

Sur la pratique des modèles numériques de terrain (MNT) en hydrologie

L'expérience des bassins de Chalco (Mexique)

Christophe BOUVIER (1)

RÉSUMÉ

L'élaboration de MNT denses génère des reliefs parasites dont les conséquences sont importantes au niveau de la restitution des pentes et du modèle de drainage d'un bassin. Les problèmes rencontrés sont décrits à travers les travaux réalisés sur deux bassins expérimentaux du Mexique. Deux algorithmes d'interpolation, Babel et Orolog, ont été appliqués sur un échantillon de courbes de niveau équidistantes de 100 m. Les altitudes, les pentes, les directions de drainage restituées par les MNT ont été analysés, faisant apparaître des effets parasites différents pour les deux MNT, mais nécessitant dans les deux cas une correction manuelle des directions de drainage. L'article illustre la nécessité de procéder à un contrôle du modèle de drainage fourni par le MNT, et conclut sur la nécessité de caractériser le compromis optimal entre densité des courbes de niveau et qualité du MNT.

MOTS CLÉS : Modèles numériques de terrain — Hydrologie — Interpolation — Mexique.

ABSTRACT

HYDROLOGICAL APPLICATION OF THE DTM. THE CASE OF THE CHALCO BASINS (MEXICO)

Dense DTMs are subject to spurious relief features and stepping problems, which may have serious effects on the deduction of the slopes and drainage patterns of a catchment. These problems are illustrated by a study of two experimental catchments in Mexico. Both Babel and Orolog interpolation algorithms were applied to a sample of 100 metre interval contours. The analysis of the altitudes, the slopes and the drainage directions highlight the generation of false relief, which are different for each DTM, but require in both cases a manual correction of the drainage directions. Checking the drainage model performed by a DTM is emphasized, and the conclusion is that the relation between the density of the contours and the quality of the DTM must be investigated and optimized.

KEY WORDS : Digital Terrain Model DTM — Hydrology — Interpolation — Mexico.

RESUMEN

DE LA APLICACION DE LOS MNE EN LA HIDROLOGIA. EL EJEMPLO DE LAS CUENCAS DE CHALCO (MÉXICO)

En la utilización de MNE densos, es frecuente que aparezcan oscilaciones indeseables en la restitución del relieve, que además tienen malas consecuencias en la determinación de las pendientes o de la red de drenaje de una cuenca. Estos problemas se describen a través del estudio de las cuencas experimentales de Chalco, en la periferia sureste de la Ciudad de México. Se aplicaron dos algoritmos de interpolación, Babel y Orolog, a una muestra de curvas de nivel con equidistancia de 100 metros. Se analizaron las altitudes, pendientes y direcciones de drenaje que se obtuvieron por cada MNE: los efectos parásitos, aunque diferentes para cada MNE, necesitan en ambos casos un procesamiento adicional del MNE, para finalmente disponer de una información confiable. Se describe en detalle dicho procesamiento, y en conclusión, se destaca la necesidad elaborar los MNE con una densidad de curvas de nivel suficiente para minimizar los defectos que suelen ocurrir con los MNE densos.

PALABRAS CLAVES : Modelo Numérico de Elevación — Hidrología — Interpolación — México.

(1) Hydrologue Orstom, 911, av. Agropolis, 34032 Montpellier Cedex 1.

INTRODUCTION

L'usage des modèles numériques de terrain (MNT) est de plus en plus fréquent en hydrologie, pour prendre en compte l'influence du relief dans la formation des crues. Le MNT peut effectivement apporter une information essentielle sur la distribution spatiale des pentes et plus généralement sur l'organisation du réseau de drainage, information d'autant plus séduisante que son acquisition est en partie automatisée. Cette information est actuellement reprise dans nombre de modèles hydrologiques, qu'ils dérivent d'une perception « hortonienne » du fonctionnement des bassins (Bouvier, 1994) comme d'une conceptualisation basée sur les aires contributives (O'Loughlin, 1981 ; Moore *et al.*, 1986 ; Band, 1986 ; Quinn *et al.*, 1991).

Il existe de nombreux algorithmes de production de MNT, qui diffèrent principalement par la forme des mailles et par les principes d'interpolation. Les performances de ces différents algorithmes peuvent varier en fonction du type de terrain, et surtout en fonction de la densité de courbes de niveau préalablement saisies. Le travail de digitalisation étant particulièrement long et fastidieux, on aura le plus souvent à travailler sur des MNT « denses », dont la résolution est sensiblement inférieure à la distance séparant les courbes de niveau. Or ces MNT denses présentent généralement divers défauts : oscillations parasites, striage, création de dépressions parasites, de boucles de drainage, pour ne citer que les principaux.

Au cours d'un essai de modélisation distribuée de la relation pluie-débit sur les bassins de Chalco (Bouvier *et al.*, 1992), nous avons eu l'occasion de tester deux algorithmes de production de MNT : Babel (Souris et Remy, 1989) et Orolog (Depraetere, 1991a), qui restituent tous deux la géomorphologie du bassin à l'échelle de mailles carrées régulières, mais diffèrent par le mode d'interpolation :

- interpolation barycentrique pour Babel ;
- interpolation par fonctions splines cubiques pour Orolog.

Nous présentons dans ce qui suit les problèmes apparus au cours de cette étude, ainsi que les traitements nécessaires pour contrôler et corriger les MNT et leurs produits dérivés afin d'obtenir un niveau de qualité satisfaisant pour des applications hydrologiques courantes.

