

DÉTERMINATION EN MODE MAILLÉ DU CHAMP D'INTERVISIBILITÉ DANS UN MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN

JEAN-PAUL DONNAY

Université de Liège/Belgique

Résumé Cet article propose un algorithme original pour la résolution approchée, mais rapide, du champ d'intervisibilité dans le contexte d'un modèle numérique de terrain maillé (MNT raster). L'algorithme est basé sur la recherche des intersections potentielles de la surface orographique avec tous les rayons menés depuis le point de vue vers les pixels situés sur les bords du rectangle capable du MNT. Le chemin des rayons est déterminé par l'algorithme classique de Bresenham et, au fur et à mesure, la visibilité des pixels situés sur leur parcours est mise à jour. Une brève application de l'algorithme, implantée sur micro-ordinateur, illustre l'article.

1. Position du problème

La détermination du champ de visibilité trouve application dans plusieurs domaines distincts tels que, par exemple, les applications militaires, les communications, la télé-détection radar, l'aménagement du territoire et l'environnement (Aronoff 1989; Burrough 1986). C'est avec l'intention de l'appliquer aux deux derniers domaines cités que l'algorithme présenté ici a été conçu. Ainsi, par exemple, l'étude de paysages peut-elle tirer profit de la délimitation de l'espace embrassé depuis un point de vue déterminé, à des fins esthétiques, touristiques ou d'aménagement. En matière d'environnement, les études d'incidence de l'implantation d'une infrastructure ou d'un ouvrage d'art chercheront à déterminer d'où est perceptible cette construction. Ces exemples permettent de rappeler les éléments du problème.

Au sein d'un espace d'étude déterminé, le champ de visibilité peut être défini, selon l'application, soit comme l'ensemble des points de cet espace visibles depuis un point de vue précis, soit comme l'ensemble des points de vue d'où est perceptible une cible précise. On conçoit aisément que ces deux définitions couvrent la même réalité, la seconde pouvant être ré-interprétée comme l'ensemble des points visibles depuis la cible prise comme point de vue. On peut ainsi parler de champ d'inervisibilité, tandis que dans la suite de cette analyse, l'élément unique, qu'il soit cible ou point de vue, sera intitulé point de vue ou pv.

Les obstacles susceptibles de faire écran à la visibilité sont de deux natures: d'une part, les obstacles topographiques résultant des variations de la surface orographique et, d'autre part, les obstacles constitués par les objets situés à la surface du sol, naturels ou anthropiques. En fait, la hauteur de ces derniers s'ajoute à l'altitude du sol pour constituer une surface d'élévation au sein de laquelle un champ de visibilité doit être délimité.

Tel que posé, le problème supporte plusieurs simplifications. Ainsi par exemple, il n'est fait aucun cas des interférences atmosphériques ou de la courbure de la terre qui, dans des conditions données, sont susceptibles d'intervenir sur la délimitation d'un champ de visibilité. En outre, il apparaît que, dans la pratique, l'identification du champ ne pourra être qu'approximative, l'imprécision étant fonction des erreurs propagées à travers les procédures d'édification de la surface d'élévation.

A cet égard, la présente analyse prend comme hypothèse que la surface orographique est rendue par un modèle numérique de terrain (MNT), soit une image numérique où chaque pixel rend compte de l'altitude de la portion de terrain qu'il représente. Les exemples utilisés dans la suite ont été constitués par interpolation entre des courbes de niveau digitalisées (Donnay 1988). Dans ce cas précis, l'altitude des pixels est affectée des erreurs suivantes (Theobald 1989):

- erreurs à la constitution de la carte topographique (restitution, repérage, etc.) et jeux du papier;
- erreurs du positionnement et généralisation introduite par la digitilisation;
- rasterisation des courbes digitalisées, fonction de la résolution de la grille utilisée;
- erreurs sur l'interpolation entre les courbes.

La prise en considération de la hauteur des objets situés à la surface du sol soulève d'autres difficultés. Une méthode exploitée à moyenne, voire à grande échelle consiste à utiliser une spatio-carte des affectations du sol issue d'un traitement de données télédéteçtées et géométriquement corrigée sur le MNT. A l'altitude de chaque pixel du MNT, est ajoutée la hauteur moyenne de l'affectation couvrant le pixel homologue dans l'image de l'occupation du sol

JEAN-PAUL DONNAY est maître de conférence, Centre de Recherches de la Faculté des Sciences, Université de Liège, Belgique. MS *déposé le 31 décembre 1991*

(Dufourmont *et al.*, 1991). Le complément d'altitude attribué à chaque pixel est pourtant sujet à trois sources d'erreurs:

- la correction géométrique de l'image des affectations sur le MNT;
- les confusions et omissions inévitables dans l'identification des taxons d'affectation;
- l'usage d'une hauteur moyenne pour des affectations susceptibles de présenter une variation sensible de hauteur.

Cette énumération des erreurs capables d'entacher la surface d'élévation ne vise pas à nier l'intérêt de la recherche du champ de visibilité, mais la qualité relative des données de départ laisse présager les limites de la méthode et le caractère plus indicatif que rigoureux de la délimitation du champ. Dans ces conditions, la disponibilité d'une méthode approchée mais rapide de détermination du champ de visibilité, capable le cas échéant de réaliser de multiples simulations dans un délai raisonnable, peut s'avérer plus utile qu'une technique assurant une grande précision numérique au détriment du temps de calcul.

