HAL
open science

PixScape - un outil logiciel intégré pour l'analyse du paysage visible

Yohan Sahraoui, Gilles Vuidel, Jean-Christophe Foltête, Daniel Joly

To cite this version:

Yohan Sahraoui, Gilles Vuidel, Jean-Christophe Foltête, Daniel Joly. PixScape - un outil logiciel intégré pour l'analyse du paysage visible. Cybergeo : Revue européenne de géographie / European journal of geography, 2016, http://cybergeo.revues.org/27862#article-27862. 10.4000/cybergeo.27862 . hal-01472090

HAL Id: hal-01472090

https://hal.science/hal-01472090v1

Submitted on 17 Sep 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Cybergeo : European Journal of Geography
GeOpenMod - Modèles et logiciels | 2016

PixScape – un outil logiciel intégré pour l'analyse du paysage visible

PixScape - an integrated software tool for analyzing landscape visibility

Yohan Sahraoui, Gilles Vuidel, Jean-Christophe Foltête et Daniel Joly

Édition électronique
URL : http://journals.openedition.org/cybergeo/27862
DOI : 10.4000/cybergeo.27862
ISSN : 1278-3366

Éditeur
UMR 8504 Géographie-cités

Ce document vous est offert par Centre national de la recherche scientifique (CNRS)

Référence électronique
Yohan Sahraoui, Gilles Vuidel, Jean-Christophe Foltête et Daniel Joly, « PixScape – un outil logiciel intégré pour l'analyse du paysage visible », *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], GeOpenMod - Modèles et logiciels, document 799, mis en ligne le 16 décembre 2016, consulté le 30 août 2019. URL : http://journals.openedition.org/cybergeo/27862 ; DOI : 10.4000/cybergeo.27862

Ce document a été généré automatiquement le 30 août 2019.

La revue *Cybergeo* est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 3.0 non transposé.

PixScape – un outil logiciel intégré pour l'analyse du paysage visible

PixScape - an integrated software tool for analyzing landscape visibility

Yohan Sahraoui, Gilles Vuidel, Jean-Christophe Foltête et Daniel Joly

Introduction

1 Adoptée en 2000, la Convention européenne du paysage (CEP) énonce des recommandations en termes de qualité paysagère, et encourage les pouvoirs publics à prendre en compte les aspirations des populations en ce qui concerne les caractéristiques paysagères de leur environnement (Council of Europe, 2000). En France, la loi du 8 janvier 1993 portant sur la protection et la mise en valeur des paysages a initié la ratification de la CEP en 2005. Cette loi a également marqué un tournant dans la prise de conscience de l'importance du paysage dans les projets d'urbanisme et d'aménagement à l'échelle nationale. La loi n° 2016-1087 du 8 août 2016 pour la reconquête de la Biodiversité, de la Nature et des Paysages[1] s'inscrit dans ce prolongement et fixe des objectifs de qualité paysagère en vue d'agir pour la qualité du cadre de vie des habitants.

2 La qualité du paysage est donc récemment devenue une dimension importante des politiques publiques. Evaluer la qualité paysagère nécessite avant tout de pouvoir caractériser le paysage visible. Ce paysage visible constitue un paysage potentiel pas encore perçu par les individus, « *un lieu où le paysage produit physiquement devient signe avant d'être décrypté* » (Wieber, 1995). Etudier ces signes nécessite de caractériser le paysage visible de manière objectivée à l'aide d'indicateurs. Les indicateurs paysagers permettent en effet d'établir un référentiel commun d'évaluation, en décrivant le paysage donné à voir par un ensemble de critères quantifiables (Ode, Tveit, & Fry, 2008).

3 Les analyses de visibilité à partir d'outils SIG permettent de s'immiscer dans l'environnement paysager reconstruit à partir des données spatiales numériques, l'objectif étant de capter une information potentiellement visible par des observateurs

virtuels parcourant l'espace dans tous les sens. L'avantage de ce type de modélisation est de pouvoir caractériser les propriétés visuelles du paysage depuis chaque point de l'espace (Franklin, Vogt, Riedl, Kainz, & Elmes, 2006; O'Sullivan & Turner, 2001). De telles analyses, qui peuvent être appliquées à l'ensemble du *continuum* spatial, ne privilégient aucun site par rapport aux autres et permettent d'éviter de se rendre partout sur le terrain pour effectuer un premier diagnostic. PixScape 1.0 intègre l'ensemble des fonctionnalités disponibles dans les outils SIG pour analyser le paysage visible, tout en proposant un ensemble de fonctionnalités originales.

Contexte

4 Parmi les outils donnant lieu à des analyses de visibilité du paysage, on observe une nette opposition entre (1) les SIG grand public - commerciaux ou libres - qui offrent une prise en main souvent simple mais présentent des fonctionnalités restreintes, et (2) les programmes « prototype » aux paramétrages plus avancés, développés au sein de laboratoires de recherche, mais qui restent cependant confidentiels et très peu diffusés à un large public.

5 Dans le cas des logiciels grand public, Idrisi a très tôt été utilisé pour la réalisation d'analyses de visibilité, initialement pour la réalisation de bassins de visibilité (*viewsheds*) (Fisher, 1992), ou plus récemment pour l'étude d'impacts visuels d'aménagements (Falconer, Hunter, Telfer, & Ross, 2013). Cependant, la majorité des travaux ayant recours aux analyses de visibilité utilisent les fonctionnalités d'ArcGIS, que ce soit pour déterminer l'impact visuel d'aménagements (Mouflis, Gitas, Iliadou, & Mitri, 2008), la prégnance visuelle d'éléments bâtis (Rød & van der Meer, 2009), ou pour évaluer la qualité esthétique du paysage visible (Palmer, 2004; Schirpke, Tasser, & Tappeiner, 2013). Certains travaux en archéologie utilisent également ArcGIS dans l'objectif de constituer des modèles d'intervisibilité, par le cumul de *viewsheds* (Sevenant & Antrop, 2007) ou par la réalisation de graphes de visibilité (De Montis & Caschili, 2012). D'autres SIG commerciaux (par exemple MapInfo Vertical Mapper, Geoconcept 3D, ENVI ou ERDAS) produisent également des analyses de visibilité, en n'offrant cependant que certaines fonctionnalités basiques. De manière analogue, parmi les logiciels SIG libres, OpenJump, Saga GIS, Geoserver, Open Layers ou TNTmips offrent également certaines fonctionnalités restreintes. C'est aussi le cas de certaines fonctions associées à Qgis et Grass, comme le module r.los[2], le programme r.cva[3], ou plus récemment le module *viewshed analysis*[4]. L'ensemble de ces outils SIG sont cependant limités au calcul de *viewsheds*. Or, d'autres opérations sont nécessaires en aval pour calculer, à partir des zones visibles, des indicateurs de composition ou de configuration du paysage visible.

6 Concernant les programmes de laboratoire, VIEWIT (Travis, Elsner, Iverson, & Johnson, 1975) est considéré comme le premier programme SIG permettant des analyses de visibilité. Les développements réalisés au sein de l'Institut Polytechnique Rensselaer (USA) ont également été utilisés pour le calcul de *viewsheds* et d'indicateurs de visibilité (Franklin & Ray, 1994), puis l'optimisation des calculs de visibilité (Franklin et al., 2006). Plus récemment, Manchado et al. (2013) introduisent le logiciel MOYSES pour déterminer l'impact visuel d'aménagements comme les parcs éoliens. Ces programmes sont en général spécifiques à un problème particulier et n'offrent pas une gamme complète de fonctionnalités et de paramètres de calcul.

7 PixScape est un outil logiciel développé au Laboratoire ThéMA à Besançon, conçu pour la modélisation du paysage visible à partir de données spatiales numériques et pour le calcul d'un grand nombre d'indicateurs paysagers. Il s'appuie en partie sur les précédents développement de Daniel Joly, utilisés dans le cadre de plusieurs travaux de recherche (Brossard, Joly, & Tourneux, 2008; Cavailhès et al., 2009; Joly, Brossard, & Cavailhès, 2009) mais peu diffusés au reste de la communauté scientifique. La version 1.0 est disponible en téléchargement sur https://sourcesup.renater.fr/pixscape/fr.html. Un manuel d'utilisation, un jeu de données test ainsi que le code source sont disponibles en ligne.