1. CADRE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

1.1. LES BASSINS EXPÉRIMENTAUX

Les bassins San Marcos et Santo Domingo, de superficies respectives 110 km² et 30 km² (fig. 1), appartiennent au versant sud-est de la chaîne de volcans entourant la ville de Mexico. Les deux bassins présentent des caractéristiques assez semblables :

- des altitudes comprises entre 2 240 et 4 000 mètres ;

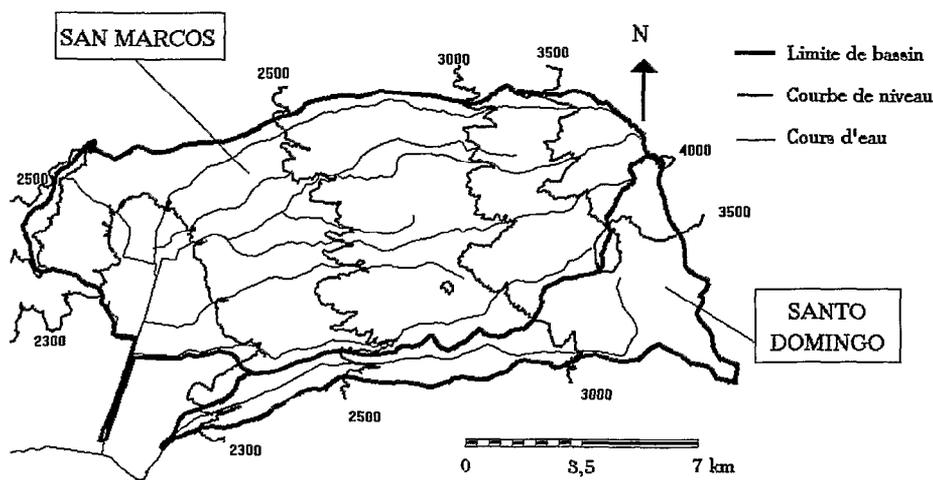


FIG. 1. — Les bassins de San Marcos et Santo Domingo.

- des pentes très faibles dans la partie aval, dans laquelle le drainage est assuré artificiellement par des canaux ;
- des formes très allongées ;
- des écoulements intermittents, concentrés sur la période mai-octobre, qui creusent de profonds et étroits canons (jusqu'à 20 ou 30 mètres de profondeur) dans le sol ;
- une pluviométrie moyenne qui varie en moyenne de 600 à 1 000 mm par an, en fonction de l'altitude.

Ces deux bassins ont servi de base à l'élaboration d'une modélisation régionale de la relation pluie-débit, réalisée à l'aide du modèle Mercedes (Bouvier, 1994). Ce modèle repose sur une discrétisation des bassins en mailles carrées, dont les pentes et les directions de drainage interviennent dans le calcul des caractéristiques de crue. On s'intéressera donc dans ce qui suit plus particulièrement à la reconstitution de ces variables à l'aide des MNT.

1.2. DESCRIPTION DES ALGORITHMES

1.2.1. Interpolation Babel

Babel calcule les altitudes aux nœuds du MNT par interpolation barycentrique. Pour le nœud de coordonnées i, j , l'algorithme recherche les intersections avec les courbes de niveau dans 8 directions nord, nord-est, etc. À partir de ces points P_k , $k = 1, 8$ (ou moins), l'altitude Z_{ij} au nœud de coordonnées i, j est calculée par l'expression :

$$Z_{ij} = \frac{\sum_k Z_k * D_k}{\sum_k D_k} \quad (1)$$

où D_k est le produit des distances des points P_m , autres que P_k , au point P_{ij} :

$$D_k = \prod_{m \neq k} d(P_m, P_{ij}) \quad (2)$$

1.2.2. Interpolation Orolog

Orolog interpole les altitudes aux nœuds du MNT à l'aide de fonctions splines cubiques, du type :

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (3)$$

Pour chaque nœud, sont déterminées quatre fonctions splines dans les directions N-S, E-W, NE-SW, NW-SE. Dans chacune de ces directions, la fonction spline est ajustée par morceaux entre les points correspondants à 2 courbes de niveau consécutives, en respectant les conditions suivantes :

- chaque morceau passe par les 2 points en question ;
- le raccordement des morceaux respecte la continuité des courbures (les dérivées secondes sont continues aux points extrémités des morceaux).

L'altitude Z_{ij} au nœud du MNT est égale à la moyenne pondérée des altitudes Z_k , $k = 1, 4$, calculées à l'aide des 4 fonctions splines. Deux types de pondération, normale ou logarithmique, peuvent être utilisés, tous deux basés sur les distances d_k et d_k' du nœud i, j aux points extrémités du morceau de fonction spline, dans chacune des 4 directions, soit :

$$Z_{ij} = \sum_k (W_k \cdot Z_k) / \sum_k W_k \quad (4)$$

avec, dans le cas d'une pondération normale :

$$W_k = 1/d_k + 1/d_k' \quad (5)$$

et dans le cas d'une pondération logarithmique :

$$W_k = \text{Log}(1/d_k + 1/d_k') \quad (6)$$

Enfin, il est possible d'introduire un coefficient de surpondération C , destiné à prendre en compte dans la pondération précédente la différence des altitudes entre les courbes de niveau consécutives. L'utilisation (optionnelle) de ce coefficient revient à multiplier les poids W_k par le coefficient C élevé à une puissance qui varie selon la disposition respective des morceaux définis par 4 courbes de niveau consécutives. Cet artifice, sans réel fondement théorique, a pour effet de limiter les oscillations parasites, mais peut également favoriser l'apparition de stries. Depraetere recommande de choisir des valeurs du coefficient de surpondération aussi voisines de 1 que possible, et propose par défaut la valeur 1.3.

1.3. CONSTITUTION DES MNT

Dans cette étude, la comparaison des algorithmes est réalisée dans les conditions suivantes :

— la zone étudiée a pour superficie 372,5 km², et englobe les deux sous-bassins San Marcos et Santo Domingo ;

— pour les deux algorithmes, l'élaboration du MNT est réalisée à partir des mêmes courbes de niveau (fig. 2), c'est-à-dire :

- courbes de niveau 2 240, 2 250, 2 260, 2 280, puis les courbes de 100 en 100, de 2 300 à 4 000,

- quelques points cotés ont également été introduits, mais n'ont pu être utilisés que par Babel, cette option ne figurant pas parmi les possibilités d'Orolog ;

— le pas du MNT a été choisi égal à 100 mètres, ce qui correspond à des MNT de 241 profils (axe des abscisses) de 160 points (axe des ordonnées), et à des fichiers dérivés de 240 profils et de 159 points (dans ce cas, les fichiers sont constitués de valeurs moyennes par maille, et non par nœud) ;

— Orolog a été mis en œuvre en utilisant une pondération logarithmique, et un coefficient de surpondération égal à 1,3 ;

— les MNT ont été initialement constitués sans lissage, celui-ci intervenant ultérieurement.

