

# APPORTS DES SYSTEMES D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUES À LA PERCEPTION DES CHANGEMENTS MORPHODYNAMIQUES (1970-2000) DANS LE DELTA DU DANUBE. LE CAS DU BRAS DE SAINT-GEORGE

GIS USE FOR ASSESSING MORPHODYNAMICAL CHANGES IN THE DANUBE  
DELTA. CASE STUDY: ST. GEORGE DISTRIBUTARY (1970-2000)

LAURA JUGARU <sup>(1,2)</sup>, MIREILLE PROVANSAL <sup>(2)</sup>, NICOLAE PANIN <sup>(1)</sup>, PHILIPPE DUSSOUILLEZ <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> INCD GEOECOMAR, Rue Dimitrie Onciul, No 23-25, 024053, Bucarest, Roumanie, [jugarul@geoecomar.ro](mailto:jugarul@geoecomar.ro), [jugaru@cerege.fr](mailto:jugaru@cerege.fr), [panin@geoecomar.ro](mailto:panin@geoecomar.ro)

<sup>(2)</sup> UMR 6635, CEREGE-CNRS, Europôle Méditerranéen de l'Arbois, 13545, BP 80, Aix-en-Provence, Cedex 04, [provansal@cerege.fr](mailto:provansal@cerege.fr), [dussou@cerege.fr](mailto:dussou@cerege.fr)

---

**Abstract.** The paper describes the evolution of one distributary of the Danube Delta (the St. George distributary) over the last 30 years by use of topographic maps as well as aerial and satellite images transformed and georeferenced in a geographic information system (GIS). By analysing a multitude of parameters the authors intend to assess the changes in channel and meanders morphology induced by human intervention in the drainage basin of the Danube River and in its delta in the early 80s. The anthropogenic changes (damming of the river, cut-offs of the distributary meanders within the delta area) have significantly altered the hydraulic and sediment dynamics in the distributary resulting in diminished migration of meander belts, occurrence of longitudinal sand bars, bathymetric changes. The natural channels of meanders and the newly cut channels evolve differently, fundamentally changing the sediment transport processes.

**Key words:** GIS, St. George distributary, meander belt, cut-offs, channel evolution

---

## INTRODUCTION

Ce papier présente une première analyse de l'évolution du bras de Saint George au cours des 30 dernières années, à partir du traitement de cartes topographiques et d'images satellitaires par les logiciels Mapinfo et ERMapper.

Le traitement d'image et les SIG permettent la reconstitution de l'évolution récente des milieux fluviaux en vue d'une analyse des réponses du système aux différents forçages (naturels et anthropiques). L'analyse des modifications morphologiques des systèmes fluviaux à partir de cartes anciennes, photographies aériennes et images satellitaires est fréquemment utilisée (Huckleberry, 1994 ; Large et Petts, 1996 ; Rinaldi et Simon, 1998 ; Leys et Werritty, 1999 ; Biedenharn *et al.*, 2000 ; Winterbottom, 2000 ; Lach et Wizga, 2002 ; Pisut, 2002 ; Citterio et Piégay, 2000 ; Dzana, 2000 ; Warner, 2000).

De nombreuses recherches ont été réalisées sur la mobilité des méandres à partir des années 1970. Les impacts mor-

phologiques des aménagements fluviaux ont été aussi analysés. Les dynamiques ont été étudiées à différentes échelles, à partir des processus caractérisant l'érosion des rives (Hooke, 1979 ; Knighton, 1973 ; Thorne et Tovey, 1981), le transport sédimentaire et le dépôt dans les sinuosités (Bridge, 1984, Dietrich *et al.*, 1984) et les changements dans la configuration des écoulements (Hickin, 1978).

Les impacts morphologiques et sédimentaires en relation avec les aménagements hydro-électriques ont été analysés sur des organismes de tailles très différentes (Arno - Fleuve Jaune, Timar - Tisza, Winkley - Mississippi). La réduction de la charge sédimentaire par les barrages est variable selon les fleuves. Elle est estimée à 30% sur le Mississippi, 95% sur le Nil et l'Ebre (Milliman & Meade, 1983 ; Shahin, 1985, J. Guillén & A. Palanques, 1992). Les conséquences sont en général une augmentation de l'activité érosive dans le chenal, liée au déficit de charge sédimentaire.

L'endiguement et les recoupements des méandres, destinés à améliorer les conditions de la navigation et à permettre une évacuation plus rapide des eaux de crue, entraînent des modifications significatives sur les profils en long (Emerson J.W., 1971 ; Keller E.A., 1975). Les études sur les rectifications des méandres montrent qu'ils ont un effet sur le régime hydrologique, mais aussi sur la morphométrie des bras recoupés qui se colmatent progressivement, alors que les bras de recouplement s'approfondissent (Ichim, Ra-doane, 1986).

Sur les cours d'eau à méandres, la constructions de barrages, les endiguements (protection contre les débordements) et les recoupements destinés à améliorer les conditions de la navigation et à permettre une évacuation plus rapide des eaux de crue ont entraîné des modifications significatives sur les profils en long (Emerson J.W., 1971 ; Keller E.A., 1975).

Les méandres du bras de Saint George n'ont pas été beaucoup étudiés ; des études ont été faites par Panin et Popa (1994) sur l'impact des constructions des barrages des Portes de Fer I et II sur le bras de Saint George. Une étude systématique sur les impacts morphologiques induits par les aménagements hydro-électriques et le recouplement des méandres dans le delta n'a pas été réalisée. C'est l'objet de cet article.

Deux objectifs ont été fixés à ce travail :

- analyser et quantifier l'évolution dynamique d'un chenal à méandre soumis à des variations d'apports liquides et solides ;
- analyser l'impact spécifique lié aux travaux de recouplements des méandres.

## LA ZONE D'ÉTUDE : PRÉSENTATION GÉNÉRALE

Le bras de Saint George est le plus méridional du delta du Danube. Il débute à 108 km de la mer par une diffluence du bras médian (bras de Tulcea). Sa largeur est variable (150 à 550 m), sa profondeur est comprise entre 3 et 27 m sous le niveau d'étiage local (Bondar, 2004). Très méandriforme, ce bras est actuellement le plus actif du delta du Danube, par son activité morpho-dynamique (mobilité des méandres), par l'évolution rapide de son embouchure (progradation d'un lobe deltaïque et mobilité de l'île-barrière de Sakhaline (Panin, 2003). Actuellement le bras véhicule environ 21-22% du débit liquide et 20% du débit solide du Danube à l'entrée dans son delta.

La morphologie du bras permet d'identifier 3 secteurs différents, d'amont en aval (fig. 1):

- un secteur presque rectiligne, peu sinueux, à partir de la diffluence jusqu'au PK 90, contraint par l'affleurement de l'orogène nord-dobrogéen et un système de failles en rive droite (« fractures de Saint George », Panin 2003) ;
- un secteur de méandres libres dans la plaine fluviale (6 méandres entre les PK 90 et PK 22) ;
- un secteur peu sinueux, qui recoupe les cordons littoraux historiques progradants entre le PK 22 et l'embouchure.