L'algorithme présenté dans la suite est développé dans cette optique. Les données de départ sont constituées par une surface d'élévation codée en nombres réels, intitulée MNT pour plus de facilité, que les altitudes aient été ou non corrigées par la hauteur des affectations, et par une cible où un point de vue (PV). La méthode travaille à la résolution de la matrice du MNT et les coordonnées planes de PV sont fournies en termes d'indices de ligne et de colonne dans cette matrice. L'altitude de PV, par contre, peut différer de l'altitude du pixel présentant les mêmes coordonnées planes dans le MNT. Le résultat du traitement est constitué par une matrice binaire, de mêmes dimensions que le MNT, où sont distingués les pixels visibles depuis PV (valeur 1) de ceux qui ne le sont pas (0).

2. Détermination de la visibilité le long d'un profil

Examinons un profil mené à travers le MNT, entre PV et la limite de la zone d'étude. Un point quelconque du profil sera déclaré visible depuis PV si le rayon joignant ce point à PV ne coupe à aucun moment la portion de profil comprise entre ces deux points (figure 1).

Si un obstacle est susceptible de faire écran sur le chemin du rayon, l'existence de l'intersection sera vérifiée en comparant la hauteur du profil à la hauteur du rayon en ce point. La construction suivante (figure 2) permet l'obtention immédiate de la hauteur (Z_R) du rayon émanant de A, à l'obstacle E:

$$Z_R = Z_A + (Z_{PV} - Z_A) \cdot I/L$$

Si $Z_R > Z_E$ alors A est visible depuis PV

Si l'on reporte la trace du rayon A-PV dans le système de coordonnées planes de la carte, on constate en outre (figure 3):

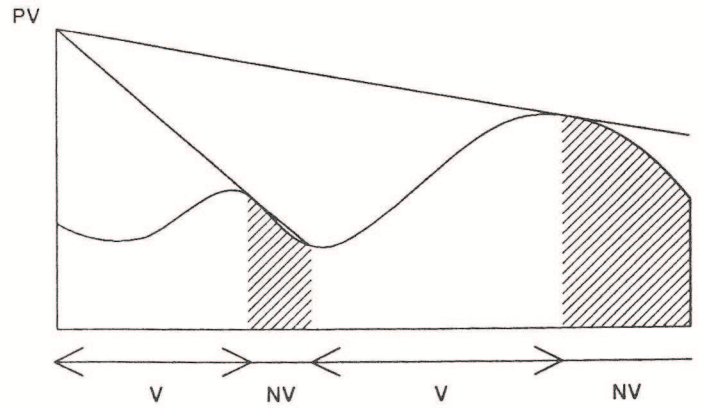


FIGURE 1. Profil à travers le MNT et rayons de visibilité menés depuis PV; V = zone visible depuis PV - NV = zone non visible depuis PV.

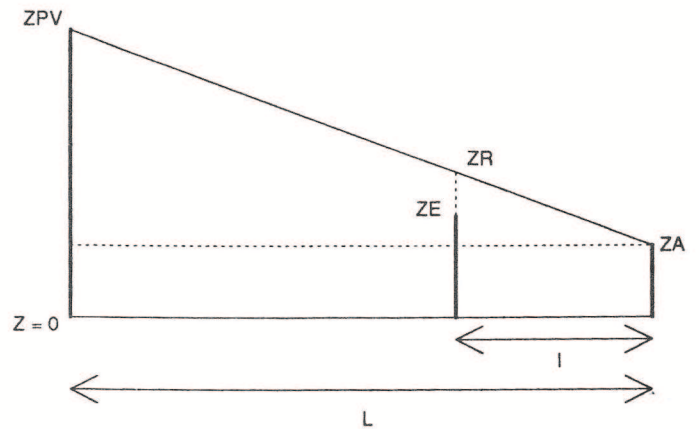


FIGURE 2. Présence d'un écran potentiel sur le chemin du rayon de visibilité entre PV et A.

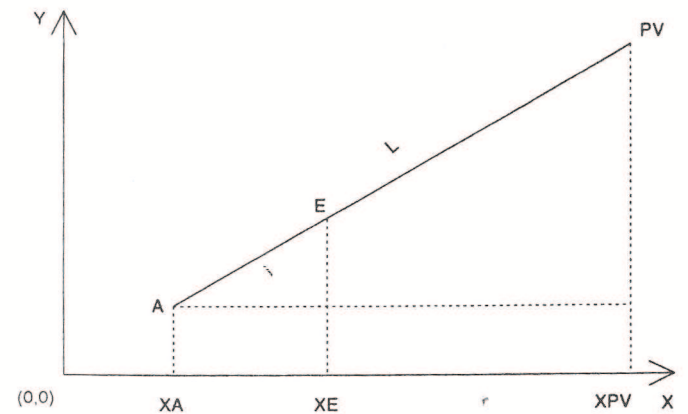
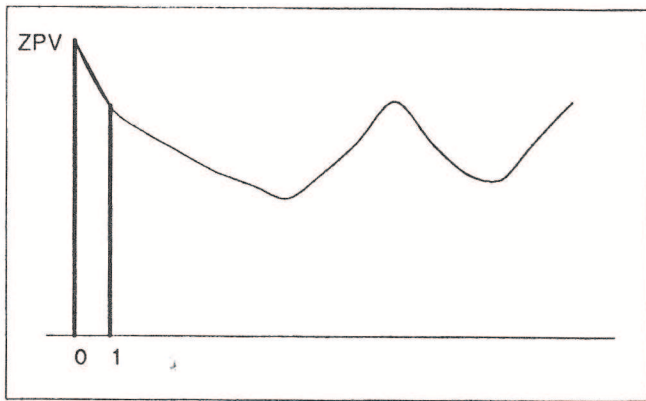