Ces choix, qui sont évidemment susceptibles d'intervenir dans les performances des algorithmes, définissent le cadre et les limites de notre protocole. Il conviendra par la suite de confronter ces conclusions à d'autres situations, concernant aussi bien la mise en œuvre des algorithmes que le terrain d'étude.

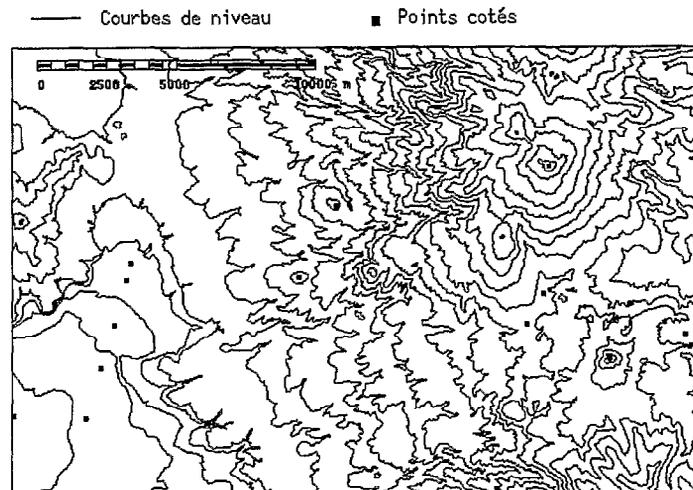


FIG. 2. — Données utilisées pour l'élaboration des MNT.

2. TRAITEMENT DES MNT

Une fois constitués les deux MNT, dans les conditions précisées précédemment, nous avons étudié leurs performances, plus particulièrement sous l'angle de la restitution des pentes, du réseau de drainage et des limites de bassins versants. La plupart des traitements figurant dans cette partie ont été réalisés à l'aide du logiciel Lamont (Depaetere, 1991b), du Sig Savane (Souris, 1991) et du logiciel Signe (Rossel et Bouvier, 1993).

2.1. Distribution des altitudes et des pentes

La distribution des altitudes (fig. 3) restituées par chacun des deux algorithmes fait apparaître tout d'abord l'existence de pics, qui traduisent un phénomène d'accumulation des altitudes au voisinage des courbes de niveau qui ont servi à l'élaboration des MNT. Il s'agit là d'un phénomène oscillatoire assez fréquent lors de la constitution d'un MNT : la proximité des courbes de niveau est prépondérante au niveau de l'interpolation, ce qui aura pour effet de générer un relief en « marches d'escaliers » au voisinage de ces courbes. On notera que ce phénomène affecte particulièrement l'algorithme Babel, alors que Orolog réussit à reconstituer un relief plus régulier au voisinage des courbes de niveau.

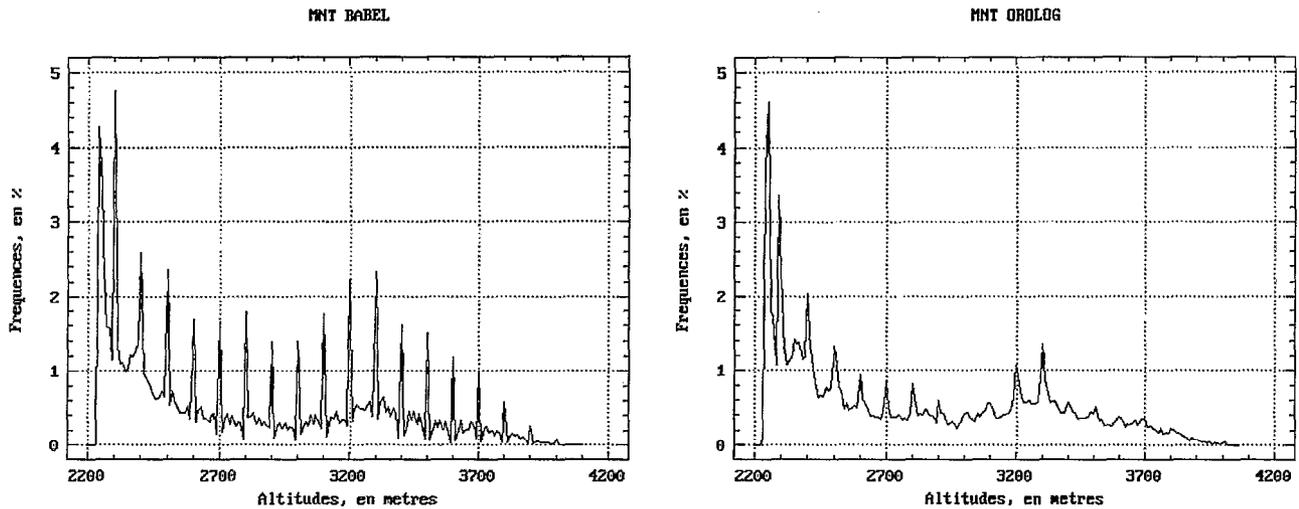


FIG. 3. — Distributions des altitudes.

Les pentes ont ensuite été calculées à partir de chacun des deux MNT par le logiciel Lamont. Pour chaque maille, l'expression de la pente s'appuie sur la composante verticale du vecteur normal au plan de régression le plus proche des quatre points délimitant la maille (Depraetere, 1991b).

Les pentes calculées ont été regroupées en 3 classes de 0 à 2°, de 2 à 10°, et de plus de 10°. L'organisation des pentes est sensiblement différente d'un MNT à l'autre (fig. 4) :

— dans le cas de Babel, les contours des classes apparaissent de façon relativement régulière. On note cependant l'existence de lignes claires qui apparaissent au voisinage des courbes de niveau : ces lignes claires correspondent à des pentes anormalement faibles au voisinage des courbes de niveau, liées au phénomène d'oscillations identifié précédemment ;

— dans le cas d'Orolog, de nombreuses stries apparaissent sur une bonne partie de l'image, à l'exception des zones à forte densité de courbes de niveau, donc dans les zones des pentes les plus fortes pour lesquelles Orolog donne une restitution plus régulière. Ce phénomène de « striage » correspond à l'apparition intempestive de crêtes (ou simplement de cassures) dans l'une des 8 directions de drainage, et constitue évidemment un effet indésirable.