Trois types d'aménagements ont modifié les conditions de fonctionnement du bras :

Depuis 30 à 40 ans, l'aménagement hydro-électrique du bassin-versant (en particulier la construction des barrages hydro-électriques des Portes de Fer I et II entre 1971 et 1984) a modifié les flux solides entrants à l'amont du delta, provoquant une diminution des apports sédimentaires d'environ 25 – 30% (Panin *et al.*, 1979-1994; Popa, 1994).

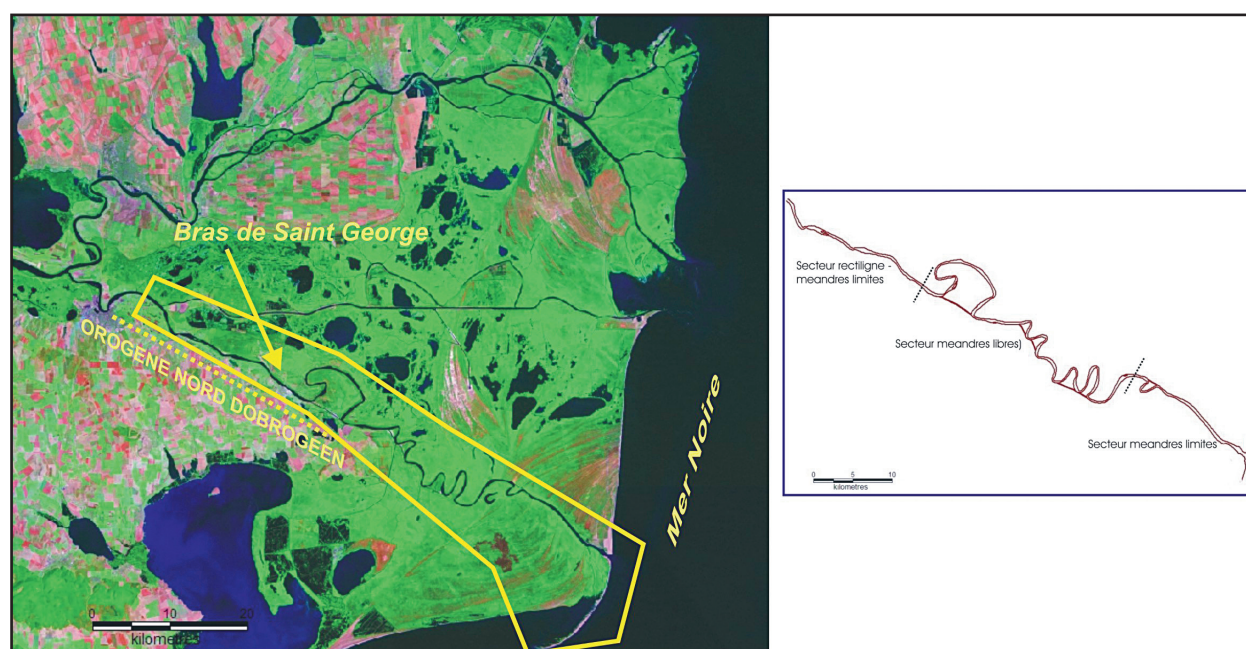


Fig. 1 Le Delta du Danube, secteur d'étude: le bras de Saint George

Dans les années 1984-1988, six méandres libres du bras de Saint George ont été recoupés afin d'améliorer la navigation et d'augmenter les débits liquides du bras; la longueur du bras a été ainsi diminuée de 32 km. Les chenaux de recouplement étaient initialement profonds de 7-8 m, avec une largeur de 75-100 m. Ces travaux ont induit un changement de répartition des débits liquides et solides du bras de Saint George, qui capte partiellement les eaux des deux autres bras du delta. La figure 2 montre que ces travaux jouent un rôle déterminant sur le débit du bras de Saint-George.

La construction d'un éperon à la première diffluence deltaïque (bras de Tulcea/bras de Sulina et de Saint-George) dans les années 1970-1980, destiné à dévier le flux liquide vers le bras de Sulina pendant les périodes de basses eaux, a réduit l'alimentation du bras de Saint-George (A. Popa, 1993). Le bras de Sulina captait 41% du flux en 1928-1929, 45% en 1958-1960 et 54% en 1990-1994.

Ces trois types d'aménagements modifient les conditions hydrologiques et sédimentaires du bras de Saint George, sou-

mis successivement à une réduction des apports solides, puis à une augmentation des apports liquides.

La figure 2 résume ces transformations, qui se surimposent à la variabilité naturelle des flux, saisonnière et pluriannuelle. La période 1971-1984, séparant la construction des deux barrages, est caractérisée par deux crues importantes, alors que la turbidité diminue. La période de rectification des méandres (1984-1988) coïncide avec deux périodes d'afflux sédimentaires importants (400 kg/s), associés à des débits liquides annuels "moyens" (1300 m<sup>3</sup>/s). Les années suivantes correspondent à une augmentation progressive des débits liquides moyens annuels (jusqu'à 1900 m<sup>3</sup>/s), alors que les concentrations de MES continuent leur diminution tendancielle (150 à 250 kg/s). L'année 1990 enregistre les débits liquides et solides les plus bas depuis 40 ans (A. Popa, 1994).

Ces modifications du rapport débit liquide/débit solide accroissent de fait la capacité globale d'érosion du bras de Saint George.

