

# Incertitudes inhérentes à l'acquisition et au traitement de données anciennes dans la mise en place de modèles 2D, 3D et diachronique. Cas de deux milieux fluviaux : le bas Rhône et le delta du Danube

*Guillaume Raccasi\*, Laura Jugaru\*, Mireille Provansal\**

Les aménagements des fleuves et de leurs marges, au cours des XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles, ont contraint le milieu à des adaptations morphologiques, qui ne correspondent pas toujours aux conditions d'équilibre naturelles. Les perturbations engendrées par la recrudescence des grandes crues récentes (incision du chenal, brèches et débordements de digues) sont autant d'indicateurs de l'instabilité de ces systèmes contraints par les aménagements. La recherche de solutions techniques pour maintenir les activités implantées à proximité et sur les fleuves (fret fluvial, zones industrielles dans les lits majeurs), tout en conservant la richesse écologique des milieux, passe par l'analyse du rôle des aménagements, dans une reconstitution historique de l'évolution du système.

## **Le contexte de l'étude : deux grands fleuves aménagés, dont les conditions d'écoulement ont été modifiées par les aménagements depuis 100 à 150 ans**

Le Rhône a une longueur de 830 km pour un bassin versant de près de 100 000 km<sup>2</sup> (figure 1A). Son champ d'inondation naturel s'élargit fortement à l'aval, à partir du défilé de Beaucaire, pour former le grand delta de Camargue. La lutte contre les inondations a nécessité la mise en place de digues de protection insubmersibles au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle (Poinsart et Salvador, 1993). Cet aménagement a contraint la plaine inondable et favorisé l'exhaussement des ségonnaux (milieu intradigue). À partir des années 1880, des digues ou casiers immergés sont destinés à réduire artificiellement la largeur du chenal et à provoquer son surcreusement. Leurs effets se font encore sentir au cours du XX<sup>e</sup> siècle, favorisant la sédimentation des bordures du chenal. Enfin, les années 1945 à 1970 correspondent à la créa-

---

\* CEREGE UMR 6635, Aix-Marseille Université, Europôle Méditerranéen de l'Arbois, BP 80, 13545 Aix-en-Provence cedex 04, France.

tion d'un aménagement hydro-électrique, qui artificialise les débits liquides et réduit les débits solides. Après une période de relatif calme hydrologique entre 1950 et 1990, qui a permis une colonisation importante des marges fluviales, les crues sont redevenues une des problématiques majeures dans la gestion globale de ce fleuve.

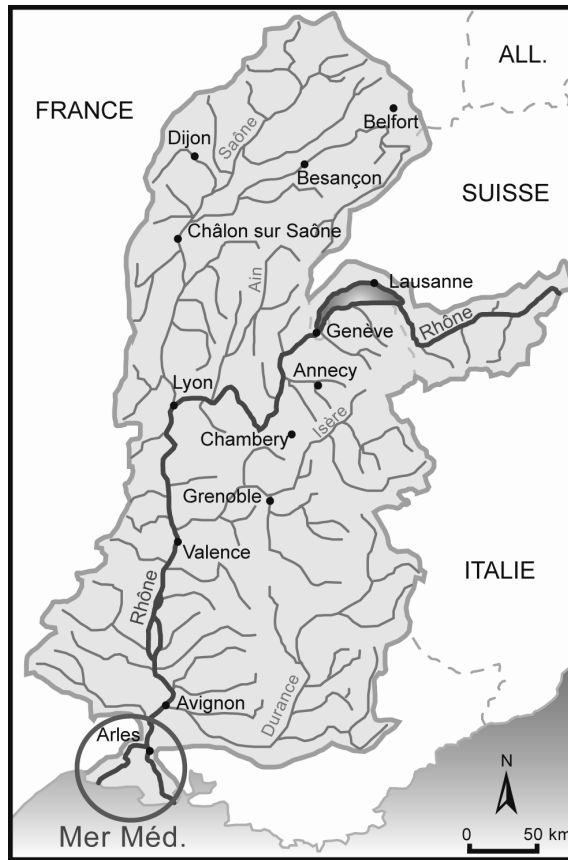
Le Danube est l'un des plus importants fleuves du continent Européen, le deuxième de l'Europe (longueur 2 857 km, depuis la Forêt Noire en Allemagne jusqu'à la Mer Noire). La surface totale du bassin versant est de 817 000 km<sup>2</sup> (figure 1B). La construction des barrages hydro énergétiques des Portes de Fer I et II, entre 1971 et 1984, a réduit les apports sédimentaires vers l'aval. Dans le delta (5 800 km<sup>2</sup>) les aménagements ont été destinés à améliorer la navigabilité. Le changement de la répartition des débits entre les trois bras du delta a augmenté le débit liquide du bras de Saint-Georges. Dans les années 1984-1988, les six méandres libres du bras de Saint-Georges ont subi, en outre, des travaux de rectification, qui ont diminué sa longueur de 32 km. Les conséquences de ces travaux ont modifié la morphologie des berges du fleuve, ainsi que la configuration morphologique et bathymétrique dans le delta (Panin, 2003).