Les distributions des pentes (fig. 5) ont ensuite été analysées, en se restreignant à la zone d'altitude supérieure à 2 300 m, pour minimiser les phénomènes parasites d'oscillation et de striage.

L'histogramme des pentes générées par Babel présente un mode secondaire entre 0 et 1°, qui est dû à la sous-estimation des pentes au voisinage des courbes de niveau. Les oscillations associées à Babel confèrent également à l'histogramme une allure nettement moins régulière que dans le cas d'Orolog. Pour ce dernier en revanche, le striage a pour conséquence d'augmenter artificiellement les valeurs centrales de la distribution, dans la mesure où ces stries génèrent des reliefs supplémentaires.

En conclusion, on peut dire que la restitution du relief par les deux algorithmes est nettement différenciée, non par les distributions statistiques, mais par les effets parasites associés à chacun d'eux : Babel génère des oscillations d'altitudes au voisinage des courbes de niveau initialement digitalisées, qui se traduisent par l'apparition de « marches d'escalier », alors qu'Orolog est soumis à un fort effet de striage, correspondant à l'apparition de reliefs parasites orientés selon les 8 directions préférentielles de l'interpolation.

Comme le recommandent les auteurs des différents algorithmes, il est nécessaire de procéder à un lissage des altitudes pour minimiser ces phénomènes.

2.2. PROCÉDURE DE LISSAGE

L'altitude d'une maille du MNT lissé est calculée comme moyenne pondérée des altitudes de la maille d'origine et de ses 8 voisines. Le lissage des MNT a ici été réalisé par deux pondérations successives, les coefficients utilisés étant respectivement :

4 pour la maille centrale, 2 pour les mailles nord, est, sud et ouest, 1 pour les autres mailles.

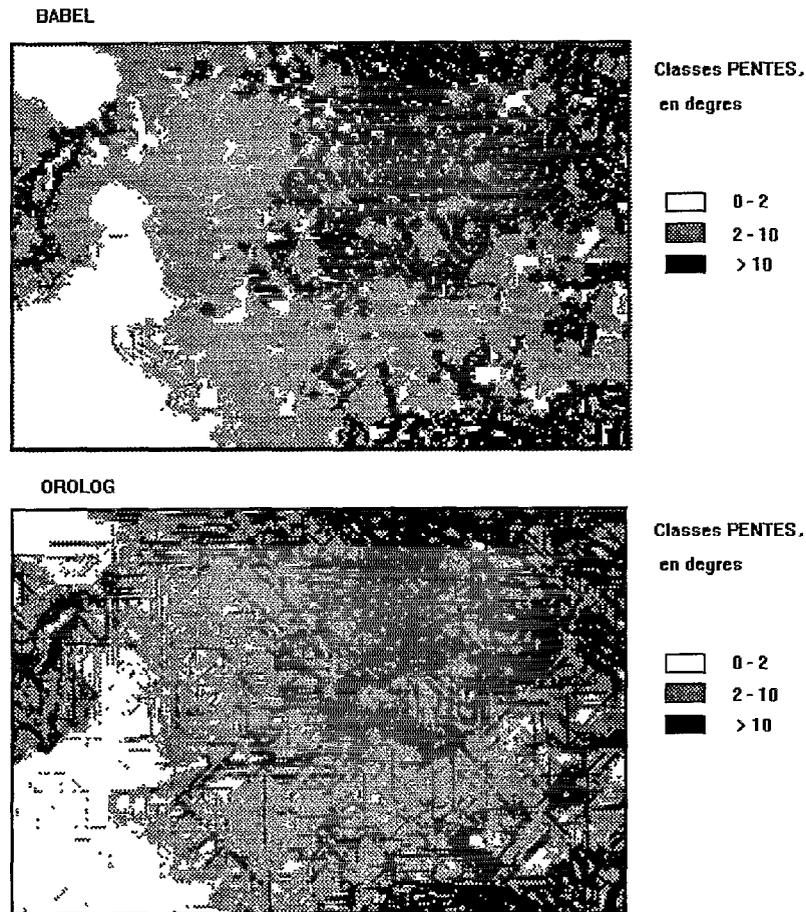


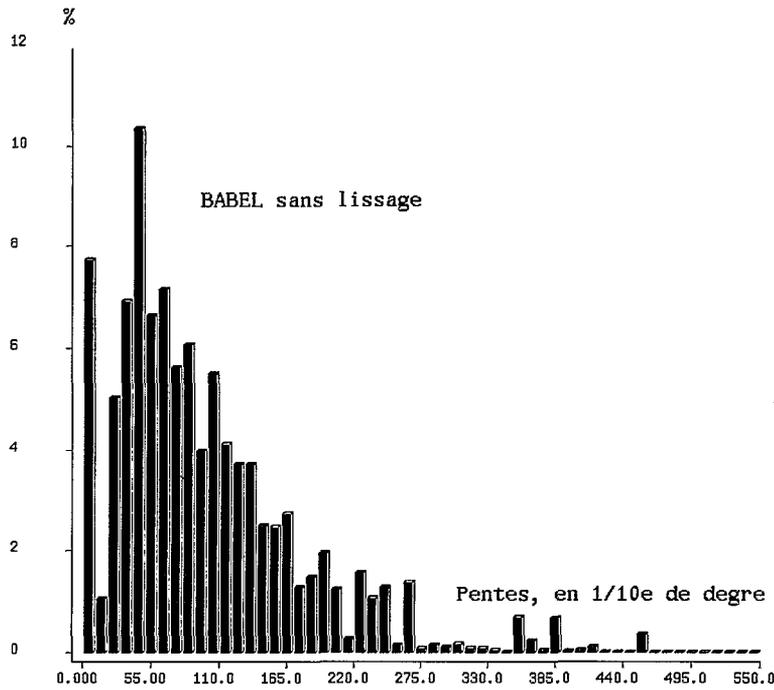
FIG. 4. — Classification et localisation des pentes.