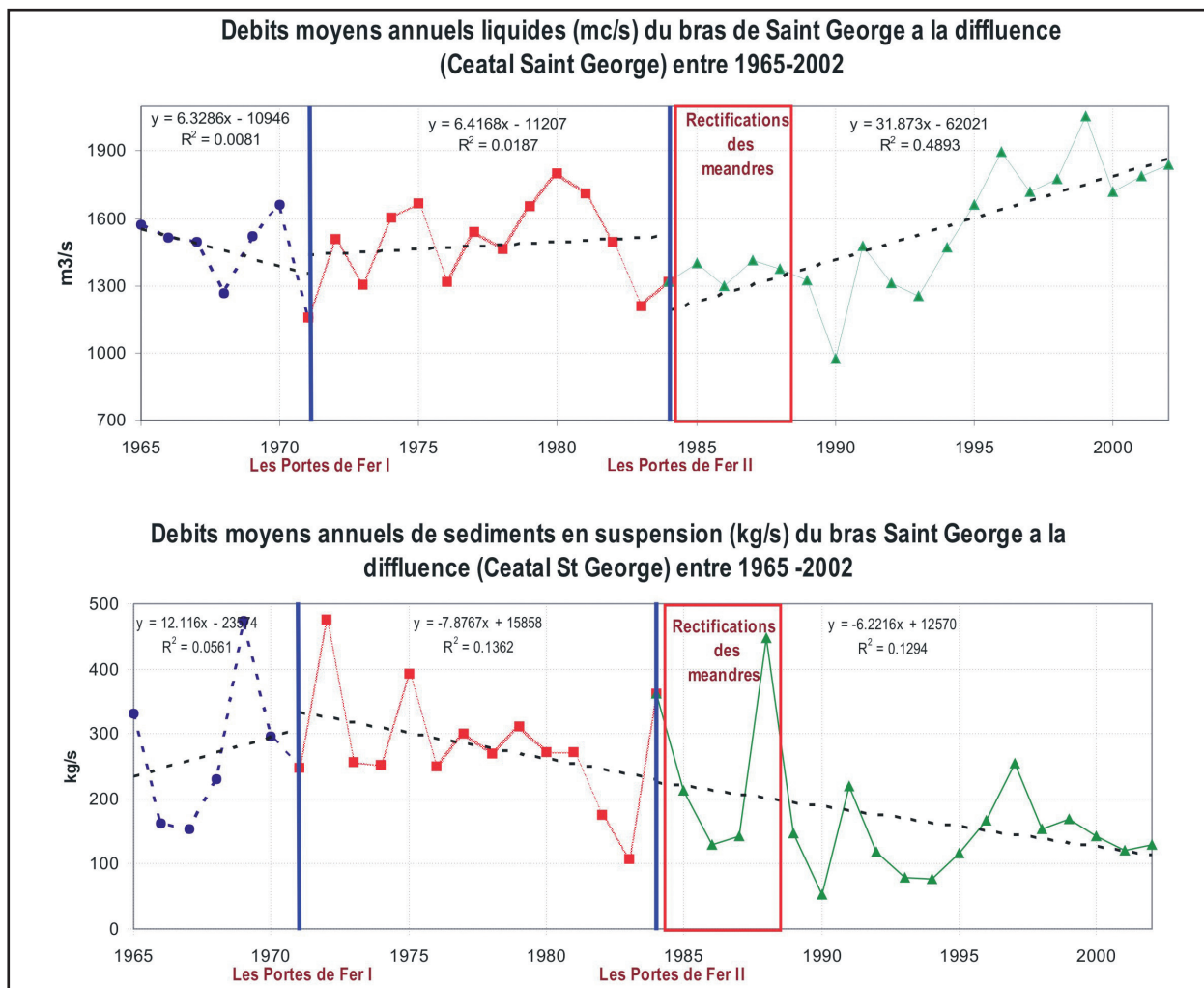


Fig. 2 Evolution des débits liquides et solides sur 37 ans sur le bras de Saint George

L'étude hydrologique réalisée par GeoEcoMar en 1989-1994 dans le secteur des méandres recoupés, confirme que les chenaux de recoupements évacuent une partie croissante des débits liquides et solides, « court-circuitant » ainsi les méandres du chenal naturel (fig. 3). Le recoupement des petits méandres aval (méandres 2, 3, 5, 6 et 7) dérive 12 à 20% des débits liquides et 11 à 22% des débits solides ; celui du grand méandre amont (1) dérive 45,6% des eaux et 37,5% des sédiments. On peut donc s'attendre à ce que ce dernier joue un rôle majeur. Par ailleurs, l'effet des recoupements est sensible dès la première année (1990) et s'amplifie très rapidement dans les années suivantes.

### MÉTHODOLOGIE DU TRAVAIL

La démarche passe par les étapes suivantes :

(1) recherche de la documentation cartographique et photographique. Nous avons sélectionné 4 dates significatives permettant de fournir une situation initiale « naturelle », puis d'encadrer les aménagements (1970, 1980, 1990, 2000):

- 1970-1972 : carte topographique au 1 :50 000 en projection Gauss Krüger (6 feuilles) (réalisées par la Direction Topographique Militaire);
- 1980 : carte topographique au 1 :25 000 en projection Gauss Krüger (13 feuilles), (réalisées par la Direction Topographique Militaire);
- 1980 : photographies aériennes au 1 :25 000 (réalisées par la Direction Topographique Militaire);

- 1990 : image satellitaire Landsat 5 TM (résolution de 28 m/pixel) et Spot (résolution 10 m/pixel) ;
- 2000 : image satellitaire Landsat 7 ETM (panchromatique – canal 8, résolution 15 m/pixel).

(2) calage, géo-référencement et rectification sous MapInfo et ERMapper des cartes topographiques et des photos. Les résolutions choisies sur les cartes (4 m pour 1971-1972 ; 2 m pour 1980) sont meilleures que de celles des images satellitaires (28, 10, 15 m).

(3) vectorisation des berges et réalisation de transects transversaux pour mesurer la largeur du chenal pour chaque période, afin de localiser et quantifier les modifications des surfaces mouillées et du périmètre du chenal (déplacement latéral, augmentation, rétrécissement).

Le secteur intermédiaire, correspondant aux méandres recoupés, a été analysé particulièrement. Les caractéristiques morphologiques de chaque méandre ont été calculées (longueur et largeur du chenal, longueurs d'onde et amplitudes des méandres, indice de sinuosité ( $Is = \lambda/L$ , où  $\lambda$  = longueur d'onde,  $L$  = longueur du thalweg entre deux inflexions de même sens).

Les données exploitées dans le SIG sont affectées d'une marge d'erreur qui doit être prise en compte. Ces incertitudes tiennent à plusieurs facteurs (Raccasi *et al.*, sous presse) :

- Les différentes résolutions spatiales des capteurs : la comparaison des images Spot (10 m/pixel) et Landsat 7 (28 m/pixel), acquises à des dates très proches (20.10.1989 et