Les deux fleuves ont donc subi des modifications hydrologiques et sédimentaires liées aux aménagements amont, ainsi qu'une artificialisation du chenal. Les interventions sont plus précoces sur le Rhône qui est « contraint » depuis plus d'un siècle jusque dans sa plaine littorale. Le delta du Danube est resté longtemps plus « sauvage ». Il est important d'évaluer les réponses de ces deux systèmes fluviaux, leur ampleur et leur vitesse, afin d'analyser les impacts des aménagements qu'ils ont subis. Cette étude concerne le secteur aval de ces deux fleuves, qui est le dernier à avoir été aménagés.

## **Problématique et méthodologie**

L'évolution des conditions d'écoulement des crues, liée aux déformations de la topo-bathymétrie du chenal et des marges alluviales, est analysée par superposition diachronique de documents (cartes, photographies aériennes, images satellitales, levés topographiques et bathymétriques), acquis au cours des 150 dernières années. Les progrès des techniques de cartographie, à partir du milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, permettent en effet d'utiliser avec précaution ces documents anciens, souvent associés aux commentaires des ingénieurs hydrographes ou hydrauliciens (Service Spécial du Rhône en France, La Commission Européenne du Danube et la Direction du Service Hydraulique, en Roumanie). Les photographies aériennes fournissent des instantanés à partir de la fin des années 1940 (1944 sur le Rhône, 1958 sur le Danube), dont la comparaison avec les cartes pose des problèmes spécifiques.

Figure 1 :  
 A, Bassin versant  
 du Rhône.  
 B, Bassin versant  
 du Danube



Ces données, cartes et photographies, sont souvent incomplètes et leur comparaison pose généralement le problème de la diversité des échelles d'acquisition, des projections utilisées et des marges d'erreurs associées. Rarement homogènes sur les secteurs étudiés, elles nécessitent la plupart du temps des extrapolations, qui rajoutent des marges d'erreurs supplémentaires à celles de la qualité de la donnée initiale, puis de son acquisition. La connaissance de ces incertitudes est essentielle avant de valider les modèles et de les rendre opérationnels pour l'aménagement.

Le développement de la géomatique, et plus précisément du SIG, permet de comparer entre elles des données de sources et de dates différentes, pour la reconstitution de l'évolution récente des milieux fluviaux, en vue d'une modélisation des réponses du système aux différents forçages (naturels et anthropiques) et d'une gestion adéquate des aménagements.

## **Incertitudes liées à la qualité de la donnée**

### *Erreurs de relevé, répétition d'erreurs initiales, le cas du Danube*

L'évolution naturelle des méandres du Danube, avant l'aménagement des Portes de Fer, repose sur la comparaison des deux seules cartes anciennes disponibles. Il s'agit des cartes réalisées en 1909 et 1940, à la même échelle (1 : 200 000). Le tracé, vectorisé, rectifié et géo-référencé du chenal de Saint-Georges, des lacs et des bras morts est ensuite superposé à celui d'une image satellitale Landsat 7 de 2002. L'évolution des contours du chenal entre les deux dates extrêmes paraît logique (accentuation de la sinuosité des méandres entre 1909 et 2002).

