customizable landscape visualization. Implementation, application and testing of a Web-based tool.* Computers, Environment and Urban Systems, vol. 22, p. 529-539.

RAPER J., MCCARTHY T., WILLIAMS N., 1999. *Georeferenced four-dimensional*

virtual environment: principals and applications. Computer, Environment and Urban Systems, vol. 22, p. 529-539.

RHYNE T.M., 1997. *Going virtual with geographic information and scientific visualization.* Computers and Geosciences, vol. 23, p. 489-491.

RHYNE T.M., 1999. *A commentary on GeoVRML: a tool for 3D representation of georeferenced data on the Web.* International Journal of Geographic Information Science, vol. 13, p. 439-443.

SHEPPARD S.R.J., 2000. *Visualization software brings GIS applications to life.* GeoEurope, vol. 23, n° 13, p. 28-30.

TONINI A., GUASTALDI E., MECCHERI M., 2009. *Three-dimensional reconstruction of the Carrara Syncline (Apuane Alps, Italy): An approach to reconstruct and control a geological model using only field survey data.* Computers & Geosciences, vol. 35, p. 33-48.

VERBREE E., VAN MAREN G., GERMS F., TANSEN F., KRAAK M.J., 1999. *Interaction in virtual world views - linking 3D GIS with VR.* International Journal of Geographic Information Science, vol. 13, p. 385-396.

ZANCHI A., FRANCESCA S., STEFANO Z., SIMONE S., GRAZIANO G., 2009. *3D reconstruction of complex geological bodies: Examples from the Alps.* Computers & Geosciences, vol. 35, p. 49-69.

ABSTRACT

Key words: GIS, 3D scenes, GeoVRML, visualization, Web, morphostructures, Tunisia.

3D GIS and virtual reality (VR) (technology) seem to be actually a powerful geospatial Web-based 3D visualization and analysis solution. In this work, numerous salt morphostructures within northern Tunisia have been studied to visualize 3D terrain models and to extract certain morphometric parameters based on their accurate DEMs. GeoVRML models are produced to enable interactive visualization into any Web navigator. 3D GeoVRML scenes show an interesting ease of use and high level of detail. The main goal of this study is to reveal the importance and the power of this tool in earth sciences and essentially in 3D spatial analysis and interactive geological cartography on the Web.