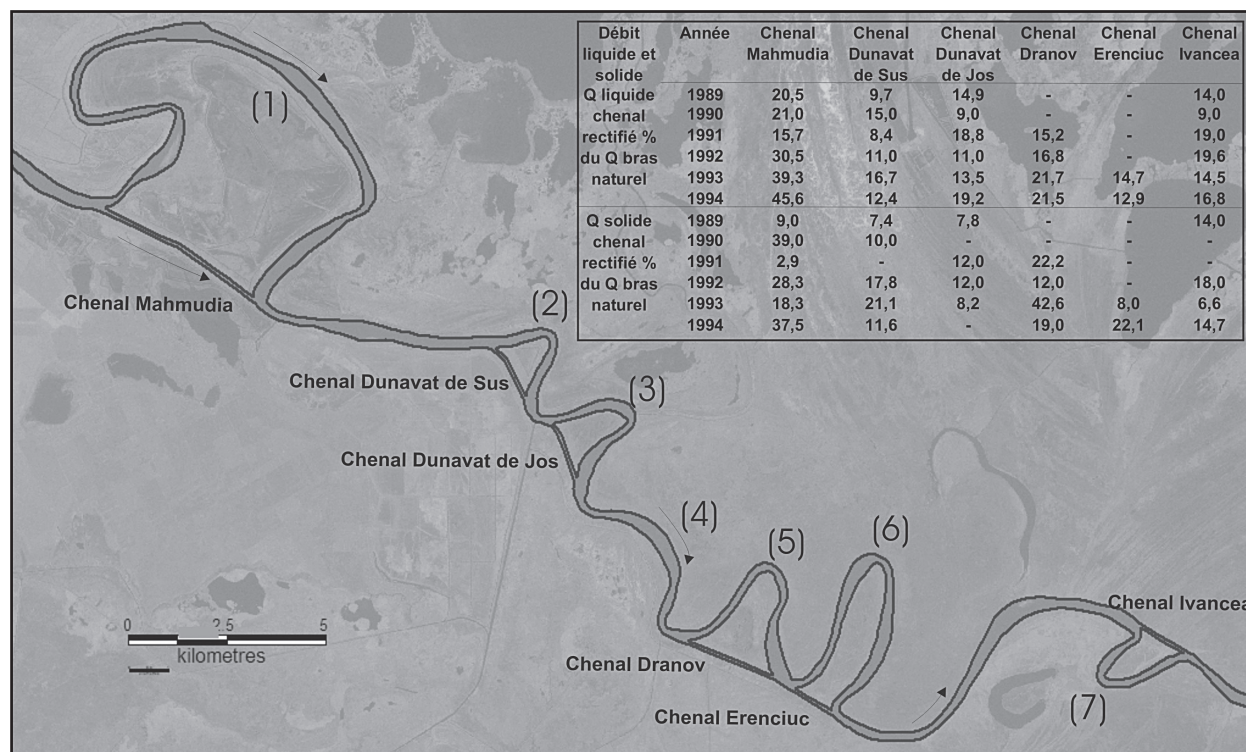


Fig 3 Evolution des débits liquides et solides (%) dans les chenaux de recoupement du bras de Saint George, 1989-1994 (d'après A. Popa, 1993)

20.08.1989), montre après vectorisation une différence en surface de la zone mouillée du chenal de 0.5 km<sup>2</sup>. L'erreur liée à la résolution de l'image est de 4.7% de la surface mouillée totale pour l'image Spot, de 12.3% pour l'image Landsat 7.

- 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. La différence entre les surfaces mouillées des deux images satellites s'explique également par la différence de débit entre les 2 dates de prise de vue (1651 m<sup>3</sup>/s pour Spot et 1404 m<sup>3</sup>/s pour Landsat 7).
- La diversité du matériel cartographique utilisé (images satellites, cartes, photographies aériennes) : les cartes décrivent par principe une situation proche de l'étiage, alors que les photographies et les images satellites correspondent à une visualisation instantanée dans des contextes hydrologiques très variables.

## RÉSULTATS

Globalement la largeur du bras n'a pas beaucoup varié entre 1970 – 2000 (fig. 4). Dans le secteur amont, on observe un faible élargissement (largeur moyenne 250 m en 1970, 260 m en 2000). Le secteur aval apparaît stable, à l'exception de l'embouchure, où le rétrécissement (de 1570 à 380 m) est lié à la progradation du lobe au-delà de la zone étudiée (laquelle passe ainsi d'un état « embouchure » à un état « che-

nal »). Le secteur des méandres est le plus mobile, caractérisé par de fortes réductions/augmentations localisées, sensibles en 1990 et 2000.

Cette disparité d'évolution souligne le rôle des recouplements artificiels des méandres et justifie une analyse par secteurs.

(1) Le secteur peu sinueux à partir de la diffluence (entre PK 108 - PK 90)

C'est la partie la plus stable du bras de Saint George. La figure 5 montre cependant une tendance à l'élargissement. Autour d'une moyenne de 35.60 m (soit 1,18 m/an), les valeurs extrêmes oscillent entre + 53 m (1,76 m/an, soit 20,15% de la valeur initiale) et -70,5 m (soit 2,35 m/an, 22,65% de la largeur initiale).

Le segment comprend deux principaux secteurs d'élargissement du chenal : entre les PK 102-101, où apparaît en 1980 une île qui s'accroît rapidement (fig. 6), puis entre les PK 94 et 91. Ils sont compris entre trois secteurs de rétrécissement, dont le plus important est situé au PK 99 (-70,5 m soit 2,35 m/an, 22,65% de la largeur initiale). Au PK 90, situé à l'amont du chenal de recouplement de Mahmudia, le chenal s'élargit jusqu'en 1980, puis se rétrécit.

(2) Le secteur des 6 méandres libres dans la plaine fluviale (entre Pk 90 et Pk 22)

Globalement, l'évolution de la largeur du chenal est très disparate, entre les moyennes de +55 m (+1,81 m/an) et -

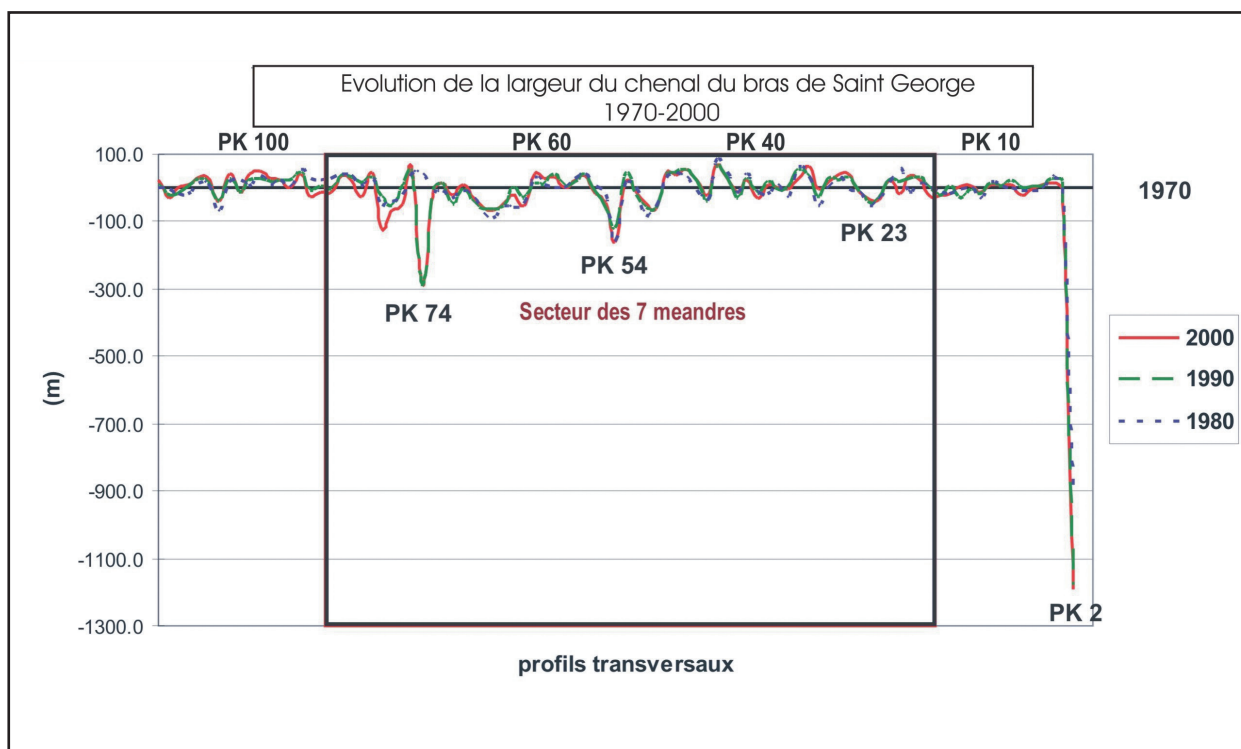


Fig. 4 Evolution de la largeur du chenal 1970-2000 (l'ordonnée zéro représente les valeurs 1970)