FIGURE 3. Projection plane du rayon de visibilité entre PV et A (cf. figure 2).

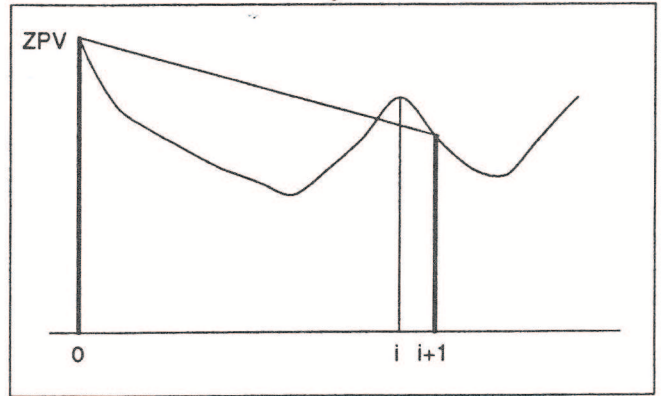
$$I/L = (X_E - X_A) / (X_{PV} - X_A)$$

d'où: $Z_R = Z_A + (Z_{PV} - Z_A) \cdot (X_E - X_A) / (X_{PV} - X_A)$ (1)

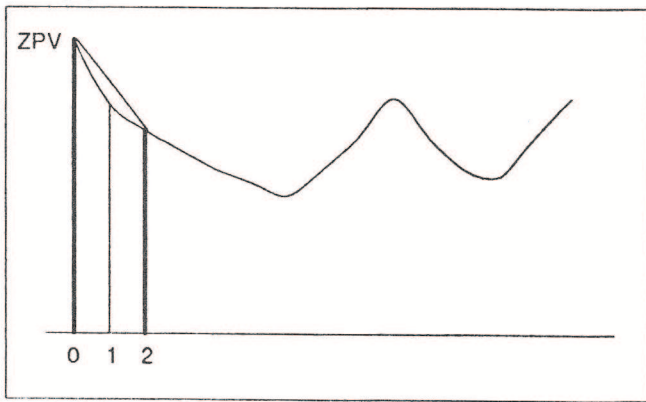
Le profil étant constitué d'une infinité de points, il n'est pas possible de déterminer leur visibilité sans un échantillonnage préalable. La disponibilité d'un MNT sous forme



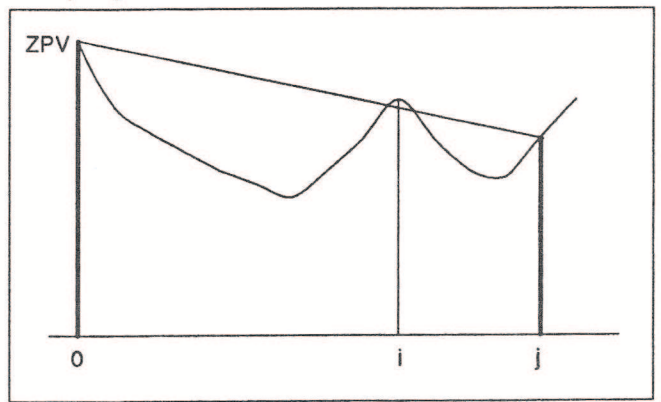
1. $V(1) = \text{VRAI} \rightarrow \text{Obstacle} = Z_1$



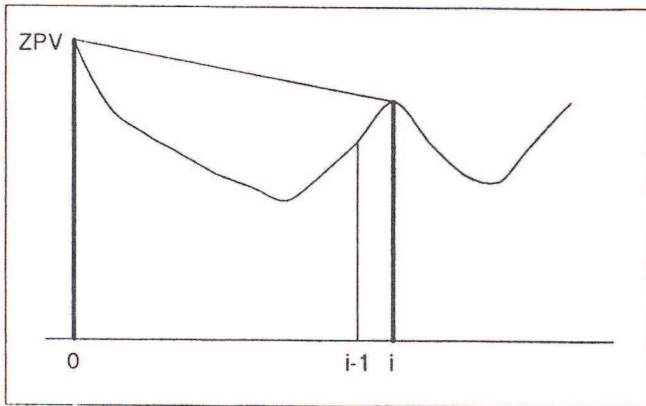
4. $V(i+1) = \text{FAUX} \rightarrow \text{Obstacle} = Z_i$