Mais, entre 1909 et 2002, les bras morts présentent un décalage de 0,90 km jusqu'à 1,50 km. La carte de 1909 comporterait donc un relevé topographique inexact de ces milieux d'approche difficile. Sur la carte de 1940, les bras morts sont encore en décalage par rapport à la réalité de 2002. Ceci s'explique par le fait que pour réaliser cette carte, les cartographes ont repris les données de 1909, sans le mentionner dans le cartouche. En outre, la carte de 1940 présente plusieurs secteurs avec le même problème de décalage sur le bras lui-même. On suppose que le fait de reprendre des secteurs des cartes plus anciennes et de les recopier sur d'autres cartes a comme raison, à cette époque-là, la difficulté de se repérer là où il n'y a pas beaucoup de points d'amers pour se caler.

Ces cartes mettent donc déjà le doigt sur les deux problèmes, que sont la précision due aux erreurs de levé d'une carte dans un milieu difficile (très plat, marécageux et forestier) et la datation exacte des relevés correspondant à la publication du document.

La diversité des bases cartographiques que l'on utilise dans l'interprétation des données géomorphologiques d'un système, peut nous conduire à des conclusions douteuses si l'on ne fait pas avant une analyse de la source de la donnée et de la manière dont ces matériaux cartographiques ont été constitués.

### ***Erreurs liées à la différence de résolution spatiale de la donnée, le cas du Danube***

La comparaison d'images satellitales, acquises à deux dates différentes très proches dans le temps (20.10.1989 et 20.08.1989), mais avec des capteurs différents (respectivement Spot et Landsat 7), soulève un autre problème. Après vectorisation, on observe en effet une différence en surface de la zone mouillée du chenal de 0,5 km<sup>2</sup>, avec des erreurs différentes (pour l'image Spot 4.7 % de la surface mouillée totale représente l'erreur liée à la résolution de l'image, et 12.3 % pour l'image Landsat 7). Cette disparité est due à la résolution des deux capteurs : l'image Spot a une résolution de 10 m/pixel, celle de Landsat 7 de 28 m/pixel). Les erreurs liées à la résolution des documents cartographiques sont un aspect très important dans le traitement SIG : en effet, les calculs des paramètres hydrométriques (superficie, longueur et largeur d'un fleuve ou d'un bassin hydrographique, périmètre, etc.) peuvent donner des résultats différents à cause de l'erreur liée à la dimension du pixel de l'image.

### ***Erreur liée au type de projection utilisée, le cas du Rhône***

Sur une carte du Rhône, au 1/10 000, dressée par les Ponts et Chaussées en 1876, le cartouche mentionne :

« On a levé le plan du Rhône et de ses rives en prenant pour base une triangulation spéciale rattachée à celle de la carte du Dépôt de la Guerre. Cette triangulation a embrassé une largeur variable suivant les conditions topographiques des diverses parties du Cours du Rhône [...]. Le levé du plan s'est étendu sur une zone comprenant de chaque côté une largeur moyenne de 300 mètres à partir de la berge qui limite le lit du fleuve. Au-delà de cette zone le plan a été déduit des plans du Cadastre [...]. »

Il y a donc deux référentiels présents sur cette carte. La façon la plus simple de l'intégrer dans un SIG est de la rectifier puis de la géoréférencer. Ces actions sont réalisées à l'aide du module de géoréférencement de ArcMap, en utilisant une transformation du 3<sup>e</sup> ordre qui permet une déformation non uniforme de la carte. La carte de 1876 est recalée par zones scannées au format A4, avec une résolution de 500 dpi. Ce recalage se fait par rapport à l'orthophotographie des Bouches-du-Rhône de 2003 (IGN). La précision de ces photographies aériennes d'une résolution de 1 200 dpi est de 0,5 m pixel<sup>-1</sup>. En moyenne, vingt points d'amers, répartis de façon homogène sur chaque