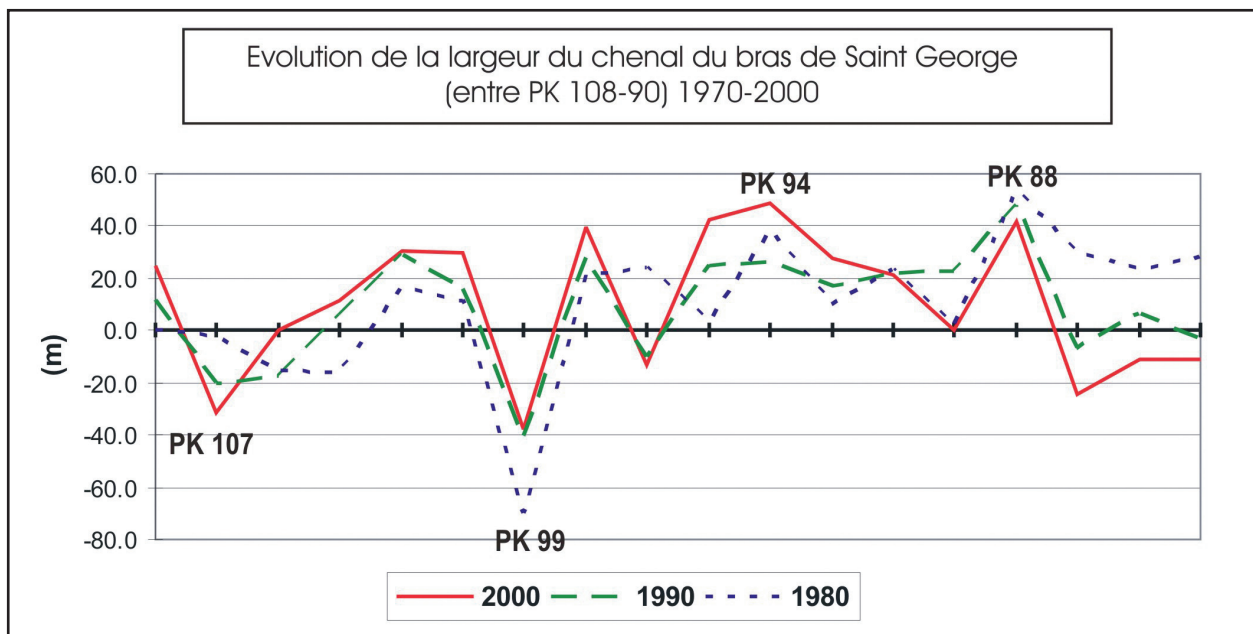


Fig. 5 Evolution de la largeur du chenal 1970-2000 entre les PK 108-90 (l'ordonnée zéro représente les valeurs 1970)