2.2.1. Effet du lissage sur la distribution des altitudes

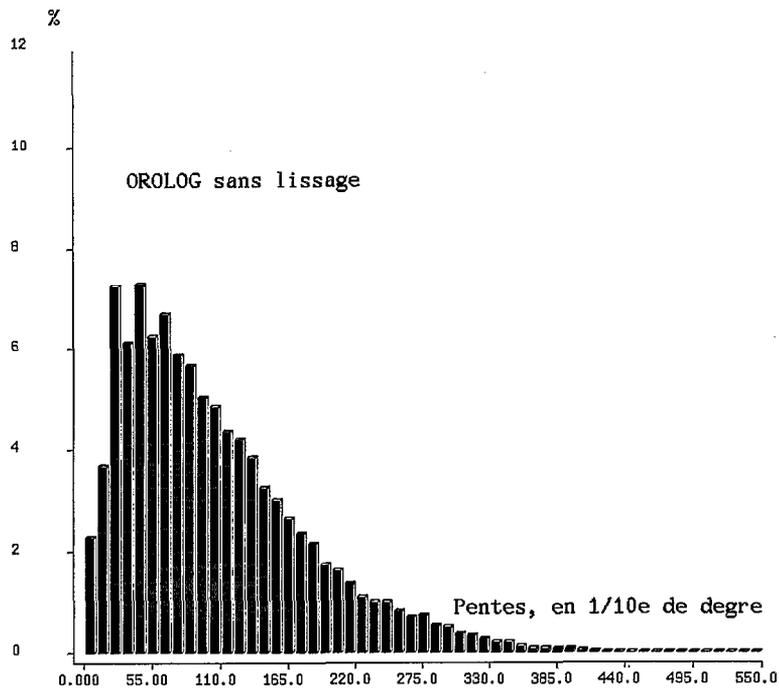
La comparaison (fig. 6) des altitudes générées par les MNT Babel bruts et lissés montre que le lissage permet d'atténuer considérablement l'effet oscillatoire mis en évidence au paragraphe 2.1, correspondant aux pics apparaissant au voisinage des altitudes des courbes de niveau digitalisées.

2.2.2. Effet du lissage sur la distribution des pentes

Comme pour les altitudes, le lissage atténue considérablement l'allure irrégulière de la distribution des pentes générées sans lissage (fig. 7). On notera en particulier que le mode secondaire proche de 0° , dû aux oscillations parasites au voisinage des courbes de niveau, a disparu après lissage. Ceci étant, le lissage réduit également les valeurs centrales et la dispersion de la distribution, et conduit à des valeurs de pentes probablement sous-estimées par rapport à la réalité. Il ne faut pas oublier que si le lissage est nécessaire pour atténuer les effets parasites liés à l'interpolation des MNT, il conduit cependant à une dégradation de l'information, qui peut avoir des conséquences négatives par ailleurs, notamment pour la reconstitution du réseau de drainage. Nous reviendrons sur cet aspect au paragraphe 2.3.2.



Pente maximum : 54,7° ; pente moyenne : 9,6° ; pente médiane : 7,8° ; mode : entre 4 et 5° ; écart-type : 7,8°.



Pente maximum : 47,7° ; pente moyenne : 10,5° ; pente médiane : 8,8° ; mode : entre 4 et 5° ; écart-type : 7,4°.

FIG. 5. — Histogramme des pentes.

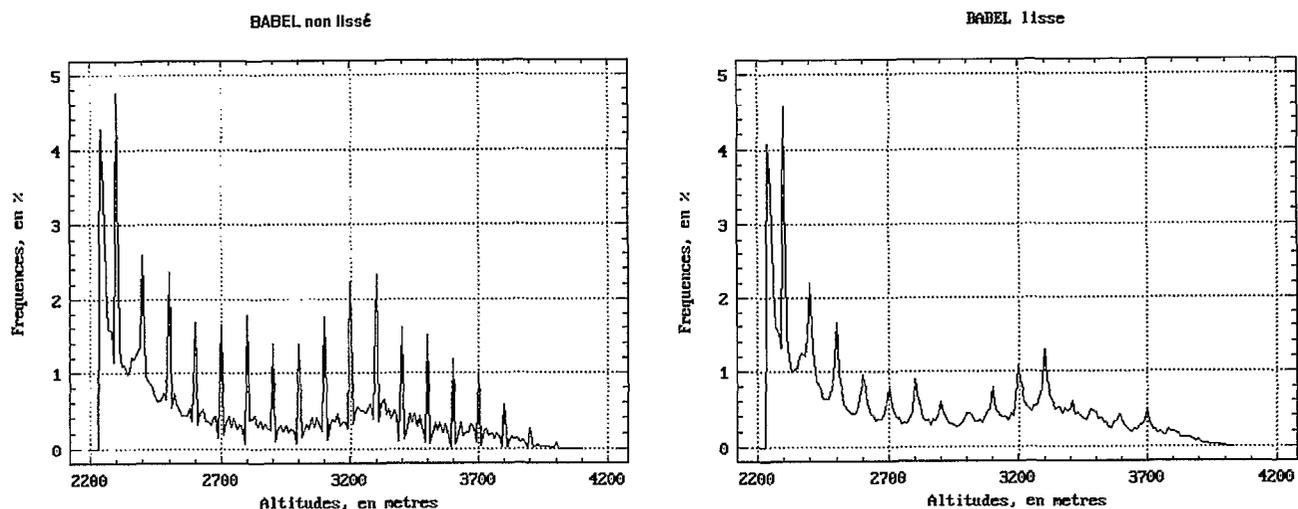


FIG. 6. — Comparaison des distributions des altitudes, lissées et non lissées.

2.3. ANALYSE DU MODELE DE DRAINAGE

Le modèle de drainage (fichier des directions de drainage) est un élément essentiel pour les applications hydrologiques, puisqu'il permet ensuite de déterminer le réseau hydrographique, les limites de bassins versants, les distances à l'exutoire, etc.