8 Par rapport aux outils existants, le logiciel PixScape 1.0 a été conçu comme un outil intégré, qui regroupe les fonctionnalités disponibles dans les outils SIG standards afin de faciliter l'ensemble de la chaîne de traitement des analyses de visibilité, depuis l'importation des données spatiales numériques jusqu'au calcul de métriques paysagères. De plus, il intègre un ensemble de paramètres de calculs de visibilité spécifiques et propose des métriques originales. Ce logiciel offre également l'avantage d'être diffusé en *open source*. Il s'adresse à un public habitué à l'utilisation des outils SIG, étudiants ou chercheurs, mais également collectivités locales et bureaux d'étude concernés par l'évaluation des paysages.

9 D'un point de vue informatique, PixScape 1.0 est développé en Java version 1.7. Il fonctionne sur toutes les architectures supportant Java 1.7 ou plus récent (Linux, Windows, MacOS, etc.). Il utilise plusieurs bibliothèques *open source*, dont GeoTools et Java Topology Suite (JTS) pour la gestion des données spatiales, ainsi que JCuda et OpenMPI pour la parallélisation des calculs sur GPU et sur cluster.

Analyses de visibilité du paysage à partir de PixScape

10 Dans cette section, il s'agira de présenter successivement (1) les données nécessaires à la construction des « projets » et aux analyses de visibilité, (2) la méthode d'analyse planimétrique, (3) la méthode d'analyse tangentielle.

Construction du projet et données

11 Les analyses de visibilité offertes par PixScape 1.0 sont réalisées à partir de données numériques en format raster. L'ensemble de ces analyses repose en effet sur des calculs en 2D ½ et non en 3D. De manière simplifiée, la distinction réside dans l'idée qu'en 2D ½, à un point de coordonnées (x,y) ne peut correspondre qu'un seul z ; on se contente donc d'extruder des objets selon une information correspondant à leur hauteur. La 3D distingue à l'inverse des « vides » et des « pleins » à la verticale de coordonnées (x,y). Ce degré de précision, nécessaire dans la modélisation de certains phénomènes (mobilités pédestres, diffusion d'ondes acoustiques, microclimat intra-urbains, etc.), impliquerait cependant des temps d'analyse de visibilité nettement plus longs[5].

12 Comme la plupart des outils SIG, PixScape 1.0 permet la gestion et l'enregistrement des données en entrée et des résultats sous forme de « projet ». Trois types de données raster peuvent être intégrés en vue de réaliser les analyses de visibilité :

- Le modèle numérique de terrain (MNT), qui représente l'architecture physique du paysage. Cette couche est indispensable pour la modélisation du paysage visible. L'IGN® fournit par exemple un MNT d'une résolution spatiale de 50 m ;

- Le modèle d'occupation du sol (MOS), qui caractérise la nature biophysique et anthropique des surfaces. Les données *Corine Land Cover* sont un exemple d'occupation du sol. De telles données peuvent également être constituées par l'utilisateur à partir de différentes sources d'informations géographiques ;
- Le modèle numérique d'élévation (MNE), qui permet en complément d'obtenir une information sur le développement vertical des objets pouvant cacher la vue (bâtiments ou arbres par exemple). De telles informations peuvent par exemple être obtenues à partir de données Lidar.

13 La création d'un projet dans PixScape 1.0 est uniquement soumise à l'intégration d'un MNT, les informations sur le relief permettant déjà d'effectuer des analyses de visibilité. Le recours à un MNE peut cependant s'avérer utile pour la réalisation d'analyses plus précises tenant compte de la hauteur des objets, et le recours à un MOS permet des analyses plus fines sur la composition et la configuration du paysage visible. Cette étape de préparation préalable des données nécessite le recours à des SIG.

14 Ces données en entrée doivent couvrir la même zone géographique, et leur résolution spatiale doit être identique entre ces trois types de données. L'utilisateur peut toutefois avoir recours à des bases de données de différentes résolutions spatiales plus grossières, à condition qu'elles restent identiques pour les trois types de données. Tout en permettant une accélération des temps de calcul, cette multi-résolution permet de tenir compte du fait que le contenu et la transparence des différents éléments du paysage varient avec la distance selon laquelle ils sont observés (*cf* section Analyses en multi-résolution).

15 En complément de ces données raster servant de base pour les analyses de visibilité, le logiciel permet l'intégration de fichiers de points en format vectoriel (.shp) pour appliquer les analyses de visibilité à partir d'une sélection de points de vue définis par l'utilisateur. Ce point sera développé dans la section « Autres paramétrages ».

16 L'ensemble des analyses de visibilité reposent sur la méthode des rayons divergents (Fisher, 1996; Joly et al., 2009), qui consiste à simuler le regard d'un observateur virtuel autour de lui. A partir de ces rayons, PixScape implémente deux méthodes de calcul de visibilité : la vue planimétrique représentant le bassin de visibilité sur le plan (x,y) et la vue tangentielle représentant la vue « réelle » immergée d'un observateur.

Analyses planimétriques

17 Les analyses de visibilité de nature planimétrique consistent à caractériser les relations d'intervisibilité entre des lieux d'observation et leur espace environnant (**figure 1**) et en vue de définir des *viewsheds* (**figure 2**). On cherche donc ici à obtenir une information sur la capacité des pixels de l'image à s'entrevoir en prenant en considération l'élévation du relief ou des objets du paysage qui, s'intercalant entre eux, peuvent cacher la vue. Ces masques de visibilité constituent donc des obstacles aux rayons divergents.

Figure 1. Principe de réalisation des *viewsheds* à partir des rayons divergents (vue de profil)

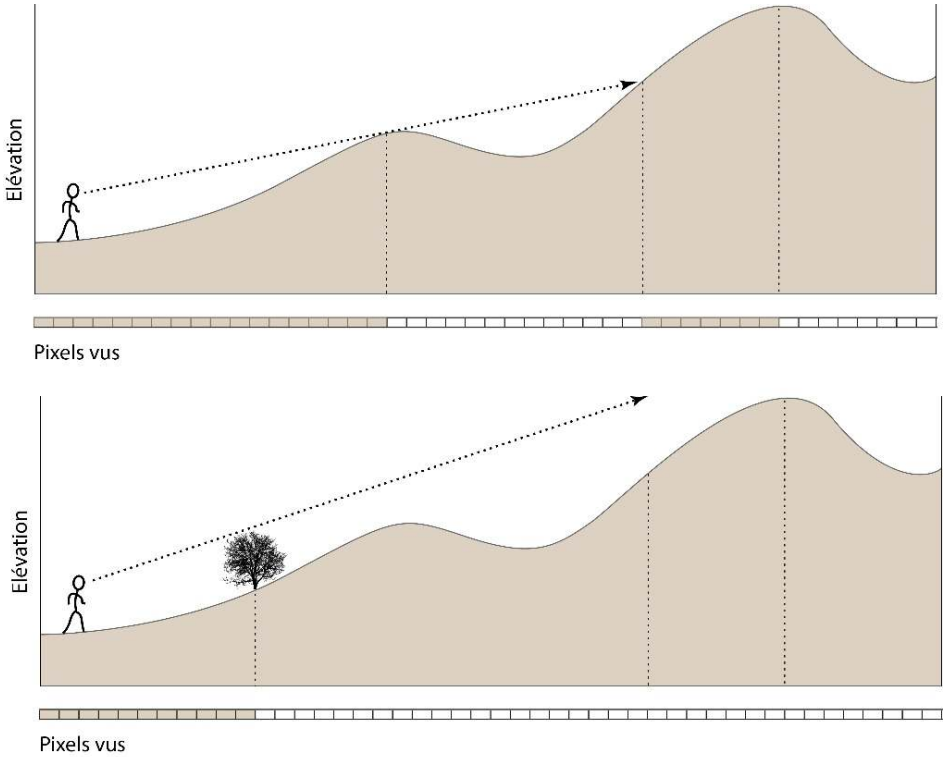
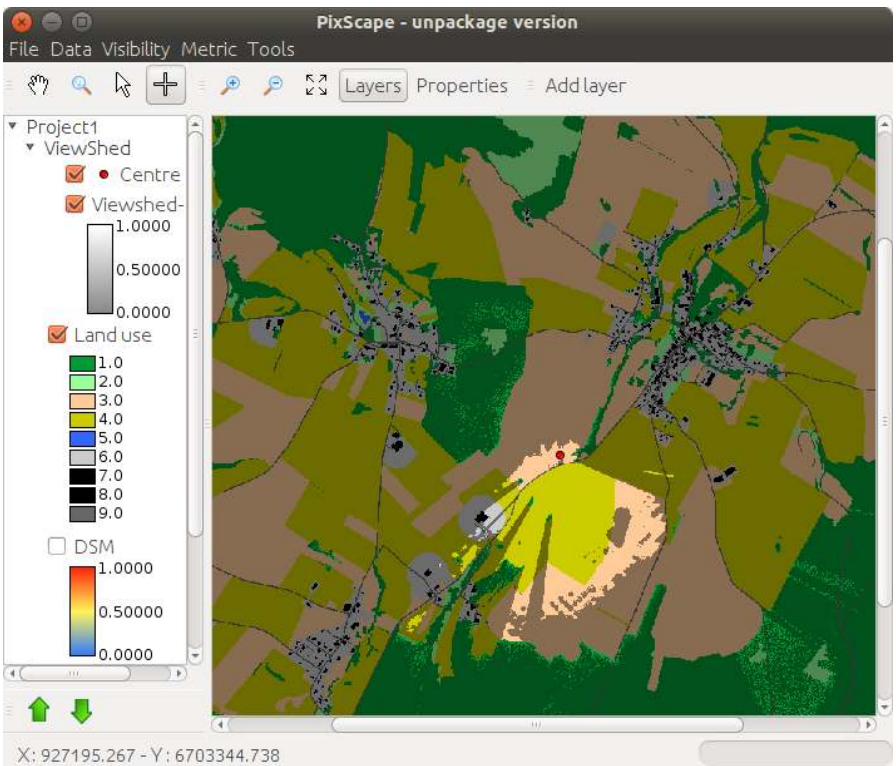