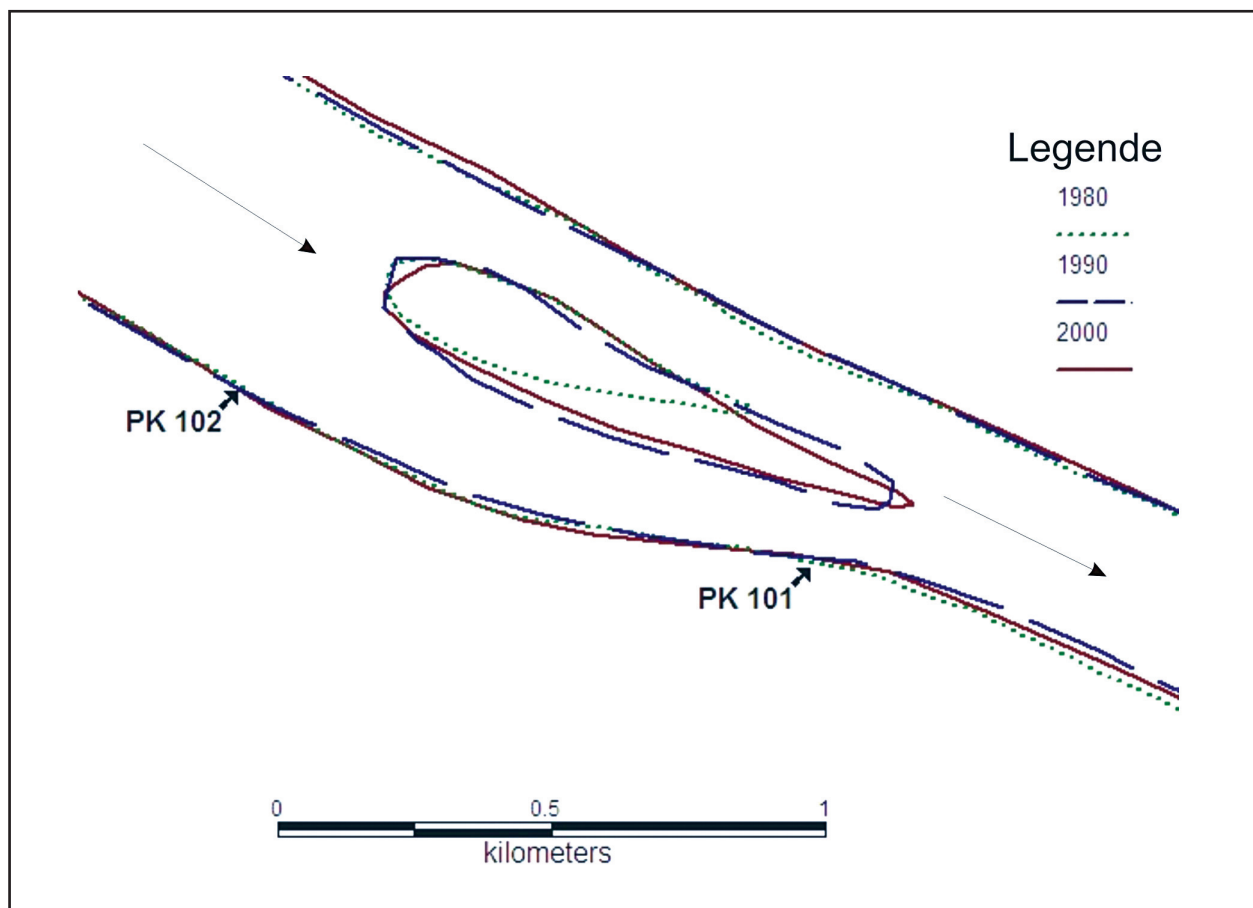


Fig. 6 Evolution d'une île à l'intérieur du chenal naturel entre 1970-2000

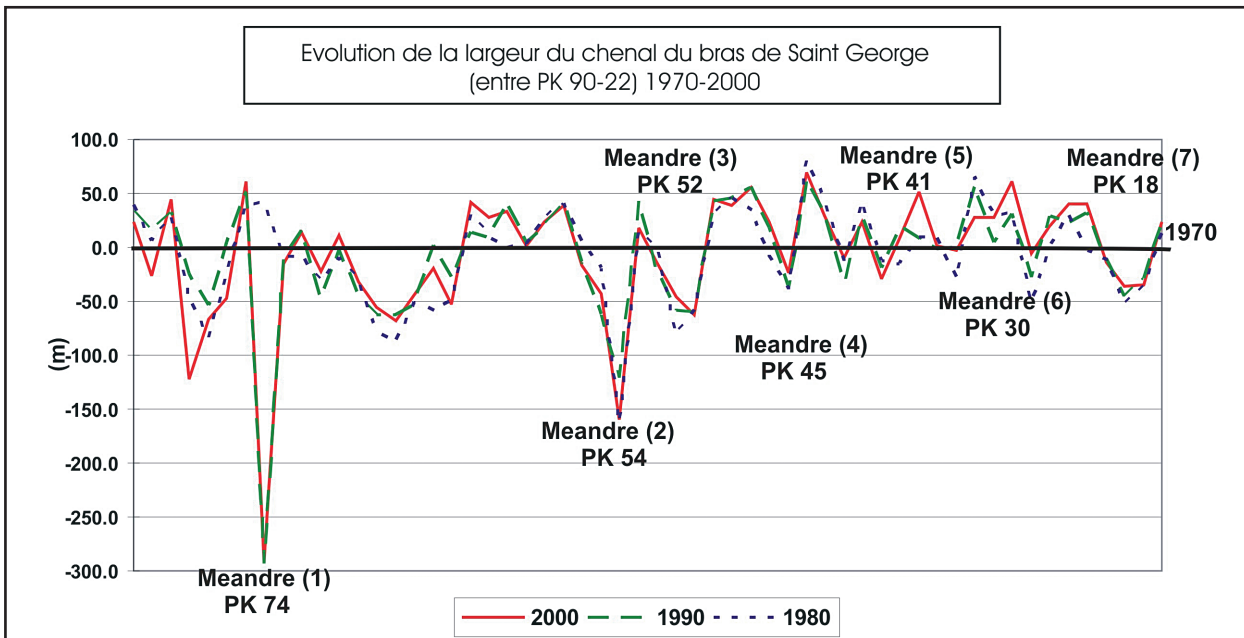


Fig. 7 Evolution de la largeur du chenal 1970-2000 entre les PK 90-22 (l'ordonnée zéro représente les valeurs 1970)

107,1 m (- 3,57 m /an). Les valeurs extrêmes oscillent entre + 80,9 m (2,69 m/an, 45,45% de la valeur initiale) et -292,6 m (14,63 m/an, 52,32% de la valeur initiale), cette dernière étant acquise en seulement 20 ans (fig.7).

On peut opposer la partie amont (PK 90 à 50), caractérisée par une tendance dominante à la réduction, à la partie aval qui a tendance à s'élargir. Ces déformations sont le plus souvent acquises dès 1980. La figure 7 montre l'organisation générale du secteur en 3 unités (méandre naturel-chenal de recouplement) : le grand méandre de Murighiol à l'amont (1), puis deux unités de petits méandres (2-3 et 5-6) séparé par le méandre 4 qui n'est pas rectifié et enfin un dernier méandre aval (7). Nous analyserons ces unités successivement.

Le secteur entre PK 84- 64 correspond au méandre de Murighiol (1), qui est le plus grand et le plus complexe des

méandres du bras de Saint George (fig. 8). L'évolution est dominée par la tendance au rétrécissement de la largeur du chenal (-114,4 m en moyenne soit 3,8 m/an). Cette tendance est la plus nette en amont du secteur, avec un maximum au PK 74 (-292,6 m, 14,63 m/an, 47,6% de la valeur initiale), où une île s'est développée en rive gauche. Elle est importante entre 1990 et 2000.

La figure 8 permet de visualiser en plan l'évolution 1970-2000. Sur le premier tiers du méandre (PK 84 à 78), l'apex des sinuosités conserve encore une certaine mobilité : au PK 81 la rive convexe prograde, mais l'extrados reste stable (d'où une réduction de 122 m la largeur du chenal) ; au PK 78 (à placer sur la figure) le méandre se déforme en translation latérale et le chenal s'élargit de 61 m. Vers l'aval, le colmatage devient prédominant : quasi fermeture du chenal artificiel de Garla Filatului (PK 74) et développement d'une île qui réduit de

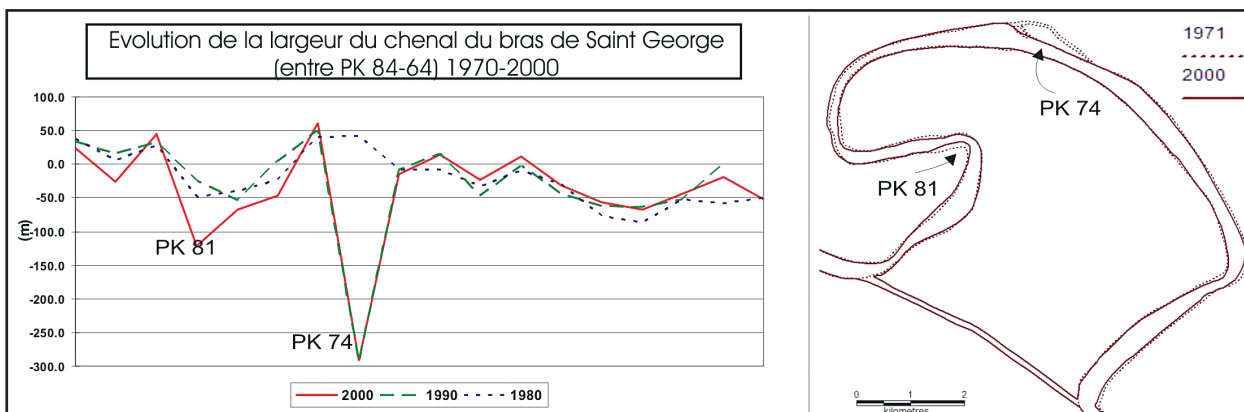


Fig. 8 Evolution de la largeur du chenal 1970-2000 entre les PK 84-64 (méandre Murighiol) (l'ordonnée zéro représente les valeurs 1970)