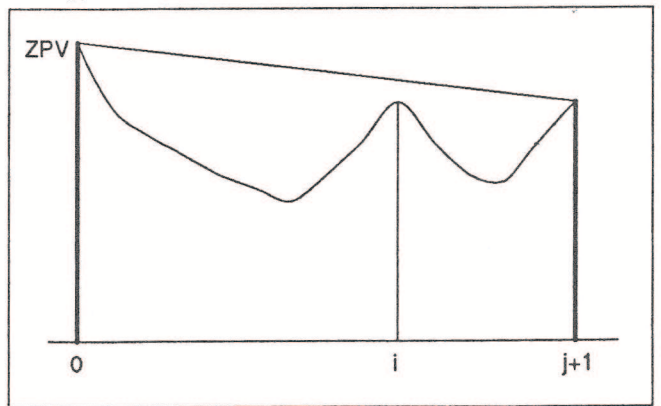
2. $V(2) = \text{VRAI} \rightarrow \text{Obstacle} = Z_2$



5. $V(j) = \text{FAUX} \rightarrow \text{Obstacle} = Z_i$



3. $V(i) = \text{VRAI} \rightarrow \text{Obstacle} = Z_i$



6. $V(j+1) = \text{VRAI} \rightarrow \text{Obstacle} = Z_{j+1}$

FIGURE 4. Propagation de l'écran potentiel sur un profil - $V(i)$ = visibilité du pixel i .

d'une matrice d'altitudes introduit précisément cette discrétisation de l'espace. Examinons tout d'abord le profil constitué par la colonne du MNT passant par p_v . Ce profil compte un nombre fini de pixels pour chacun desquels il est possible de tester la visibilité. Il est intéressant de constater que, moyennant l'usage de pixels carrés, il n'est pas nécessaire de prendre en compte la taille réelle des pixels. Par conséquent, la formule (1) ci-dessus reste d'application si l'on substitue les indices de ligne, dans le cas du profil-colonne considéré, aux abscisses. En outre,

la formule est indifférente à l'unité utilisée pour exprimer les altitudes.

Pour éviter de calculer inutilement les intersections éventuelles du MNT par le rayon joignant p_v à chaque pixel du profil, l'algorithme suivant sera utilisé (figure 4):

- 1 Partant de p_v vers la limite de la zone d'étude, le premier pixel du profil touche p_v et est considéré visible par construction; tout pixel visible du profil devient un obstacle potentiel pour les pixels suivants;

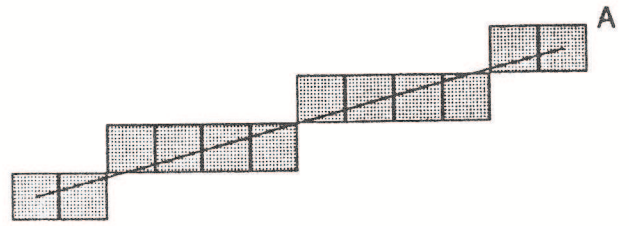
- 2 Tant que le pixel précédent est visible depuis P_V , la hauteur du rayon émanant du pixel courant est comparée à l'altitude du pixel précédent;
- 3 Dès qu'un pixel n'est plus visible depuis P_V , l'altitude de l'obstacle est mémorisée;
- 4 Tant que le pixel précédent n'est pas visible depuis P_V , la hauteur du rayon émanant du pixel courant est comparée à l'altitude du dernier obstacle rencontré.

3. Discrimination de la visibilité dans le MNT

En principe, pour déterminer le champ de visibilité autour de P_V , il semble nécessaire de mener un rayon depuis chaque pixel vers P_V et de tester l'intersection de ce rayon avec la surface du MNT. Cependant, on a pu constater à l'étape précédente, que l'on gagnait un temps considérable lorsqu'on examinait, en séquence, les pixels alignés le long d'un profil. Grâce à l'algorithme décrit, on peut fixer la visibilité d'un pixel en testant une seule intersection potentielle: soit avec le pixel le précédent directement dans la direction de P_V , soit avec le dernier obstacle rencontré le long de la portion de profil déjà parcourue. Par conséquent, pour déterminer le champ de visibilité au sein de la totalité du MNT, il serait souhaitable de réduire l'analyse à un nombre minimum de profils menés depuis P_V , mais à condition que tous les pixels du MNT se trouvent situés au moins une fois sur le chemin d'un profil. Cette condition est vérifiée si l'on retient les profils joignant P_V à tous les pixels constituant les bords du rectangle capable du MNT.

Le suivi des profils construits sur la colonne, la ligne et les diagonales passant par P_V , est élémentaire. Par contre, la reconstitution de tous les autres profils doit faire appel à un algorithme de tracé. L'algorithme de Bresenham, qui constitue sans doute la primitive graphique la plus fondamentale (Newman et Sproull 1981), a été retenu dans cette application. L'algorithme fournit les indices de ligne et de colonne des pixels situés sur le chemin du profil. Ces indices permettent d'extraire les valeurs d'altitude des pixels correspondant et les triplets d'information (ligne, colonne, altitude) sont sauvegardés en mémoire dans une liste ou un vecteur. Selon l'octant dans lequel s'inscrit le profil, le nombre de triplets constituant le vecteur est identique au nombre de lignes ou de colonnes séparant P_V du bord considéré. Une fois le vecteur construit, il est soumis à l'algorithme de visibilité décrit dans le paragraphe précédent, fixant, depuis P_V vers le bord de l'image, la visibilité de chaque pixel situé sur le parcours du profil correspondant.