Figure 2. Exemple d'un *viewshed* calculé à partir de PixScape 1.0

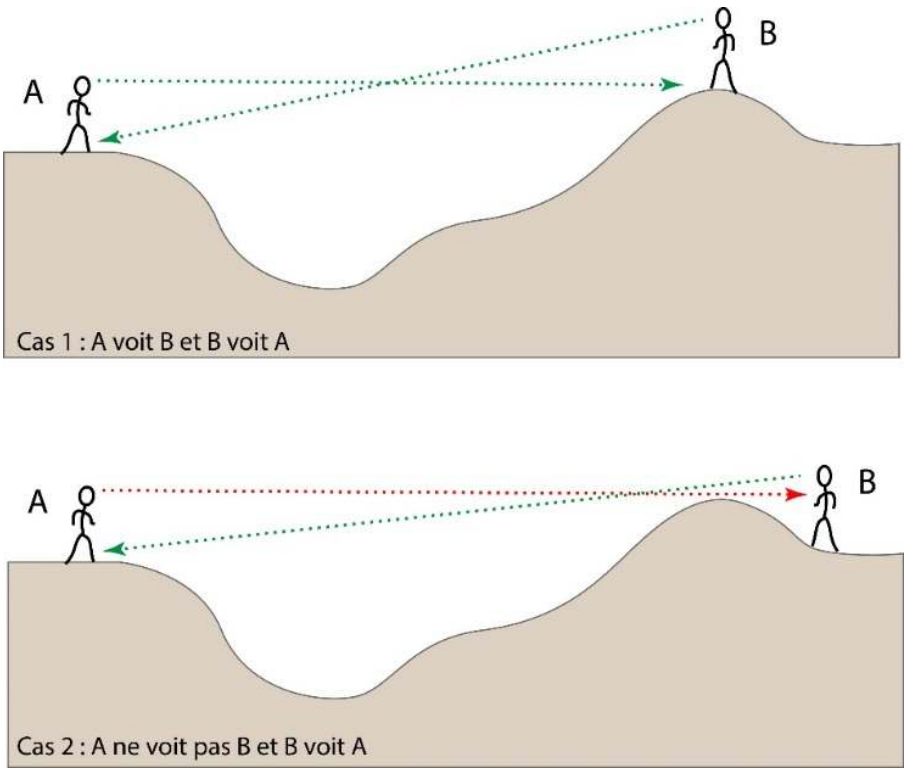


18 Deux types de relations d'intervisibilité peuvent être mesurés au moyen des rayons divergents :

- L'ampleur de vue - ou vision active - consiste à déterminer les espaces visibles depuis un point d'observation potentiel, c'est-à-dire son aptitude à voir l'espace qui l'entoure. Ce type d'analyse a été par exemple utilisé dans des travaux portant sur la localisation optimale d'emplacements de surveillance des feux de forêt (Lee, 1991) ou d'antennes de télécommunication ou de radio (De Floriani, Marzanoa, & Puppo, 1994; Kim, Rana, & Wise, 2004) ;
- La soumission à la vue - ou vision passive - consiste inversement à déterminer les espaces à partir desquels un lieu donné est visible, c'est-à-dire son aptitude à être vu depuis l'espace qui l'entoure. Ce type d'analyse est particulièrement utile pour la réalisation d'études d'impact, dans le cadre par exemple de construction de parcs éoliens (Benson et al., 2004).

19 Bien que ces deux relations semblent strictement symétriques, la hauteur des masques de visibilité ainsi que la taille attribuée aux observateurs potentiels entrainent une non-réciprocité de l'intervisibilité entre les pixels d'une image (Cavailhès & Joly, 2006) (**figure 3**).

Figure 3. Non réciprocité de l'intervisibilité



Analyses tangentielles

20 Les analyses de visibilité tangentielles consistent à mesurer le paysage visible dans la rétine d'un observateur virtuel en tenant compte du développement vertical des objets du paysage. Ces analyses permettent le passage d'un environnement modélisé en 2D ½ à partir des données spatiales (MOS, MNE, MNT), à une image de synthèse d'une scène paysagère visible depuis un point d'observation. Cette méthode implique le calcul de

surfaces angulaires qui restituent l'impact visuel des différents éléments paysagers (Germino, Reiners, Blasko, McLeod, & Bastian, 2001). Elle est fondée sur un ensemble de calculs trigonométriques qui prennent en considération la taille des objets et de leur distance au point d'observation. La surface angulaire s'obtient par le produit des composantes angulaires verticales et horizontales des objets (Cavailhès & Joly, 2006). On ne raisonne donc plus ici en surface métrique, mais en surfaces exprimées en angle carré. Bien que ces analyses soient plus complexes, elles sont jugées plus proches de la réalité paysagère observée[6]. Plusieurs travaux ont en effet montré leur intérêt pour l'évaluation des préférences paysagères (Sahraoui, Clauzel & Foltête, 2016) et l'explication de la satisfaction résidentielle liée au paysage (Sahraoui, Youssoufi & Foltête, 2016).

21 A partir de cette méthode, le logiciel génère une image tangentielle du paysage visible à 360° autour d'un point de l'image (**figures 4a et 4b**). L'objectif n'est pas d'offrir une image réaliste, mais de fournir une visualisation simplifiée de la réalité observable à partir de laquelle des caractéristiques paysagères peuvent être mesurées. La figure 5a représente la vue tangentielle et le bassin de visibilité correspondant. On peut remarquer la grande différence des emprises spatiales des différentes catégories d'occupation du sol entre la vue planimétrique et la vue tangentielle. Les champs en jaune représentent la plus grande surface visible sur le plan (x,y) alors que leur impact visuel s'avère très faible selon la vue tangentielle. A l'inverse, les bâtiments en noir représentent une toute petite surface du bassin de visibilité alors que leur surface dans la vue tangentielle est très importante. La figure 5b quant à elle, représente la même vue tangentielle où les couleurs de l'occupation du sol ont été remplacées par l'éloignement au point d'observation. Cette seconde information sera très utile pour définir des indicateurs sur la profondeur de vue (*cf.* Métriques tangentielles).