Les fichiers des directions de drainage ont été calculés par Lamont (en mode maillé) à partir des MNT fournis par chacun des algorithmes. Chaque pixel est associé à l'une des 9 valeurs possibles : pas de drainage, drainage dans les directions nord, nord-est, est, etc. Pour chacune des mailles, le drainage se fait dans la direction de la maille voisine d'altitude inférieure la plus faible.

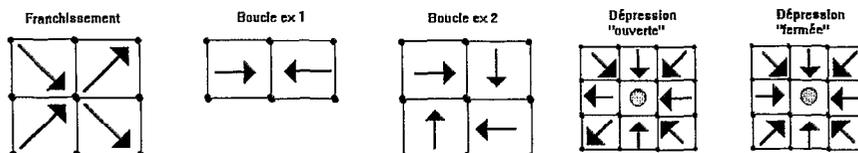
L'extraction du modèle de drainage à partir du MNT s'accompagne généralement de problèmes constitués par l'apparition intempestive de fausses dépressions, de boucles de drainage et de franchissements parasites (1), qu'il faut alors corriger par un traitement préliminaire. Plus généralement, les directions de drainage sont parfois entachées d'erreurs pouvant avoir de fâcheuses conséquences sur la reconstitution du réseau hydrographique et des limites des bassins versants.

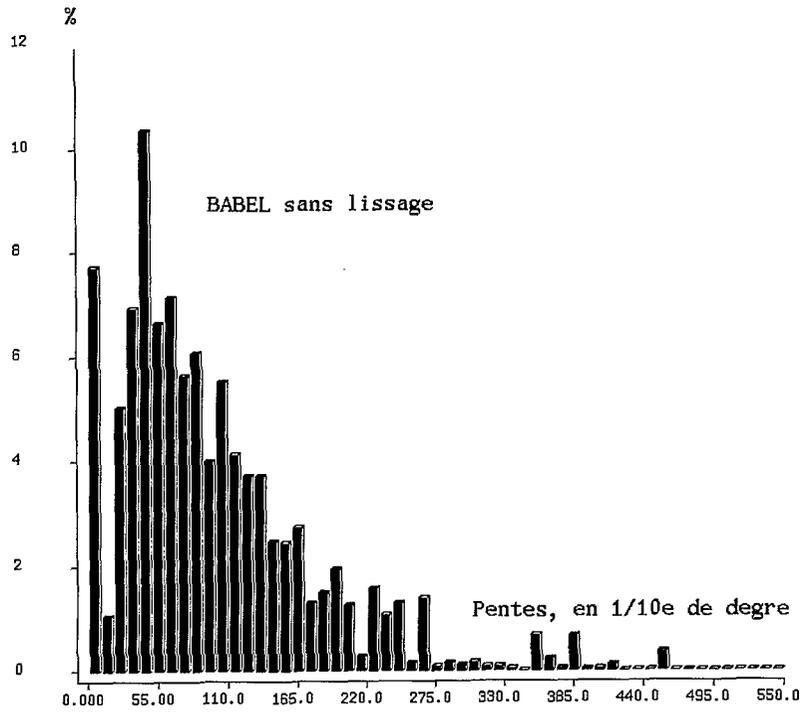
2.3.1. Traitement préliminaire du modèle de drainage

Le tableau suivant résume les « anomalies » relevées dans les modèles de drainage extraits à partir des MNT fournis par Babel et Orolog, avec ou sans lissage.

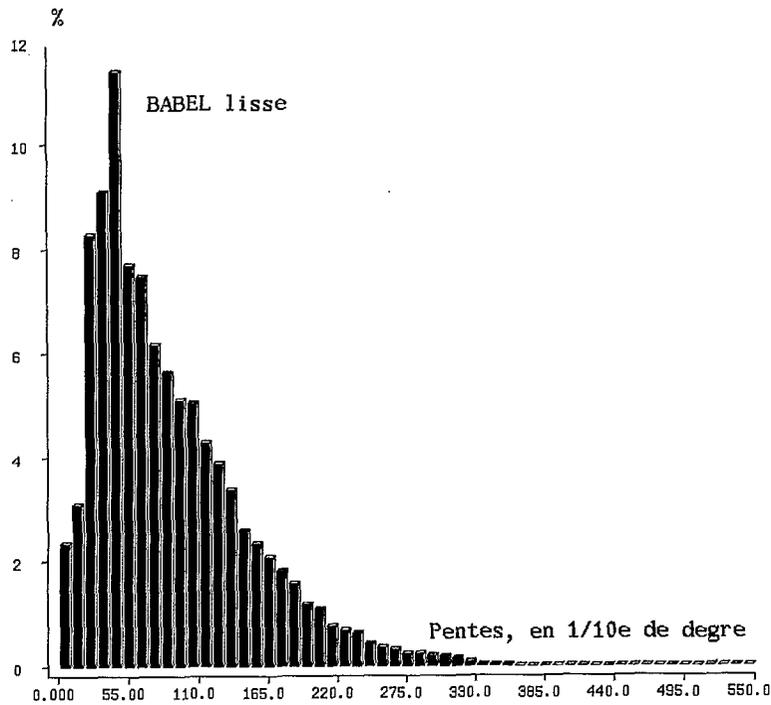
MNT	Nbre dépressions	Nbre boucles	Nbre Franchissements
Babel brut	808	4	21
Babel lissé	82	0	11
Orolog brut	131	1	0
Orolog lissé	48	0	0

(1) Un franchissement est défini par le recoupement des directions de drainage, comme le montre le schéma ci-dessous. Plus généralement, il y a franchissement quand deux mailles adjacentes ont des directions de drainage diagonales et convergentes. Sont également représentées ci-dessous quelques configurations définissant boucles et dépressions.





Pente maximum : 54,7° ; pente moyenne : 9,6° ; pente médiane : 7,8° ; mode : entre 4 et 5° ; écart-type : 7,8°.



Pente maximum : 40,1° ; pente moyenne : 8,5° ; pente médiane : 7,1° ; mode : entre 4 et 5° ; écart-type : 6,0°.

FIG. 7. — Histogramme des pentes générées avec ou sans lissage des altitudes.