La disposition en grille des pixels au sein de l'image numérique crée pourtant certaines distorsions qu'il est bon d'évaluer et/ou de corriger. Les centres des pixels sélectionnés par l'algorithme de Bresenham ne sont pas strictement alignés le long du profil (figure 5), à l'exception des directions verticales, horizontales et diagonales passant par P_V . En fait, le profil s'écarte des centres des pixels identifiés de plus ou moins une demi largeur de pixel, de sorte que la plupart des pixels sont sélectionnés sur le



PV

FIGURE 5. Ecart au profil, des centres des pixels sélectionnés par l'algorithme de Bresenham.

chemin de plusieurs profils, émanant de pixels marginaux voisins. En conséquence, la portion du profil comprise entre P_V et un pixel intermédiaire quelconque ne coïncide pas nécessairement avec le trajet du rayon émanant du centre de ce pixel vers P_V . En outre, le profil étant susceptible de traverser un pixel de manière relativement marginale, on peut se poser la question de savoir s'il n'y a pas lieu de corriger les valeurs d'altitude utilisées pour tester la visibilité.

4. Visibilité des pixels intermédiaires

La balayage de l'image du MNT par les rayons joignant P_V aux pixels constituant les bords de l'image assure la prise en compte, au moins une fois, de tous les pixels de l'image. En fait, la plupart des pixels sont situés sur le chemin de plusieurs rayons voisins et cette fréquence de passage est d'autant plus grande que les pixels sont situés à proximité du point de vue. La détermination de la visibilité des pixels situés entre P_V et les bords est donc testée à plusieurs reprises mais cela, dans des conditions qui peuvent s'avérer légèrement différentes.

A titre d'exemple, considérons le pixel A situé, selon l'algorithme de Bresenham, à la fois sur le profil B_1-P_V et sur le profil B_2-P_V (figure 6).

La visibilité du pixel A sera donc testée au moins deux fois mais on constate que le chemin utilisé pour joindre A à P_V passe par C_1 (profil B_1-P_V) ou par C_2 (profil B_2-P_V) selon le cas. Parmi les possibilités offertes, la fixation définitive de la visibilité de A devrait utiliser le chemin se rapprochant le plus du rayon $A-P_V$, tel qu'il serait utilisé pour fixer la visibilité de A indépendamment des autres pixels de l'image (en tireté sur la figure 6). Ce rayon $A-P_V$ peut être prolongé au delà de A, jusqu'à son intersection avec le bord de l'image. On peut ainsi déterminer le pixel du bord de l'image qui constitue l'origine du profil fixant définitivement la visibilité de A (figure 7).

$$dY_B = dX_B - \operatorname{tg} \alpha$$

$$dY_B = dX_B - dY_A / dX_A \quad (2)$$

La fixation définitive de la visibilité des pixels intermédiaires implique donc la présence d'un test lors de l'examen de chaque profil mené entre le point de vue et les pixels du bord de l'image. Pour un profil donné, les valeurs dX_B et dY_B , mentionnées dans la formule (2), sont connues

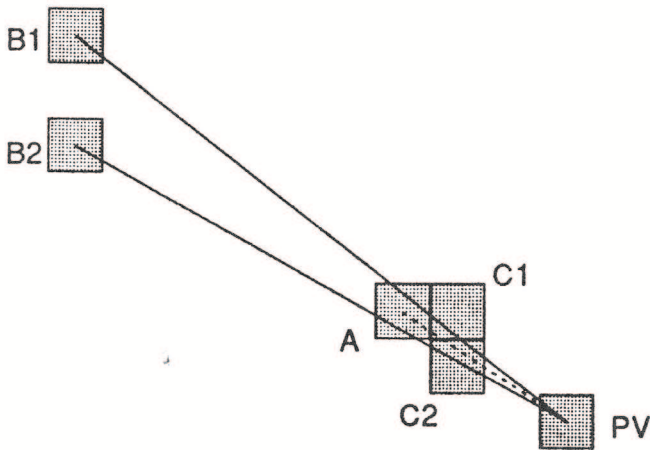


FIGURE 6. Traversée du pixel A par des rayons distincts issus de PV.

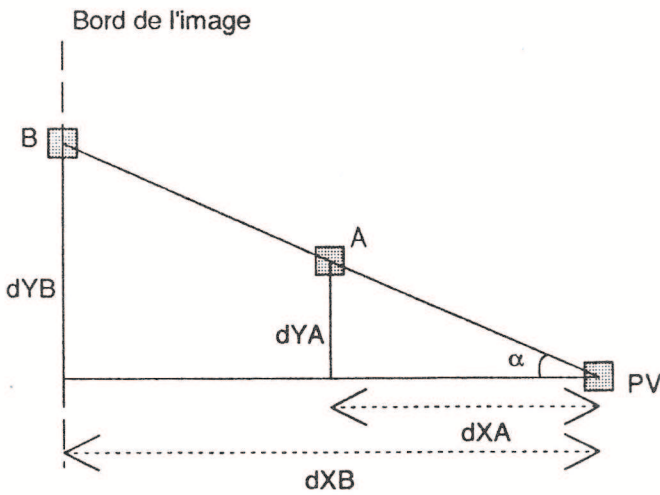


FIGURE 7. Détermination de la visibilité du pixel A.