Figure 4a. Exemple d'image obtenue en vue tangentielle à partir de PixScape

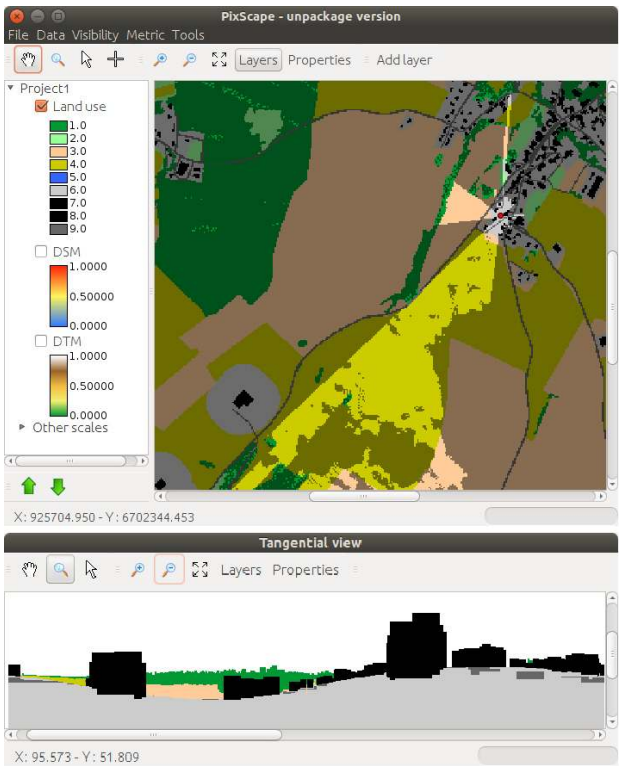


Figure 4b. Vue tangentielle représentant l'éloignement au point d'observation

22 A la différence de l'analyse planimétrique qui est basée sur le nombre de rayons nécessaires pour couvrir l'ensemble de l'image, l'analyse tangentielle effectue un lancer de rayons d'un pas fixe défini par l'utilisateur du logiciel. Par défaut, les rayons d'analyse lancés depuis les points d'observation pour ces analyses sont séparés par un angle de 0.1°. Pour la réalisation des analyses tangentielles, le logiciel intègre néanmoins la possibilité d'un échantillonnage angulaire différent permettant d'accélérer les temps de calcul, en perdant toutefois en précision.

Métriques de visibilité

23 Plusieurs métriques de visibilité peuvent être calculées dans le cadre des deux types d'analyses présentés (tangentielle ou planimétrique). Il s'agira ici de présenter dans un premier temps les métriques communes aux deux méthodes, puis, dans un second temps, les métriques spécifiques à chaque mode d'analyse.

24 Le **tableau 1** liste l'ensemble des métriques et leur disponibilité en fonction des méthodes d'analyse, en précisant si leur calcul nécessite le recours à des données d'occupation du sol et si leur calcul supporte des intervalles de distance.

Tableau 1. Liste des métriques et de leur paramétrage

Métrique	Nom	Planimétrique	Tangentiel	Sans OS	Avec OS	Distance
A	Surface	X	X	X	X	X
S	Shannon OS	X	X		X	X
IJI	Interspersion et juxtaposition	X	X		X	
CONTAG	Contagion	X	X		X	
DIST	Distribution des distances	X	X	X		
P	Périmètre	X		X		

C	Compacité	X		X		
FD	Dimension fractale	X		X		
SL	Ligne d'horizon		X	X		
SD	Shannon distance max.		X	X		
DL	Profondeur de vue		X	X		X

Métriques communes aux deux méthodes d'analyse

25 Les métriques de composition consistent à caractériser le contenu visuel du paysage en termes d'occupation du sol (Joly et al., 2009; Miller, 2001). Pour une catégorie d'occupation du sol i, A_i est la surface visible de cette catégorie exprimée en mètre carré pour l'analyse planimétrique et en degré carré pour l'analyse tangentielle.

26 Basé sur la notion d'entropie, l'indice de diversité de Shannon normalisé (Shannon & Weaver, 1971) mesure la diversité du paysage visible en termes d'occupation du sol, tel que :

$$S = -\frac{1}{log(n)} \sum_{\substack{i=1 \\ A_i>0}}^{n} \frac{A_i}{A} \log(\frac{A_i}{A})$$

où A est la surface totale visible et n le nombre de catégories d'occupation du sol. Une valeur de 0 signifie que le paysage est composé d'une seule catégorie d'occupation du sol. Une valeur maximale (proche de 1) indique que l'ensemble des catégories d'occupation du sol composant le paysage sont réparties équitablement.

27 Deux métriques issues de l'écologie du paysage peuvent être utilisées pour mesurer le niveau d'agrégation ou de fragmentation du paysage visible, l'indice de contagion et l'indice d'interspersion et juxtaposition (annexe 1).

28 Le degré d'ouverture du paysage visible peut être quantifié par plusieurs métriques basées sur les distances entre le point d'observation et les pixels visibles. L'ensemble des distances est agrégé par 4 opérateurs : somme, moyenne, minimum et maximum :

$$DIST_{SUM} = \sum_{i=1}^{k} d_i$$

$$DIST_{AVG} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^{k} d_i$$

$$DIST_{MIN} = \min\{d_i \mid i \in [1; k]\}$$

$$DIST_{MAX} = \max\{d_i \mid i \in [1; k]\}$$

où d_i représente la distance métrique du point d'observation au pixel visible i et k le nombre de pixels vus. Ces indicateurs sont élevés si l'ouverture paysagère est importante.

Métriques planimétriques

29 Concernant les analyses planimétriques, plusieurs métriques caractérisent la forme des *viewsheds*.

30 La métrique la plus classique concerne le périmètre *P* du *viewshed*. A partir du périmètre *P* et de la surface totale *A* du *viewshed*, le logiciel propose le calcul d'un coefficient de compacité (coefficient de Gravelius). Cette métrique est définie comme le rapport du périmètre du *viewshed* à celui d'un cercle de la même surface, tel que :

$$C = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

31 Les valeurs de ce coefficient sont minimales pour un *viewshed* carré et d'autant plus grandes que le *viewshed* est allongé. Il traduit donc la forme de l'environnement paysager visible en termes d'ouverture.

32 En complément, le logiciel calcule la dimension fractale des *viewsheds*. La géométrie fractale (Mandelbrot, 1977) mesure l'invariance de la structure d'éléments en fonction de l'échelle d'observation. Cette métrique distingue ici les *viewsheds* constitués de zones visibles dispersées et diversifiées dans leurs tailles et les distances qui les séparent, et les *viewsheds* uniformément répartis dans l'espace. La méthode utilisée ici est la dimension de Minkowski, ou *box-counting.* Elle s'exprime selon la relation suivante :

$$FD = \frac{\log N}{\log r}$$

33 Avec *N* le nombre de cellules visibles à chaque niveau d'analyse, et *r* le facteur de réduction d'un niveau d'analyse à l'autre. Si *D* tend vers 0, alors le *viewshed* se concentre en un seul point, et si *D* tend vers 2, alors les zones visibles sont uniformément réparties sur l'ensemble de la surface étudiée.

Métriques tangentielles

34 La variation de la profondeur de vue peut être évaluée en vue tangentielle par deux métriques basées sur la longueur de vue maximale de chaque rayon divergent, *i.e.* la distance entre le point d'observation et l'objet visible le plus lointain pour chaque rayon.

35 La métrique *Shannon Distance* correspond à l'indice de Shannon standardisé appliqué à la distribution des longueurs de vue maximales regroupées en *m* classes[7].

$$SD = -\frac{1}{log(m)} \sum_{i=1}^{m} \frac{nd_i}{n} \cdot log\left(\frac{nd_i}{n}\right)$$

nd_i représente le nombre de longueurs maximales dans la classe de distance *i* et *n* représente le nombre total de rayons calculés dans la vue tangentielle.