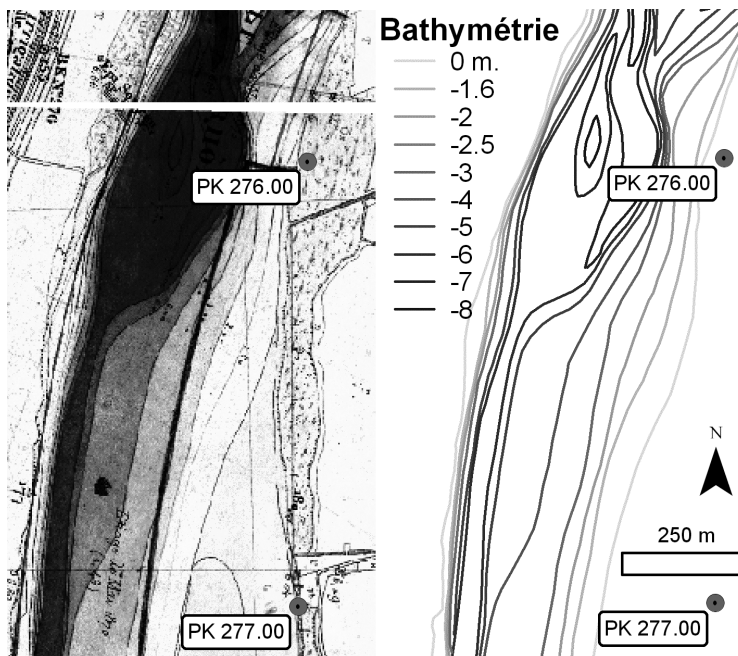
carte A4, permettent d'obtenir au final une erreur de recalage comprise entre 2,0 et 2,5 m, ce qui correspond aux cartes 1/25 000<sup>e</sup> de l'IGN.

Sur cette carte du Rhône, les points d'amer sont faciles à trouver, l'anthropisation du milieu est ancienne et de nombreux bâtiments peuvent servir de repère. La recherche de ces points d'amer obligatoires pour un bon géoréférencement beaucoup plus difficile dans des secteurs moins densément anthropisés comme le Danube, il est difficile d'arriver à des précisions aussi fines.

### *Erreur liée à la vectorisation de la donnée (Rhône)*

Lors de l'acquisition des données, la vectorisation des cartes est une phase qui n'est pas encore automatisée. Cette opération consiste à redessiner les contours de la carte sur une couche vecteur du SIG (figure 2). Pour diminuer les erreurs de dessin, une des solutions consiste à travailler à une échelle plus grande que la carte initiale. Sur la carte du Rhône de 1876 au 1/10 000, le travail de vectorisation dans le SIG avec une échelle d'affichage à l'écran de 1/5 000 permet donc de négliger les erreurs que pourrait faire le dessinateur pendant cette phase.

Figure 2 : Vectorisation de la donnée à partir de cartes anciennes rectifiées (Atlas du Rhône, Ponts et Chaussées, 1876).



## **Bilan**

Les données anciennes sont une base de données initiale importante dans la quantification de l'évolution des milieux alluviaux. Avant leur exploitation, une étude doit être entreprise sur la qualité de la donnée en la comparant avec d'autres documents de la même époque et en déterminant les sources et les marges d'erreurs qui ont été prises lors de la constitution du document. Les seules erreurs vraiment quantifiables sont celles induites par l'intégration des cartes et autres données dans un SIG.