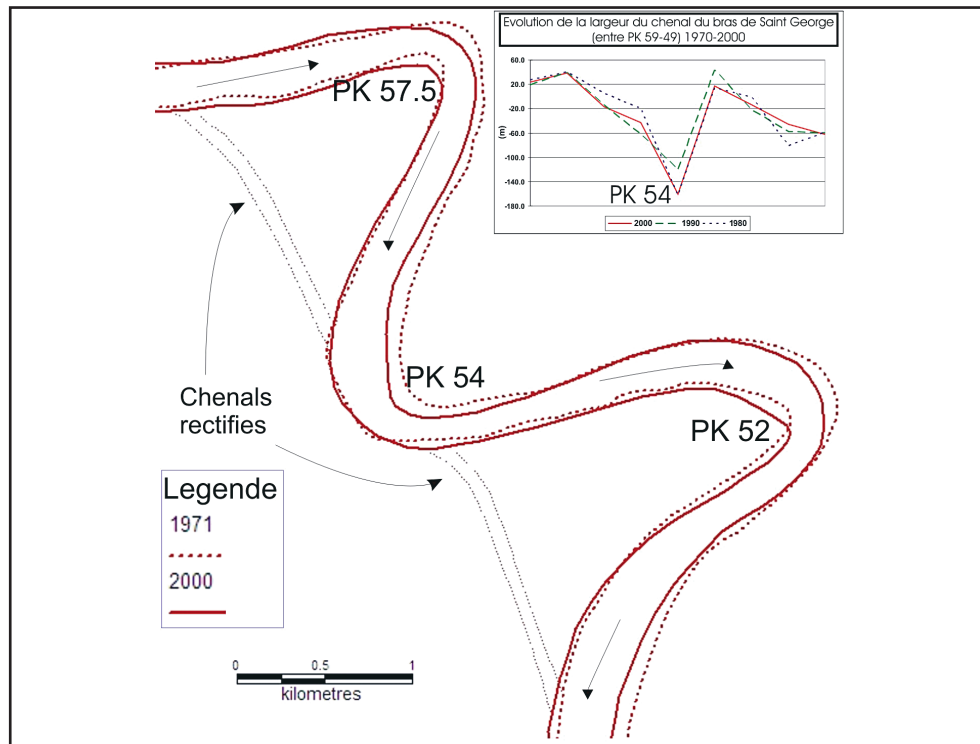
192 m la largeur du chenal principal. Une île apparaît en 1990 au PK 65, qui double de surface entre 1990 et 2000.

Le secteur entre les PK 59 et 49 est représenté par les deux méandres de Dunavat de Sus et Dunavat de Jos (2) et (3).

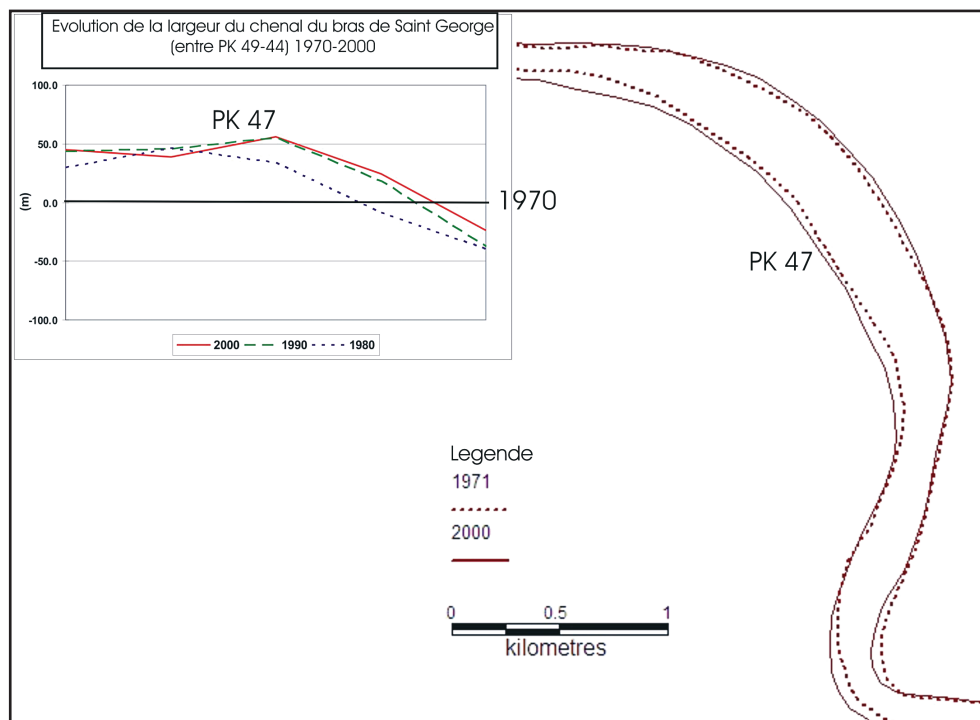
La largeur du chenal s'est réduite sur l'ensemble du secteur, en particulier dans les apex des méandres (PK 57,5, 54 et 52), avec un maximum de -162,3 m au PK 54. L'érosion des apex et la sédimentation sur les extrados aboutissent à une

réduction de la sinuosité (expansion et extension latérale décroissantes, Hooke, 1977). La connexion avec les chenaux de recouplement (Dunavat de Sus et Dunavat de Jos) déforme le bras dans la direction d'écoulement au PK 54.

Le secteur de correspondant au méandre (4) (fig. 10), entre les PK 49 et 44, est le seul qui n'a pas été rectifié à cause de sa sinuosité peu élevée ( $Is=1.3$ ). Stable à l'amont, il s'élargit de 1.84 m/an (16,56 % de la largeur initiale) à l'aval du PK 47.



**Fig. 9** Evolution des méandres Dunavat de Sus et Dunavat de Jos entre 1970-2000



**Fig. 10** Evolution de la largeur du chenal 1970-2000 entre les PK 49-44, méandre (4), (l'ordonnée zéro représente les valeurs 1970)

Dans les méandres (5) et (6), recoupés par les chenaux Dranov et Erenciuc (fig.11), le chenal est moins mobile (variations de largeur +/- 50 m, 17-18% de la largeur de 1970), bien que les apex des méandres soient encore capables de se déformer. Dans le détail, on observe une évolution en opposition de phase entre l'amont et l'aval : à l'amont (PK 41 et 34) le chenal s'élargit entre 1970 et 1980 (43 m et 65 m), puis se rétrécit entre 1980 et 2000 (20 et 37 m) ; à l'aval (PK 29) la largeur diminue entre 1970-1980 (51 m), puis s'élargit de 43 m.