36 Cette métrique vaut 0 quand toutes les longueurs sont dans la même classe et donc la profondeur de vue est homogène. A l'inverse, elle vaut 1 quand les longueurs de vue sont uniformément réparties dans toutes les classes, ce qui représente une grande variété des profondeurs de vue.

37 La métrique *SD* est un indicateur statistique ne prenant pas en compte la structure spatiale des lignes de visibilité. Or, à mesure que l'observateur potentiel balaie son regard

de façon circulaire, la profondeur de vue peut varier par grandes plages homogènes ou par de nombreux va-et-vient entre vues rapprochées et longues perspectives. Les longueurs de vue des rayons sont utilisées pour quantifier cet aspect par la métrique *Depthline*. Cette métrique nécessite la construction d'un polygone sur le plan (x,y) regroupant les points visibles les plus éloignés du point d'observation pour chaque rayon lancé. La métrique *DL* est définie comme l'indice de compacité de ce polygone :

$$DL = \frac{p}{2\sqrt{\pi a}}$$

où p et *a* représentent respectivement le périmètre et l'aire du polygone. Cette métrique donne une valeur minimale de 1 dans le cas d'un bassin de visibilité de forme circulaire, et des valeurs élevées (non bornées) dans le cas de variations fortes des profondeurs de vue.

38 Une dernière métrique est dédiée à la forme de la ligne d'horizon, pouvant être plus ou moins accidentée en fonction du relief ou de la présence d'éléments élevés. Cette métrique est obtenue en divisant la longueur de la ligne d'horizon (*hl*) exprimée en degré par la longueur de la ligne droite *sl* correspondant à la largeur de la vue, soit 360° pour une vue complète :

$$SL = \frac{hl}{sl}$$

39 Les valeurs sont proches de 1 lorsque l'horizon est plat, et élevées (non limitées) dans le cas d'une ligne d'horizon très accidentée.

40 Les métriques de visibilité peuvent être calculées manuellement à partir de points de l'image (**figure 5**), ou de manière systématique pour l'ensemble des pixels de l'image (**figure 6**) pour spatialiser les informations mesurées sur l'ensemble de la zone d'étude.

Figure 5. Exemple de métriques planimétriques calculées à partir d'un *viewshed*

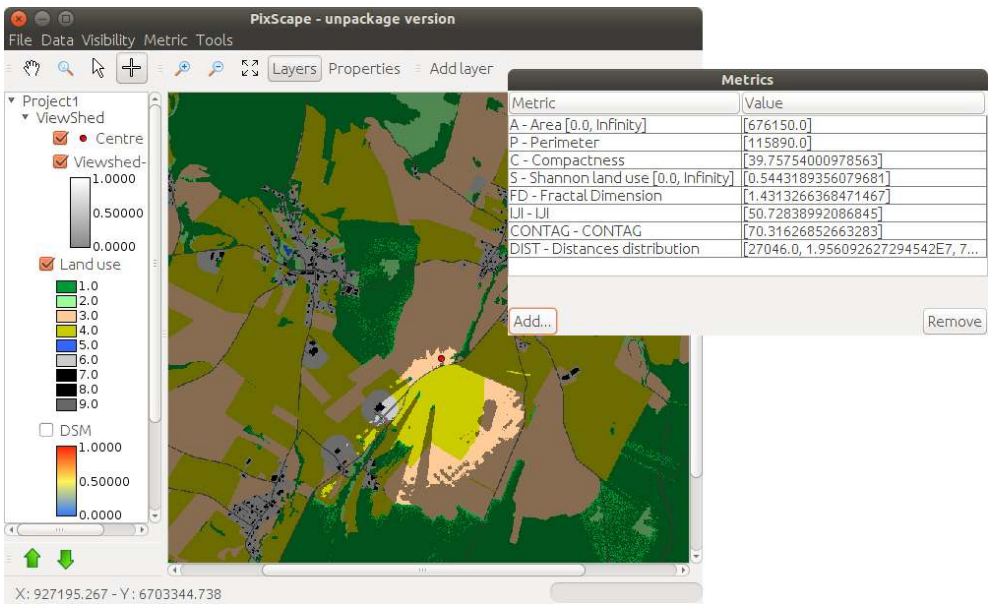
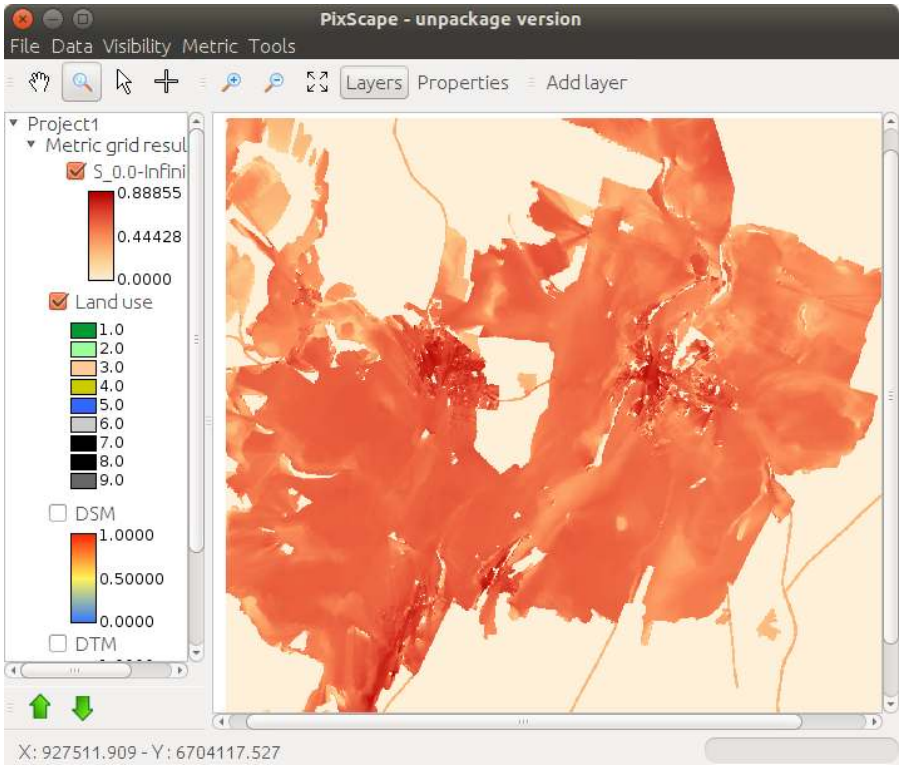


Figure 6. Exemple d'une métrique (S) calculée à partir de tous les pixels de l'image



Paramétrage des analyses

Analyses en multi-résolution

41 Comme le soulignent Skov-Petersen & Snizek (2007), le paysage est composé de différents éléments, dont le contenu et la transparence varient avec la distance selon laquelle ils sont observés. Par exemple, un arbre qui peut être distingué à une distance de 20 m devient un élément indistinct d'une forêt vue à une distance de 3 km (Joly et al., 2009). C'est également le cas des bâtiments qui, visibles en tant qu'objets paysagers à quelques centaines de mètres au maximum, sont indistincts quand ils s'intègrent dans un ensemble urbain lointain. Par conséquent, l'intégration de bases de plusieurs résolutions spatiales dans la modélisation du paysage visible adapte la résolution spatiale aux objets susceptibles d'être distingués (par exemples maison/village/ville ou arbre/bosquet/forêt).