et constantes. Pour chaque pixel A, situé sur le chemin de ce profil, on dispose de dX_A et de dY_A . Si l'égalité (2) se vérifie, la visibilité de A déterminée selon ce profil est considérée comme définitive et portée dans l'image finale du champ de visibilité. Si la formule (2) ne s'applique pas, la visibilité de A est considérée comme temporaire, c'est-à-dire qu'elle est utilisée pour fixer la visibilité des pixels situés au delà de A sur le profil considéré, mais qu'elle n'est pas reportée dans le champ de visibilité final. Puisque l'on travaille avec des indices de ligne et de colonne dans l'image, il est bien entendu que l'égalité (2) doit porter sur des valeurs entières, ce qui revient à tester l'égalité suivante:

$$dY_B = \text{ROUND} (dX_B \cdot dY_A / dX_A)$$

5. Interpolation des valeurs de z

La détermination de la visibilité sur un profil donnée utilise l'altitude des pixels localisés sur ce profil par l'algorithme de Bresenham. On a cependant constaté qu'un même pixel était généralement traversé par plusieurs rayons voisins, selon des directions légèrement différentes.

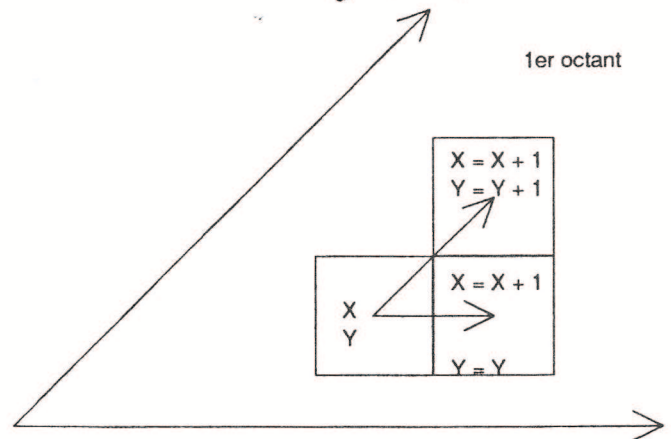


FIGURE 8. Possibilités de déplacements offertes dans le premier octant selon l'algorithme de Bresenham.

Si l'image supportant le MNT ne retient qu'une seule valeur d'altitude par pixel, il n'est pas interdit de lever l'hypothèse d'homogénéité au sein d'un pixel, en considérant les valeurs d'altitude des pixels voisins. Il est ainsi permis d'envisager des altitudes différentes pour un pixel selon la direction de traversée prise en compte.

L'amélioration introduite par la prise en compte d'une altitude compensée selon la direction de traversée de chaque pixel ne doit cependant pas être surestimée. L'erreur sur l'altitude, propagée à travers les diverses procédures ayant conduit à l'obtention de la surface d'élévation, est vraisemblablement du même ordre de grandeur que l'amélioration introduite, de sorte que cette dernière ne sera prise en considération que si son introduction ne pénalise pas outre mesure les performances d'exécution de l'algorithme.

En dehors des directions fondamentales, constituées par la verticale, l'horizontale et les deux diagonales, tout profil joignant le point de vue à un pixel du bord de l'image s'inscrit dans un octant, n'autorisant le choix qu'entre deux directions à l'algorithme de Bresenham. A titre d'exemple, ramené dans le premier octant, le cheminement du profil de proche en proche à travers les pixels s'effectuera selon une séquence (figure 8).

$$\begin{aligned} X_{i+1} &= X_i + 1 & \text{ou} & & X_{i+1} &= X_i + 1 \\ Y_{i+1} &= Y_i & & & Y_{i+1} &= Y_i + 1 \end{aligned}$$

On peut considérer qu'à chaque itération, l'algorithme de Bresenham choisit, parmi les deux pixels possibles, celui dont le centre est le plus proche du profil. Mais, en dehors des directions fondamentales indiquées plus haut, le profil passe nécessairement entre les centres des deux pixels alternatifs. Il est dès lors possible de calculer une altitude à la traversée d'un pixel, par interpolation entre les altitudes attribuées aux centres des deux pixels voisins et lues dans le MNT. Pour fixer cette interpolation, il reste à connaître les distances séparant les deux centres de pixels, du profil considéré. Puisque seuls les écarts relatifs importent, ils peuvent être évalués sur le bord de l'image.

Il suffit de comparer l'origine du profil sur le bord de l'image avec les intersections, sur ce même bord, des prolongations des deux rayons issus de PV et passant par les centres des deux pixels alternatifs de l'algorithme de Bresenham (figure 9). Ces intersections sont calculées par la formule (2) comme ci-dessus.