## **Incertitudes liées à l'exploitation ou à l'interprétation de la donnée**

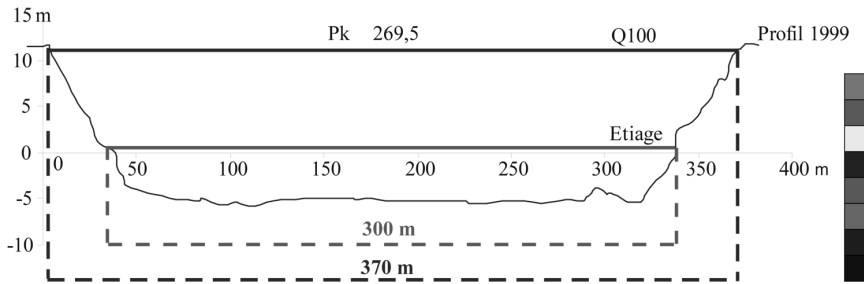
### *Difficultés d'interprétation liées au niveau instantané de l'eau*

La variation de la hauteur d'eau dans le chenal (liée aux variations du débit) perturbe la comparaison entre les différents documents. Elle donne en effet une image différente de la largeur du chenal, de la hauteur des berges émergées et de l'extension des marges forestières selon que le document a été acquis en hautes ou en basses eaux. Pour les cartes, les relevés peuvent décrire, par principe cartographique, une situation proche de l'étiage (mais sur la carte du Rhône de 1876, le niveau d'eau est représenté en « *eaux moyennes* »). Les forçages, naturels ou anthropiques, ont pu faire varier le débit moyen du fleuve, donc le niveau représenté. La comparaison entre la cartographie de 1876 et une donnée actuelle sur le niveau moyen des eaux ne pourra donc se faire qu'après la recherche dans les archives de données hydrographiques de l'époque pour recalibrer les données actuelles.

Les photographies et les images satellitales correspondent à une visualisation instantanée dans des contextes hydrologiques très variables. Si ces données sont récentes, le débit au moment de la prise de vue est souvent connu, mais pour des données plus anciennes comme les photographies aériennes de la Camargue de 1944 prises par l'armée américaine, les débits ne sont pas nécessairement connus.

Sur le Rhône, nous avons essayé de voir comment pouvait être intégrée la notion de débit, à l'analyse comparée des photographies aériennes et des images satellitales. Les profils topographiques des berges, relevés au GPS ou au théodolite, montrent une typologie très variable des formes, qui conditionne la largeur apparente de la zone mouillée en fonction du débit. Une intégration des débits dans ces profils montre que la largeur du chenal mouillé évolue de plus de 70 m entre le débit d'étiage et Q100, sur les profils caractérisés par une pente de 45° (figure 3). Pour des berges avec des pentes beaucoup plus douces, cette différence peut aller à plus de 400 m.

Figure 3 : Interaction débit/Surface mouillée en fonction du type de profil



Sur le Danube, la comparaison peu satisfaisante des deux images satellitales s'explique, au moins en partie, par la différence de débit entre les deux dates de prise de vue. En effet, si on intègre les données des débits liquides correspondants aux deux dates (1651 m<sup>3</sup>/s pour l'image Spot et 1404 m<sup>3</sup>/s pour l'image Landsat 7), cette variation peut expliquer la différence de 0,5 km<sup>2</sup> entre les surfaces mouillées.

L'interprétation diachronique des images doit donc intégrer d'autres indicateurs, relevés de terrain (pente des berges) et données hydrologiques.

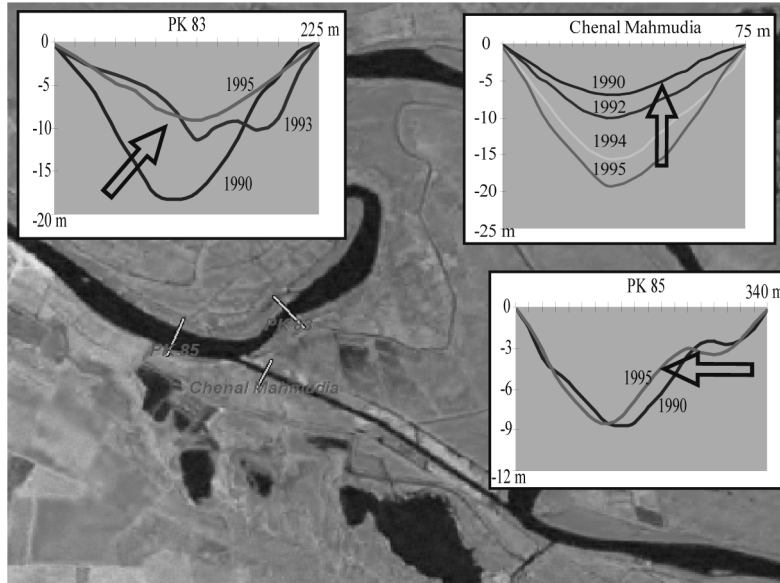
#### **Difficultés liées à la discontinuité de la donnée 3D, exemple du Danube**