Ces valeurs ne concernent que la zone supérieure à 2 300 m d'altitude, le relief étant trop peu marqué en dehors de cette zone pour être convenablement restitué par les MNT : il est évident dans ce dernier cas que le traitement informatique ne peut reconstituer une information absente des données, et l'on aura à effectuer manuellement l'affectation des directions de drainage pour les mailles de cette zone, dont la surface active est heureusement limitée aux canaux principaux (voir le paragraphe 2.3.2).

On notera, dans le cas de Babel, un nombre élevé de dépressions : celles-ci sont généralement localisées à l'intérieur de courbes de niveau fermées, ou se refermant partiellement. Il est évident que dans ce cas, l'interpolation barycentrique est trop grossière pour restituer correctement les maxima ou minima locaux : il est donc conseillé d'introduire des points cotés supplémentaires dans chacune de ces zones pour réduire le phénomène. Le lissage réduit cependant efficacement le nombre des dépressions. Orolog, grâce à l'interpolation par morceaux de fonctions splines cubiques et à la continuité des courbures entre les différents morceaux, parvient quant à lui à restituer correctement le relief au voisinage des extrema locaux sans l'aide de points supplémentaires. Les défauts sont comparativement moins nombreux pour Orolog que pour Babel.

Ces défauts ont ensuite été corrigés avant de chercher à reconstituer le réseau hydrographique d'après le modèle de drainage. Plusieurs procédures de correction automatique ou manuelle sont disponibles dans Lamont et dans Signe. On veillera bien sûr à ce que les corrections des dépressions n'introduisent pas de nouvelles boucles ou de nouveaux franchissements. Après corrections, il ne reste ni dépressions, ni boucles, ni franchissements dans les MNT.

2.3.2. Reconstitution du réseau hydrographique

Sur la base des modèles de drainage corrigés, nous avons ensuite analysé la qualité de la restitution du réseau hydrographique (talwegs), en nous limitant à la zone des altitudes supérieures à 2 300 m et en procédant de la manière suivante :

— nous avons d'abord choisi comme référence un échantillon de biefs figurant sur la carte topographique au 1/50 000, matérialisant le réseau principal. Le tracé figurant sur cette carte a été vérifié au cours des deux années de suivi des bassins expérimentaux, et présente une excellente qualité. Ces biefs ont ensuite été digitalisés, pour servir de fond de carte ;

— pour chacun de ces biefs, nous avons ensuite déterminé le bief correspondant restitué par le modèle de drainage, en prenant comme origine le point le plus en amont possible.

La figure 8 montre la comparaison des réseaux restitué et cartographié en utilisant les MNT Babel et Orolog lissés : dans chacun des cas, la restitution est assez médiocre. On observe de nombreux points où les biefs reconstitués s'écartent sensiblement de leur cours cartographié. Ces problèmes sont dus principalement à la densité insuffisante de courbes de niveau utilisées pour interpoler les MNT, et aux différents phénomènes oscillatoires qui affectent les MNT ainsi constitués. Dans certains cas, le lissage peut également introduire des erreurs (fig. 9), dans la mesure où il s'accompagne nécessairement d'une certaine dégradation de l'information : on veillera donc à utiliser un lissage minimum, destiné à gommer les principaux défauts des MNT sans trop affecter la détermination des directions de drainage.

Si l'on ne souhaite pas, ou si l'on ne peut pas intégrer des courbes de niveau supplémentaires, la seule solution est de corriger manuellement les modèles de drainage, jusqu'à obtenir une restitution satisfaisante du réseau hydrographique cartographié. Ce qui se réalise assez facilement en utilisant les options de correction manuelle de Lamont

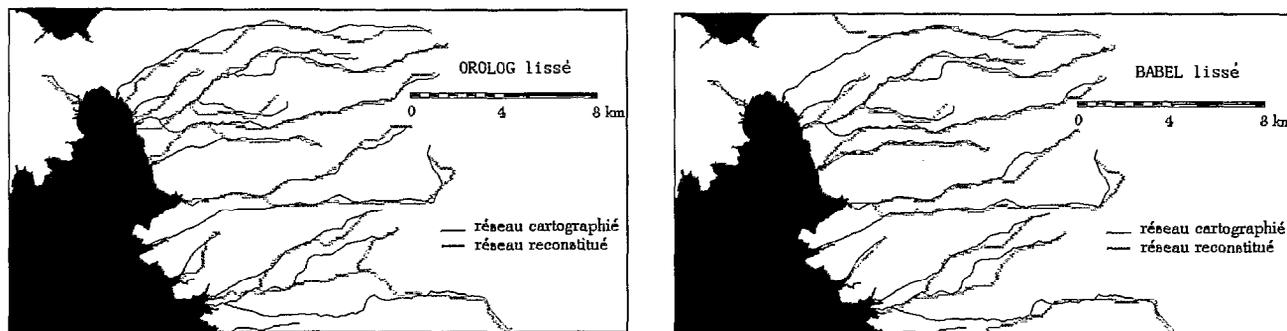


FIG. 8. — Comparaison des réseaux cartographiés et reconstitués.

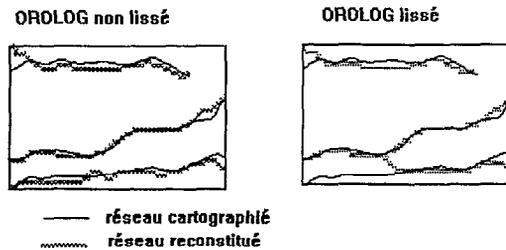


FIG. 9. — Reconstitution des réseaux hydrographiques (détails).

ou de Signe : on obtient finalement un modèle de drainage globalement correct (fig. 10), incluant la zone des altitudes inférieures à 2 300 m, pour laquelle le drainage a été forcé de façon à suivre exactement le tracé des canaux.

Dans cette optique de contrôle, l'utilisateur définira un réseau de référence plus ou moins détaillé en fonction des applications souhaitées. Il est également souhaitable de procéder à un contrôle de la reconstitution des limites des bassins versants, sur un échantillon choisi par l'utilisateur, pour effectuer le contrôle du modèle de drainage aussi bien au niveau des talwegs (réseau) que des crêtes (bassins).