Dans ces conditions, l'altitude de pixel A selon la direction du profil PV-C, soit Z_{AW} dans la formule suivante, peut être estimée à :

$$Z_{AW} = Z_A + (Z_B - Z_A) \cdot (dY_C - dY_D) / (dY_E - dY_D)$$

où: Z_A et Z_B = valeurs d'altitude des pixels A et B lues dans le MNT

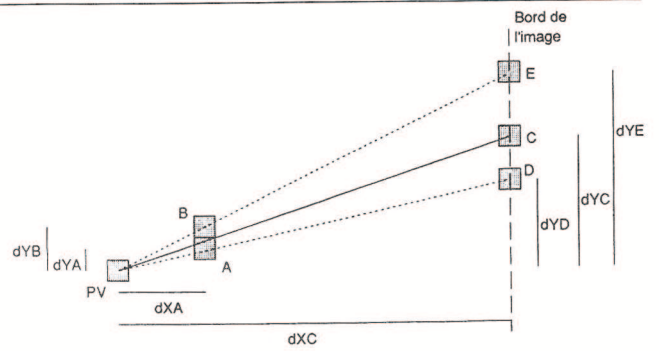
D'une manière pratique, les valeurs Z_B et dY_B sont obtenues au fur et à mesure des itérations de l'algorithme de Bresenham puisque B constitue toujours l'alternative non retenue de A. Les valeurs de Z_B et dY_B peuvent être stockées dans le même vecteur que celui conservant les valeurs relatives au pixel A, moyennant adaptation adéquate de l'enregistrement, et la valeur de Z_{AW} sera calculée ultérieurement, lors du test de visibilité.

6. Application

L'application qui suit n'a d'autre ambition que d'illustrer les résultats de la méthode présentée dans les pages précédentes. Le site test couvre la partie Sud du centre de la ville de Liège (Belgique), à la confluence de la *Meuse* et de l'*Ourthe*. Le site est relativement encaissé puisque l'on enregistre une dénivellation de quelque 120 mètres (60 à 180 mètres d'altitude) au sein du champ de la carte (7.5×7.5 km). L'analyse a été réalisée dans le cadre d'une étude d'impact concernant l'installation d'un pont sur la *Meuse*, dont le mât culminerait à une hauteur de 76 mètres au dessus de la plaine alluviale. Le modèle numérique de terrain est obtenu par interpolation entre les courbes de niveau, numérisées en mode vectoriel au départ d'une carte topographique au 1/10 000, puis rasterisées. Les altitudes n'ont pas été corrigées par la hauteur des affections et l'image du MNT a une taille de 512×512 pixels.

La figure 10 illustre le MNT habillé d'estompage (illumination 45° NW), tandis que le site du mât dont on cherche à évaluer la visibilité est indiqué par une croix dans l'image. Calculé dans les conditions d'analyse énoncées ci-dessus, le champ d'intervisibilité est fourni sous la forme d'un masque booléen (figure 11), dont la limite est aisément obtenue par filtrage (figure 12). La figure 13, enfin, superpose à l'image estompée du MNT, la limite du champ d'intervisibilité sous la forme d'un trait continu de couleur blanche. Pour améliorer la lisibilité de la reproduction, cette limite a été soumise à une opération de dilatation.

Une évaluation des performances absolues de l'algorithme est difficile, dans la mesure où le temps de traitement est d'abord fonction de la taille de l'image et de la configuration-hôte. Tout au plus, signalera-t-on, pour information, que l'application utilise une image du MNT



où:

A: pixel sur le passage du profil PV-C choisi par l'algorithme de Bresenham;
B: pixel alternatif pour l'algorithme de Bresenham;

D: intersection du rayon PV-A avec le bord de l'image, soit:

$$dY_D = dX_C \cdot dY_A / dX_A$$

E: intersection du rayon PV-B avec le bord de l'image, soit:

$$dY_E = dX_C \cdot dY_B / dX_A$$

FIGURE 9. Fixation par interpolation de l'altitude du pixel A sur le chemin du rayon issu de PV.

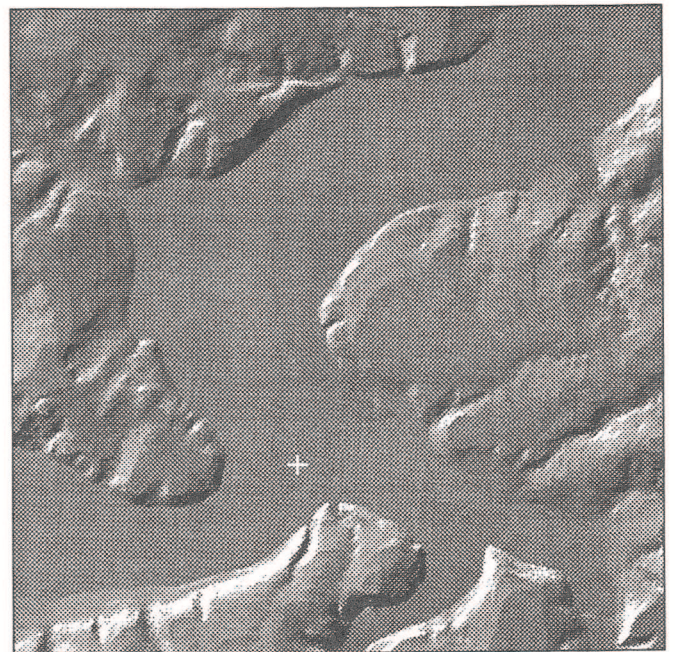


FIGURE 10. Modèle numérique de terrain du site de confluence des vallées de la Meuse et de l'Ourthe (Liège, Belgique). Le point de vue est indiqué par une croix dans l'image.