Les données 3D, associant topographie de la surface émergée et bathymétrie des zones en eau, sont presque systématiquement discrètes dans le temps que dans l'espace (profils successifs relevés à des pas de temps variables). Des profils bathymétriques ont été réalisés par Popa (1997) à proximité de l'impact supposé des recoupements des méandres. Depuis le creusement des chenaux artificiels, trois relevés ont été effectués sur 5 ans (Figure 4). Trois secteurs ont été choisis pour comparaison : le bras naturel à l'amont du recoupement, le chenal recoupé et le bras naturel dans le méandre à l'aval du recoupement. Des modifications quantitatives importantes ont été observées : modifications faibles (mobilité latérale) à l'amont de la rectification ; érosion et incision continues du nouveau chenal artificiel (~13 m) ; colmatage accentué du vieux chenal actif, en aval du recoupement (~10 m).

Ce suivi montre que pour faire l'analyse précise des vitesses de mobilité d'un chenal fluvial, il faut une donnée continue dans l'espace et à forte fréquence dans le temps, la morphologie du chenal variant en fonction des contraintes morphologiques et hydrauliques du milieu. Cette variabilité en 3D permet également de mieux interpréter les variations en surface (2D), la morphologie du fond d'un chenal pouvant varier très rapidement d'un secteur à l'autre et modifier ainsi la largeur apparente.



Figure 4: Évolution morphologique d'un méandre du Danube après aménagement



**Difficultés et incertitudes liées au choix des logiciels pour la constitution d'un modèle numérique de terrain (MNT), exemple du Rhône**

Les MNT sont un outil complexe. Sur le Rhône la vectorisation des bathymétries de 1876 (Figure 2) permet de calculer des modèles numériques de terrain qui pourront servir pour la modélisation hydraulique ou pour des calculs de différentiel de cubature dans le chenal avec la période actuelle.

Un MNT est calculé par l'interpolation de points (x, y, z). Dans le cas d'isobathes les nœuds de la polygone sont assimilés à des points. À partir de ce nombre de points disponibles (28 765) et de la surface modéliser (3 395 349 m<sup>2</sup>), le théorème de Nyquist (Nyquist, 1928) donne un pas pour le MNT de 25 m. Cette taille de la maille va aplanir la microtopographie locale, mais va permettre au modèle de diminuer les effets de surinterprétation pendant la phase de calcul. Pour des calculs de cubature simple, cela ne pose pas de problème en dehors des marges d'erreurs classiques. Pour une modélisation hydraulique la disparition de ces microtopographies va avoir une incidence sur la rugosité du lit qu'il faudra prendre en compte dans le calcul des débits.

Il existe plusieurs méthodes d'interpolation de points pour le calcul d'un MNT. La méthode la plus simple TIN (Triangulated irregular network) est une triangulation de Delaunay (Booth, 2000) qui génère des triangles à partir des points en garantissant qu'aucun point ne se situe à l'intérieur

d'un triangle. Les modèles Tin peuvent être exploités pour des calculs de cubatures simples, mais le fait de la construction de triangle génère des surestimations et des sous-estimations du relief si les fonds de talwegs et les sommets ne sont pas numérisés. La construction des triangles génère aussi des erreurs dans le calcul des pentes (Rousseau, 2005).