CONCLUSIONS

Les résultats présentés dans ce qui précède doivent être interprétés dans les limites du protocole choisi, et on se gardera d'en généraliser les principales conclusions. En particulier, il est clair qu'une plus grande densité de courbes de niveau aurait sensiblement amélioré la qualité des MNT et des produits dérivés. Ceci étant, la digitalisation reste un travail long et fastidieux, et c'est avec de faibles densités de courbes que l'on aura à travailler la plupart du temps. Il était donc intéressant de se pencher sur les problèmes rencontrés dans ce cas.

L'utilisation de MNT denses, dont le pas est sensiblement inférieur à la densité locale des courbes de niveau utilisées pour l'interpolation, s'accompagne de l'apparition de reliefs parasites : reliefs en « marches d'escalier » pour Babel, stries et fausses crêtes pour Orolog. Ces effets indésirables sont particulièrement préjudiciables pour la détermination du modèle de drainage, qui doit faire l'objet d'un contrôle dont le niveau dépend de l'appréciation de

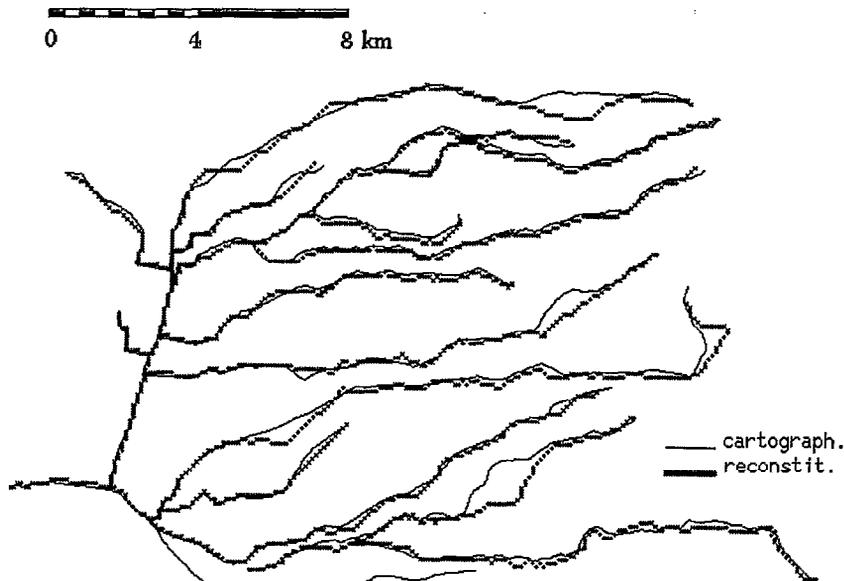


FIG. 10. — Reconstitution finale du modèle de drainage.

l'utilisateur et des applications envisagées. Au-delà des opérations classiques portant sur la correction des dépressions parasites, des boucles de drainage et des franchissements, il est indispensable de comparer le réseau hydrographique reconstitué par le MNT au réseau cartographié supposé vrai, la comparaison pouvant également s'étendre aux lignes de crêtes. Ces contrôles sont facilités par l'utilisation du logiciel *Signe*, combinant les fonctions de Lamont avec des fonctions cartographiques plus élaborées.

Au-delà des résultats présentés dans cet article, il convient sur le plan théorique de caractériser la relation existant entre l'apparition des artefacts, le type d'interpolation, la densité des courbes de niveau et la géomorphologie locale. Quinn *et al.* (1991) évoquent par exemple une méthode d'interpolation multidirectionnelle qui doit permettre de réduire les problèmes de triage. La configuration optimale des courbes de niveau à utiliser pour un type d'interpolation et un terrain donnés, pour obtenir le meilleur compromis entre qualité et capture de l'information doit être soigneusement étudiée pour aboutir à une utilisation fiable et pratique des MNT en hydrologie.

Manuscrit accepté par le comité de rédaction le 26 août 1994

BIBLIOGRAPHIE

- BAND (L.), 1986 — Topographic partition of watersheds with digital elevation models ». *Water Resources Research*, 22 (1) : 15-24.
- BOUVIER (Ch.), 1994 — Mercedes : maillage d'éléments réguliers carrés pour l'étude des écoulements superficiels. Principes du modèle et notice d'utilisation. Orstom, *multigr.*, 35 p.
- BOUVIER (Ch.), FUENTES (G.), DOMINGUEZ (R.), RENAULT (S.), 1992 — Hidrologia de la cuenca de Chalco. Mediciones de 1991. Modelacion de las avenidas de la cuenca San Marcos. Orstom-Unam, *multigr.*, 55 p. + 59 p. en ann.
- DEPRAETERE (Ch.), 1991a — Demiurge 2.0. Chaîne de production et de traitement de modèles numériques de terrain, tome 3 : Lamont. Logiciel de traitement des modèles numériques de terrain. Collection *Logorstom*, éditions de l'Orstom, 123 p.
- DEPRAETERE (Ch.), 1991b — Demiurge 2.0. Chaîne de production et de traitement de modèles numériques de terrain, tome 2 : Orog 1.2. Logiciel de calcul de modèles numériques de terrain. Collection *Logorstom*, éditions de l'Orstom, 46 p.
- MOORE (I.D.), MACKAY (S.M.), WALLBRINK (G.J.) et O'LOUGHLIN (E.M.), 1986 — Hydrologic characteristics and modelling of a small catchment in southern New South Wales. Prelogging conditions. *Journal of Hydrology*, 83 : 307-335.
- O'LOUGHLIN (E.M.), 1981 — Saturation regions in catchments and their relations to soil and topographic properties. *Journal of Hydrology*, 53 : 229-246.
- QUINN (P.), BEVEN (K.), CHEVALLIER (P.) et PLANCHON (O.), 1991 — The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological processes*, vol. 5 : 59-79.
- ROSSEL (F.), BOUVIER (Ch.), 1993 — *Signe* : système intégré de gestion numérique des écoulements. Orstom, *multigr.*, 60 p.
- SOURIS (M.), RÉMY (D.), 1989 — Babel : un algorithme de production de MNT. *Seminfor 3*, éditions de l'Orstom.
- SOURIS (M.), 1991 — Savane : documentation de l'utilisateur. Orstom, *multigr.*, 60 p.