de dimensions 512×512 pixels et que le temps de calcul du champ d'intervisibilité est d'un peu moins de 6 minutes sur une configuration IBM PS/2-80 équipée d'un coprocesseur mathématique et d'un système graphique 8514 (carte et écran). Le programme, écrit en Pascal, utilise la mémoire graphique pour enregistrer le masque de visibilité et un disque virtuel pour stocker le MNT codé en nombres réels. Il aurait pu être intéressant de comparer les performances et les qualités de quelques algorithmes alternatifs exécutés sur un même matériel. Malheureusement, les fonctions 'Viewshed' offertes par les logiciels disponibles au labo-



FIGURE 11. Masque booléen du champ d'intervisibilité (en gris: le territoire vu depuis le point de vue). Le point de vue est indiqué par une croix dans l'image.



FIGURE 12. Limite du champ de visibilité obtenue par filtrage (filtre de Roberts) du masque apparaissant à la figure 11. Le point de vue est indiqué par une croix dans l'image.

ratoire en version dos ou os/2, sont soit incomparables (point de vue situé obligatoirement hors du MNT), soit inopérantes dans leur version actuelle.

Bibliographie

- ARONOFF, S. 1989. *Geographic Information System: A Management Perspective*, WDI. Publications, Ottawa, 294 p.
- BURROUGH, P.A. 1986. *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Management*, Clarendon Press, Oxford, 193 p.
- DONNAY, J.-P. 1988. Constitution d'un modèle numérique de terrain: une approche en mode raster sur micro-ordinateur, *Bulletin de la Société belge de photogrammétrie, télédétection et cartographie*, volume 171-172, pp. 47-60.
- DUFOURMONT, H., GULINCK, H. & WOUTERS, P. 1991. Relief dependent landscape typology derived from Spot data, *Proceedings of EGIS'91*, EGIS Foundation, Utrecht, pp. 286-297.
- NEWMAN, W.N. & SPROULL, R.F. 1981. *Principles of Interactive Computer Graphics*, McGraw Hill, International Student Edition, Tokyo, 539 p.
- THEOBOLD, D. 1989. Accuracy and bias issues in surface representation, in Goodchild M. & Gopal S., eds. *The Accuracy of Spatial Databases*, Taylor & Francis, pp. 99-106.

Zusammenfassung Der vorliegende Aufsatz behandelt einen Originalalgorithmus, der schnell einen Bereich der Intervisibilität innerhalb eines digitalen Höhenmodells im Rasterformat aufzeichnet. Der Algorithmus erforscht die möglichen Schnittstellen der Reliefoberfläche mit den Sichtstrahlen von dem Blickpunkt zu jedem Pixel, der im Bereich des Modells liegt. Die Bahn

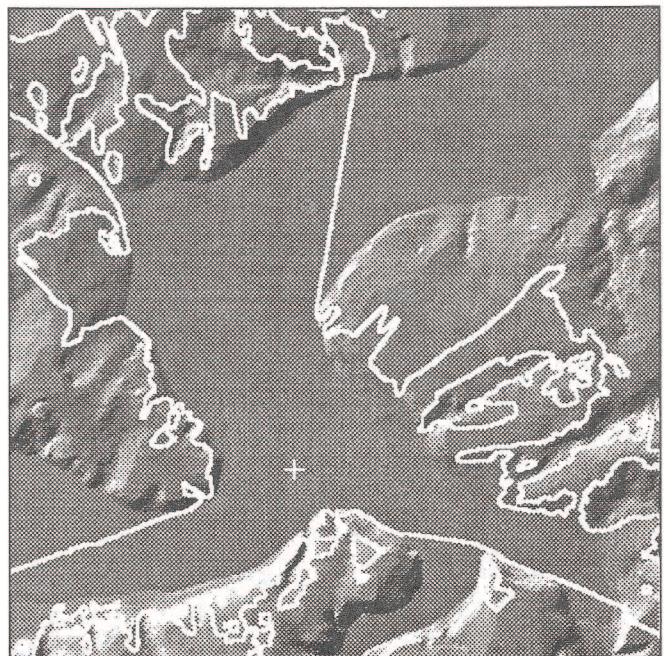


FIGURE 13. Incrustation de la limite du champ d'intervisibilité dans l'image estompée du modèle numérique de terrain (la limite du champ a subi une légère dilatation). Le point de vue est indiqué par une croix dans l'image.

der Strahlen wird nach dem Standardalgorithmus von Bresenham bestimmt, während die Visibilität der zur Bahn gehörenden Pixel auf den neuesten Stand gebracht wird. Eine kurzgefasste Anwendung des Algorithmus mittels eines Mikrocomputers wird im Aufsatz dargestellt.

Resumen Este mapa introduce un algoritmo original que rápidamente delinea un campo de visibilidad dentro de un modelo de elevación digital de grilla uniforme (DEM). El algoritmo busca las posibles intersecciones de la superficie orográfica con los rayos dibujados desde el punto de vista de cada pixel situado

en los márgenes del DEM. El camino de los rayos esta definido de acuerdo con el algoritmo estándar de Bresenham, mientras la visibilidad de los pixels que pertenecen a este camino está actualizada. Una breve aplicación del algoritmo, usando un microordenador, ilustra el artículo.