Pour une modélisation plus juste d'un MNT à partir de courbes de niveaux qui génèrent une répartition anisotrope des points à interpoler, la méthode par Voisin naturel s'avère plus précise. Elle génère un raster par une triangulation de Delaunay à laquelle se superposent des méthodes de Thyssen et Voronoy pour déterminer le poids des points voisins naturels (Booth, 2000).

### **Bilan**

L'intégration de la donnée 3D dans l'interprétation en 2D de l'évolution des milieux alluviaux est une nécessité. Elle permet de visualiser les adaptations morphologiques du chenal dans son ensemble. Ces données vont permettre, si elles ont une pseudo-continuité, de quantifier l'évolution du milieu alluvial, mais la génération des MNT par interpolation entraîne des marges d'erreur dont il faut tenir compte pour la constitution de modèle d'écoulement de flux ou que l'on peut négliger pour de simples calculs de cubature.

### **Conclusion**

En conclusion, nous avons vu que l'approche 2D par cartes, photo aériennes et images satellitaires engendre un certain nombre d'erreurs et que des précautions sont à prendre dans le choix des données.

Une analyse qualitative des sources cartographiques est nécessaire, avant de passer au traitement proprement dit. Il faut prendre en considération les données hydrologiques, hydrométriques et la géomorphologie des berges afin de passer au traitement SIG. Pour les cartes anciennes qui n'ont pas beaucoup de points d'amer pour se caler, qui ont de petites échelles (plus de 1/25 000<sup>e</sup>) et pour lesquelles les projections ne sont pas mentionnées, il faut se contenter d'une analyse qualitative, dans la mesure où les résultats peuvent donner lieu à des hypothèses scientifiques imprudentes.

D'autre part la comparaison entre des documents de formats différents, même très proches dans le temps est souvent complexe. Les erreurs peuvent se trouver dans la résolution différente des images, dans le régime hydrologique spécifique du moment de la prise de chaque image, dans le contexte même du secteur à analyser dans le bassin versant, parce que l'aval est toujours la réponse des effets des processus qui se produisent en amont.

Un traitement SIG final d'une carte comporte donc une multitude d'erreurs potentielles (erreurs liées au relevé du terrain, à la reproduction des données sur papier, au dessin, à la typographie, à la qualité de la repro-

duction de la carte, au scannage, au référencement, à l'œil humain qui vectrise la donnée référencée, etc.). Pourtant il faut accepter une certaine marge d'erreur et essayer de la diminuer le plus possible, en acceptant la certitude qu'elle ne puisse pas être complètement éliminée.

L'analyse 3D est tout aussi complexe. Beaucoup plus rare, elle nécessite l'utilisation de modèles différents en fonction des usages recherchés et nécessite une connaissance hydromorphologique du terrain pour ne pas tomber dans les erreurs générées par le modèle. Des modifications anthropiques peuvent déterminer des changements très rapides dans les profils 3D d'un chenal fluvial, ce qui implique d'avoir des suivis continus dans le temps et dans l'espace.

## **Bibliographie**

BOOTH B., 2000. *Using ArcGis 3D Analyst*. Redlands, Redlands, Environmental Systems Research Institute, 212 p.

NYQUIST H., 1928. Certain topics in telegraph transmission theory, *American Institute of electrical Engineering Transaction*, vol. 47, pp. 617-644

PANIN N., 2003. The Danube Delta, Geomorphology and Holocene evolution ; a Synthesis. *Geomorphologie*, 4, pp. 247-262

POINSART D., SALVADOR P. G., 1993. Histoire de l'endiguement du Rhône à l'aval de Lyon, *Colloque international Le fleuve et ses métamorphoses*, 13-15 mai 1992, Lyon

POPA A., 1997. *Environment changes in the Danube Delta Caused by the hydrotechnical works on the St. Georges Branch*, GeoEcoMarina, vol 2, pp. 135-147

ROUSSEAU F., 2005. Caractérisation d'erreurs sur un modèle numérique de terrain en fonction de zones morphologiques. *Bulletin d'information scientifique et technique de l'IGN 75 (1)*, pp. 95-100.