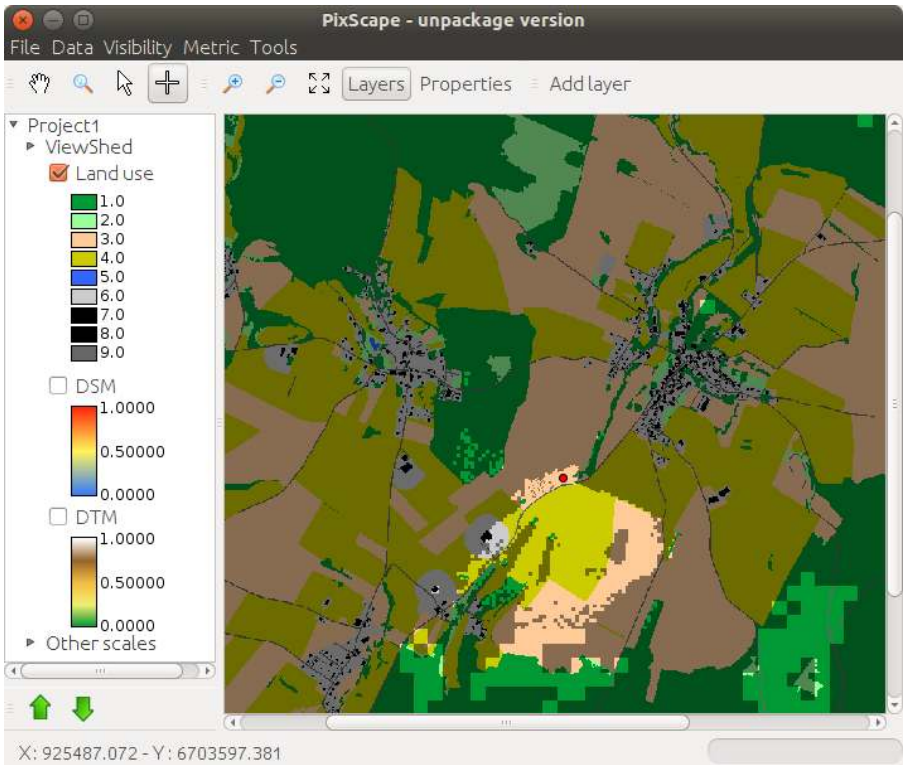
42 L'une des originalités du logiciel est sa capacité à utiliser, pour une même analyse de visibilité, des données raster (MNT, MNE ou MOS) à différentes résolutions spatiales (Joly et al., 2009). Ces différentes bases de données peuvent être ajoutées dans le projet par l'utilisateur. Le logiciel intègre également la possibilité de créer automatiquement les différentes bases de résolution spatiale. A partir des rasters en entrée à la résolution la plus fine, le logiciel crée des rasters de résolutions spatiales plus grossières pour un ensemble d'intervalles de distance déterminées. La méthode proposée consiste à agréger l'information des pixels dans le pixel de niveau supérieur (par moyenne dans le cas des MNT et MNE, et par pixels majoritaires dans le cas des MOS).

43 Pour une analyse de visibilité depuis un point de l'image, le logiciel comptabilise les pixels vus, de proche en proche, depuis la résolution la plus fine (le voisinage le plus proche), jusqu'aux résolutions grossières dans les voisinages les plus éloignés (**figure 7**).

44 En plus d'accélérer les temps de calcul, cette méthode tient compte de certaines capacités cognitives propres à la vision humaine. Certains éléments du paysage pouvant être distingués dans un environnement proche ne le seront plus dans un environnement lointain modélisé par des bases de données aux résolutions plus grossières. Ces objets seront donc traités de deux manières possibles dans la construction des bases de données multi-résolution :

- Soit complètement ignorés et disparaissant dans les paysages lointains s'ils constituent des éléments ayant peu d'emprise au sol, comme les arbres isolés ou les routes ;
- Soit agrégés à d'autres objets de même type situés dans un environnement proche pour constituer une emprise spatiale plus large. C'est par exemple le cas de plusieurs bâtiments distincts devenant un agglomérat bâti visible dans les paysages lointains.

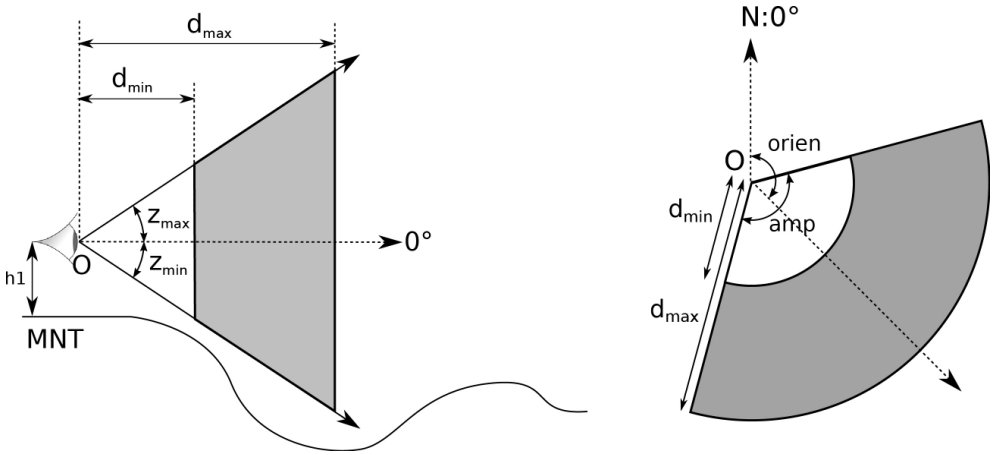
Figure 7. Exemple d'un *viewshed* en multi-résolution. La taille des pixels augmente avec l'éloignement au point d'observation.



Autres paramétrages

45 Plusieurs paramètres de calcul communs aux deux types d'analyses permettent d'affiner les analyses de visibilité (**figure 8**). Le logiciel permet de déterminer pour chaque point d'observation (1) une contrainte angulaire verticale (*Zmin* et *Zmax*) et horizontale (*amp*) en degrés, (2) des seuils de distance minimum (d*min*) et maximum (d*max*) en mètres à l'intérieur desquels les surfaces vues sont calculées, (3) l'azimut (en degrés). Une hauteur peut également être attribuée aux points de vue (h1) et aux points observés.

Figure 8. Vue de profil (droite) et du dessus (gauche) des limites du champ de vision



46 Par défaut, ces calculs sont réalisés pour chaque cellule de l'image, à la résolution des couches rasters en entrée. Le paramétrage des analyses peut également passer par l'échantillonnage des points de vue à partir desquels sont réalisés les calculs. Le logiciel offre plusieurs options :

- Sélection des zones depuis lesquelles sont réalisés les calculs en se basant sur l'occupation du sol (uniquement depuis les zones urbanisées par exemple) ;
- Echantillonnage régulier des cellules constituant les points de vue, en effectuant par exemple des calculs uniquement depuis une cellule sur *n* cellules. Dans ce cas, les résultats en sortie sont agrégés pour donner un raster de résultats à la résolution de départ multipliée par la valeur *n* ;
- Calculs depuis un fichier de points vecteur (format .shp) préalablement ajouté au projet (pour par exemple représenter le paysage le long d'un trajet). Dans ce cas, les métriques calculées sont enregistrées dans la table attributaire du fichier de points, et exportables en format .shp ou .txt.

47 Concernant les calculs depuis un fichier de points, chacun des paramètres de calcul définis plus haut (hauteur, contrainte angulaire, seuils de distance et azimut) peut être individualisé préalablement pour chaque point dans la table attributaire du fichier en entrée. Dans le cas d'un fichier de plusieurs points localisés le long d'un trajet, le logiciel permet de définir automatiquement comme azimut, depuis chaque point, le point suivant le long du trajet.

Parallélisation des calculs

48 Le calcul exhaustif des bassins de visibilité d'une image peut demander beaucoup de temps de calcul. Pour diminuer le temps d'exécution, PixScape implémente 3 méthodes de parallélisation : par *thread* pour un ordinateur seul, par MPI pour les clusters d'ordinateurs et par CUDA pour utiliser l'accélération GPU (*Graphics Processor Unit*).

49 La parallélisation par *thread* accélère le calcul sur une seule machine contenant plusieurs cœurs ou processeurs. Actuellement, la plupart des ordinateurs de bureau contiennent entre 2 et 8 cœurs, ce qui divise le temps d'exécution d'un facteur proche du nombre de cœurs de la machine. Le menu Préférences permet de définir le nombre de cœurs utilisés

par PixScape. Par défaut celui-ci est défini à *n*-1 cœurs, *n* étant le nombre de cœurs présents sur la machine utilisée.

50 La seconde méthode, MPI (*Message Passing Interface*), est une norme utilisée sur les clusters de calcul pour exécuter un programme en parallèle sur plusieurs machines. PixScape est compatible avec OpenMPI 1.7.5 qui supporte l'interfaçage avec Java. Le nombre de cœurs sur un seul ordinateur étant limité généralement entre 32 et 64 cœurs, la parallélisation par MPI permet de s'affranchir de cette limite et de passer la barre de la centaine de cœurs répartie sur un ensemble de machines. Cette méthode n'est pas utilisable en interface graphique et demande d'utiliser PixScape en ligne de commande.

51 Enfin l'accélération GPU (*Graphics Processor Unit*) correspondant au processeur de la carte graphique, permet d'utiliser la puissance de la carte graphique au lieu du processeur central. PixScape peut utiliser l'accélération des cartes graphiques Nvidia supportant l'extension CUDA. L'utilisation du GPU peut être activée dans l'interface graphique dans le menu Options. Les tests réalisés avec une carte graphique Nvidia Tesla k40 montrent qu'il est possible d'accélérer le calcul de bassin de visibilité d'un facteur 20 jusqu'à un facteur 100 pour de grandes images (> 100 000 000 de pixels). Le logiciel supporte aussi l'utilisation de plusieurs cartes graphiques en parallèle, diminuant d'autant les temps d'exécution.

Conclusion

52 Le logiciel PixScape constitue un outil intégré offrant une large gamme de fonctionnalités ainsi qu'un ensemble de métriques originales pour modéliser le paysage visible. S'adressant à un public large, son interface graphique permet une prise en main rapide, en étant volontairement proche des fonctions de visualisation des SIG grand public. Il comporte ainsi des fonctionnalités classiques de gestion des couches d'information et de leur sémiologie graphique, des possibilités de zoom et de déplacement sur les couches, des statistiques sur les données présentes dans les tables attributaires. Les sorties en format vecteur ou raster sont compatibles avec les logiciels SIG classiques et peuvent également être traités par des logiciels d'infographie. S'adressant également à un public de chercheurs, ce logiciel offre (en lignes de commande) des possibilités d'analyses fines et répétées sur des espaces géographiques étendus, par une distribution des calculs sur des clusters informatiques spécialisés.

53 Le principal aspect novateur du logiciel réside dans ses capacités d'analyse tangentielle par la méthode des surfaces angulaires. Bien que cette méthode soit déjà utilisée dans d'autres travaux (Germino et al., 2001), l'originalité de PixScape est de pouvoir calculer par cette méthode un ensemble de métriques de configuration du paysage, permettant ainsi de caractériser des motifs de visibilité. Les possibilités d'analyses à partir de données de plusieurs résolutions spatiales constituent également une innovation majeure, en accélérant les temps d'analyse tout en se rapprochant de capacités cognitives humaines mobilisées dans la perception du paysage.

54 La version 1.0 de PixScape constitue un socle sur lequel plusieurs améliorations et développement seront réalisés. Il s'agira tout d'abord d'adapter d'autres métriques de configuration paysagère pertinentes à la dimension visible du paysage. D'autre part, les développements en cours intègrent des possibilités d'analyses diachroniques à partir de données multi-dates, particulièrement intéressantes dans le cadre d'études d'impact

visuel. Enfin, PixScape est *open source* et a vocation à évoluer selon les besoins spécifiques de ses utilisateurs, au-delà des développements menés par les auteurs.

BIBLIOGRAPHIE

Benson J. F., Scott K. E., Anderson C., Macfarlane R., Dunsford H., Turner K., 2004, *Landscape capacity study for onshore wind energy development in the Western Isles*, Edinburgh, Scottish Natural Heritage Commissioned Report No. 042.

Bittner J., Wonka,P., 2003, "Visibility in computer graphics", *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol. 30, No.5, 729–755. http://doi.org/10.1068/b2957

Brossard T., Joly D., Tourneux F.-P., 2008, "Modélisation opérationnelle du paysage", in Brossard T., Wieber J.C. (dir.), *Paysage et information géographique,* Paris, Hermès/Lavoisier, 119–140.

Brossard T., Wieber J.-C., 1984, Le paysage: trois définitions , un mode d'analyse et de cartographie, *Espace Geographique*, Vol.13, No.1, 5–12.

Cavailhès J., Brossard T., Foltête J. C., Hilal M., Joly D., Tourneux F. P., Tritz C., Wavresky P., 2009, "GIS-Based hedonic pricing of landscape", *Environmental and Resource Economics*, Vol.44, No. 4, 571–590. http://doi.org/10.1007/s10640-009-9302-8

Cavailhès J., Joly D., 2006, *Les paysages périurbains et leur prix*, Besançon, Presses Universitaires de Franche-Comté.

Conseil de l'Europe, 2010, *Convention Européenne du paysage et rapport explicatif.*

De Floriani L., Marzanoa P., Puppo E., 1994, "Line-of-sight communication on terrain models", *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol.8, No.4, 329–342.

De Montis A., Caschili S., 2012, "Nuraghes and landscape planning: Coupling viewshed with complex network analysis", *Landscape and Urban Planning*, vol. 105, No.3, 315–324. http://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.01.005

Falconer L., Hunter D.-C., Telfer T. C., Ross L. G., 2013, "Visual, seascape and landscape analysis to support coastal aquaculture site selection", *Land Use Policy*, Vol.34, 1–10. http://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.02.002

Fisher P.F., 1992, "First Experiments in Viewshed Uncertainty: Simulating Fuzzy Viewsheds", *Photogrammetric Enginering and Remote Sensing*, Vol.58, No.3, 345–352.

Fisher P.F., 1996, "Extending the Applicability of Viewsheds in Landscape Planning", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.62, No.1, 1297–1302.

Franklin W. R., Vogt C., Riedl A., Kainz W., Elmes G. A., 2006, "Tradeoffs when Multiple Observer Siting on Large Terrain Cells", *Progress in Spatial Data Handling, 12th International Symposium on Spatial Data Handling*, 845–861. http://doi.org/10.1007/3-540-35589-8_52

Franklin W., Ray C., 1994, "Higher isn't necessarily better: Visibility algorithms and experiments", *Advances in GIS Research: Sixth International Symposium on Spatial Data Handling*, 1–22. http://doi.org/10.1.1.17.5634

Germino M. J., Reiners W., Blasko B.J., McLeod D., Bastian C.T., 2001, "Estimating visual properties of Rocky Mountain landscapes using GIS", *Landscape and Urban Planning*, Vol.53, No.1-4, 71–83. http://doi.org/10.1016/S0169-2046(00)00141-9

Joly D., Brossard T., Cavailhès J., Hilal M., Tourneux F.P., Tritz C., Wavresky P., 2009, "A Quantitative Approach to the Visual Evaluation of Landscape", *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 99, No. 2, 292–308.

Kim Y.H., Rana S., Wise S., 2004, "Exploring multiple viewshed analysis using terrain features and optimisation techniques", *Computer and Geosciences*, Vol.30, 1019–1032.

Lee J., 1991, "Analysis of visibility sites on topographic surfaces", *International Journal of Geographical Information Science*, Vol.5, No.4, 413–429.

Manchado C., Otero C., Gómez-Jáuregui V., Arias R., Bruschi V., Cendrero A., 2013, "Visibility analysis and visibility software for the optimisation of wind farm design", *Renewable Energy*, vol. 60, 388–401. http://doi.org/10.1016/j.renene.2013.05.026

Mandelbrot B., 1977, *The Fractal Geometry of Nature*, W.H.Freeman & Co Ltd.

McGarigal K., Marks B.J., 1995, *FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure*.

Miller D., 2001, "A method for estimating changes in the visibility of land cover", *Landscape and Urban Planning*, Vol.54, 91–104.

Mouflis G.D., Gitas I.Z., Iliadou, S., Mitri G.H., 2008, "Assessment of the visual impact of marble quarry expansion (1984–2000) on the landscape of Thasos island, NE Greece", *Landscape and Urban Planning*, Vol.86, No.1, 92–102. http://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.12.009

O 'neill R.V, Krummel J.R., Gardner R. H., Sugihara G., Jackson B., Deangelis D.L., Graham R. L., 1988, "Indices of landscape pattern", *Landscape Ecology*, Vol.1, No.3, 153–162. http://doi.org/10.1007/BF00162741

O'Sullivan D., Turner A., 2001, "Visibility graphs and landscape visibility analysis", *International Journal of Geographical Information Science*, Vol.15, No. 3, 221–237. http://doi.org/10.1080/13658810151072859

Ode Å., Tveit M.S., Fry G., 2008, "Capturing Landscape Visual Character Using Indicators: Touching Base with Landscape Aesthetic Theory", *Landscape Research*, Vol.33, No. 1, 89–117. http://doi.org/10.1080/01426390701773854

Palmer J.F., 2004, "Using spatial metrics to predict scenic perception in a changing landscape: Dennis, Massachusetts", *Landscape and Urban Planning*, Vol.*69, N*o. 2-3, 201–218. http://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2003.08.010

Rød J. K., van der Meer D., 2009, "Visibility and dominance analysis: assessing a high-rise building project in Trondheim", *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol.36, No. 4, 698–710. http://doi.org/10.1068/b34118

Sahraoui Y., Clauzel C., Foltête J-C., 2016. Spatial modelling of landscape aesthetic potentiel in urban-rural fringes, Journal of Environmental Management, Vol.181, 623-636. http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.031

Sahraoui Y., Youssoufi S., Foltête J-C., 2016. A comparison of in siu and GIS landscape metrics for residential satisfaction modeling, Applied Geography, Vol.74, 199-210. http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.07.011

Schirpke U., Tasser E., Tappeiner U., 2013, "Predicting scenic beauty of mountain regions", *Landscape and Urban Planning*, Vol.111, No.1–12. http://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.11.010

Sevenant M., Antrop M., 2007, "Settlement models, land use and visibility in rural landscapes: Two case studies in Greece", *Landscape and Urban Planning*, Vol.80, No.4, 362–374. http://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2006.09.004

Shannon C.E., Weaver W., 1971, *The mathematical theory of communication*, Urbana, University of Illinois Press.

Skov-Petersen H., Snizek B., 2007, "To see or not to see: Assessment of Probabilistic Visibility", *10th AGILE International Conference on Geographic Information Science*, 1–12.

Travis M.R., Elsner G.H., Iverson W.D., Johnson C.G., 1975, *VIEWIT: computation of seen areas, slope, and aspect for land-use planning*, Usda Forest Service General Technical Report, Berkeley.

Wieber J.C., 1995, "Le paysage visible, un concept nécessaire", in Roger A. (ed.), *La théorie du paysage en France (1974-1994)*, Seyssel, Champ Vallon.

ANNEXES

Annexe 1. Description des indices CONTAG et IJI

L'indice de contagion (O'neill et al., 1988) est basé sur l'adjacence des pixels du *viewshed* (analyse planimétrique) ou de l'image (analyse tangentielle). Il correspond à la probabilité (en %) de trouver un pixel de la catégorie d'occupation du sol *i* contigu à un pixel de la catégorie d'occupation du sol *j*, tel que :

$$CONTAG = \left[1 + \frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m}\left[p_i \frac{g_{ij}}{\sum_{k=1}^{m} g_{ik}}\right]\left[ln\left(p_i \frac{g_{ij}}{\sum_{k=1}^{m} g_{ik}}\right)\right]}{2\ln(m)}\right]100$$

avec P_i la proportion de la catégorie d'occupation du sol *i*, g_{ik} le nombre d'adjacences entre les pixels des catégories d'occupation du sol *i* et *j*, et *n* le nombre de catégories d'occupation du sol au sein de l'image. Une valeur élevée de l'indice de contagion indique que les pixels de la même catégorie d'occupation du sol forment un agrégat, alors que les valeurs faibles forment une mosaïque.

L'indice d'interspersion et juxtaposition (McGarigal & Marks, 1995) est basé sur les adjacences entre les taches d'occupation du sol. Il correspond à un indice de diversité appliqué aux fréquences d'adjacence entre ces catégories, tel que :

$$IJI = \frac{-\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=i+1}^{m}\left[\left(\frac{e_{ik}}{E}\right)\ln\left(\frac{e_{ik}}{E}\right)\right]}{\ln(0.5[m(m-1)])}100$$

avec e_{ik} la longueur totale des adjacences entre les catégories d'occupation du sol *i* et *k*, *E* la longueur totale des adjacences, et *m* le nombre de catégories. Les valeurs sont proches de 0 si les catégories d'occupation du sol sont disposées de manière très structurée et proches de 100 si aucune régularité n'est observée.

NOTES

1. https://www.legifrance.gouv.fr/eli/loi/2016/8/8/2016-1087/jo/texte.
2. https://grass.osgeo.org/grass64/manuals/r.los.html
3. https://grass.osgeo.org/grass70/manuals/addons/r.viewshed.cva.html
4. https://hub.qgis.org/projects/viewshed
5. Cf. Bittner & Wonka (2003) pour plus de précisions sur la comparaison entre les algorithmes de visibilité et les différents problèmes associés à chacune de ces dimensions.
6. En effet, comme le précisent Cavailhès & Joly (2006), « une plaine cultivée vue au loin et rapportée à la surface couverte par le regard peut prendre une part importante du champ visuel lorsqu'on la mesure en kilomètres carrés, mais cette même plaine, telle qu'elle s'inscrit dans le volume scénique du paysage, est perçue avec un angle incident très faible qui en réduit l'importance panoramique à un liseré étroit juste au-dessous de la ligne d'horizon. A l'opposé, une maison ou un arbre proches peuvent remplir toute la vue malgré une emprise au sol réduite ».
7. Les classes de distance sont définies par une suite géométrique : inférieur à 10m, de 10 à 100m, de 100m à 1km, de 1km à 10km, plus de 10km.

RÉSUMÉS

Cet article présente le logiciel « PixScape », un outil pour modéliser le paysage visible à partir de données spatiales numériques. PixScape offre l'avantage d'être un outil intégré regroupant l'ensemble des fonctionnalités disponibles dans les outils SIG standards existants dans ce domaine et proposant d'autres fonctions originales. Il facilite l'enchaînement des tâches dédiées aux analyses de visibilité et propose une large gamme de métriques fréquemment utilisées. Son originalité repose notamment sur le choix entre deux méthodes spécifiques de calculs de visibilité et la possibilité d'analyse avancée de la configuration des scènes paysagères. L'article présente un panorama de l'ensemble des paramètres d'analyses offertes par PixScape, les métriques de visibilité disponibles, ainsi que les méthodes de parallélisation visant à réduire les temps d'exécution.

This paper presents the PixScape software dedicated to landscape visibility modeling based on digital spatial data. PixScape is an integrated software combining all existing functions in standard GIS tools in this field, and proposing 'other original functions. It facilitates the overall processing chain of visibility analyses, and offers a wide range of commonly used metrics. Its originality is to offer a choice between two specific methods of visibility computations, and the possibility of advanced analysis of landscape visible configuration. The paper presents an overview of all the visibility analysis parameters offered by PixScape, all the available visibility metrics, and the parallelization methods for reducing computation time.

INDEX

Mots-clés : paysage, modélisation, analyse de visibilité, logiciel, métrique paysagère
Keywords : landscape, GIS modeling, visibility analysis, software, landscape metric

AUTEURS

YOHAN SAHRAOUI

ThéMA (UMR 6049), CNRS, Université Bourgogne Franche Comté, France
yohan.sahraoui@gmail.com

GILLES VUIDEL

ThéMA (UMR 6049), CNRS, Université Bourgogne Franche Comté, France
gilles.vuidel@univ-fcomte.fr

JEAN-CHRISTOPHE FOLTÊTE

ThéMA (UMR 6049), CNRS, Université Bourgogne Franche Comté, France
jean-christophe.foltete@univ-fcomte.fr

DANIEL JOLY

ThéMA (UMR 6049), CNRS, Université Bourgogne Franche Comté, France
daniel.joly@univ-fcomte.fr