(3) Le secteur peu sinueux, qui recoupe les cordons littoraux historiques progradants entre le PK 22 et l'embouchure.

Le méandre d'Ivancea (PK 22 à 16) est le dernier méandre, situé à 19 km de l'embouchure. Il correspond à l'entrée du chenal dans le système des cordons littoraux sableux hérités qui le limite vers le nord. Bien que recoupé par un chenal artificiel (chenal Ivancea), il est encore affecté par une mobilité latérale (extension des apex, PK 18,5 et 16). Son évolution est marquée par une diminution de 10.4 m entre les années 1970-1980, puis une augmentation de la largeur de 39.3 m entre 1980-1990 (après les rectifications du méandre) et 5,8 m entre 1990-2000, fig.12.

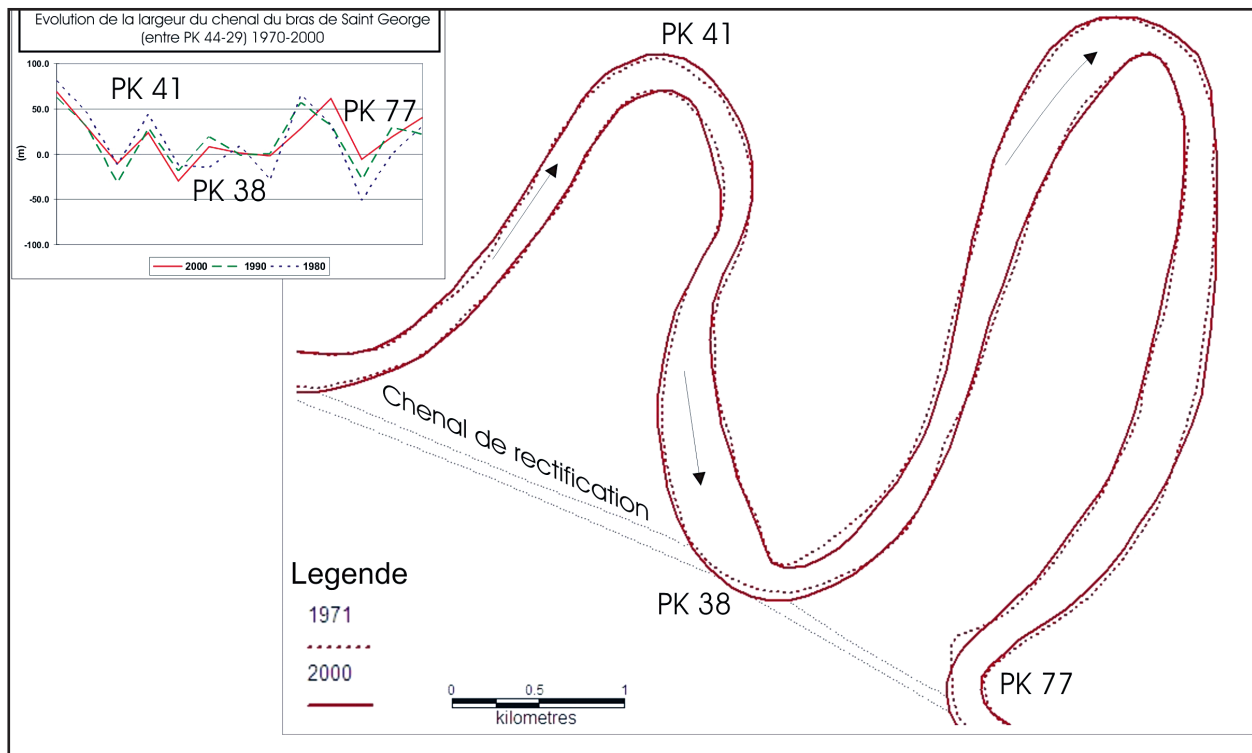


Fig. 11 Evolution de la largeur du chenal 1970-2000 entre les PK 84-64 (l'ordonnée zéro représente les valeurs 1970)

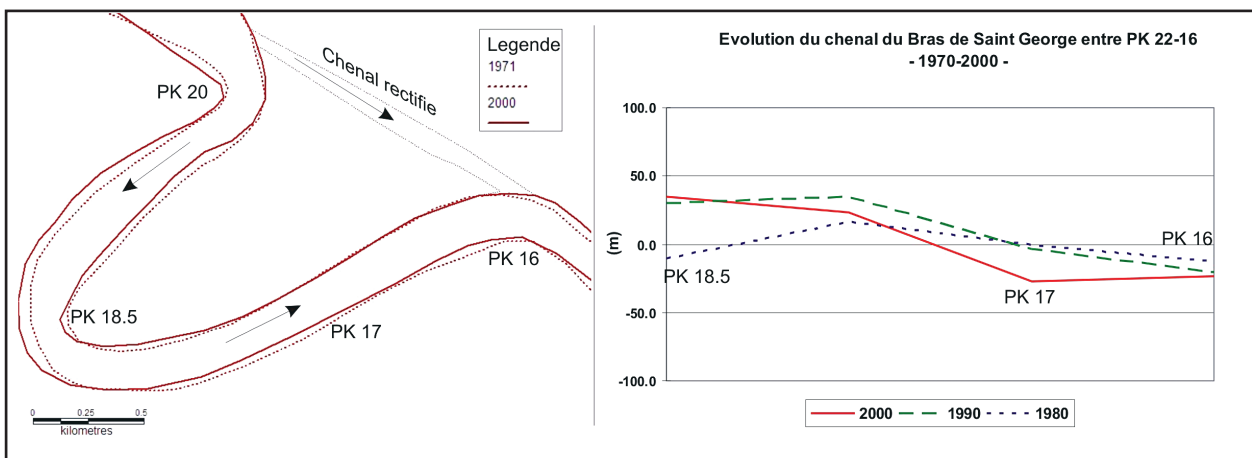


Fig. 12 Evolution de la largeur du chenal 1970-2000 entre les PK 22-16

À l'aval de ce méandre, la morphologie apparente du bras est très stable dans le temps et espace, ses variations de largeur ne dépassant pas +/-20 m. Son tracé est rectiligne, sans doute contraint par la présence des cordons sableux de la plaine maritime.

À partir du PK 5 la largeur du chenal a une évolution particulière. À l'embouchure le développement très rapide d'un lobe deltaïque au cours du dernier siècle a influencé la mor-

phologie du chenal. La rive gauche reste stable, des modifications de la ligne de côte sont dues aux différents niveaux énergétiques de la mer. La rive droite évolue en progradation jusqu'à 1897 quand l'île de Sakhalin apparaît. À partir de cette date la rive droite commence à reculer (fig.13, Giosan *et al*, 2003). Le recul du cordon littoral en formation Sakhalin vers le continent fait que la rive droite du chenal du bras de Saint George devient de plus en plus stable.

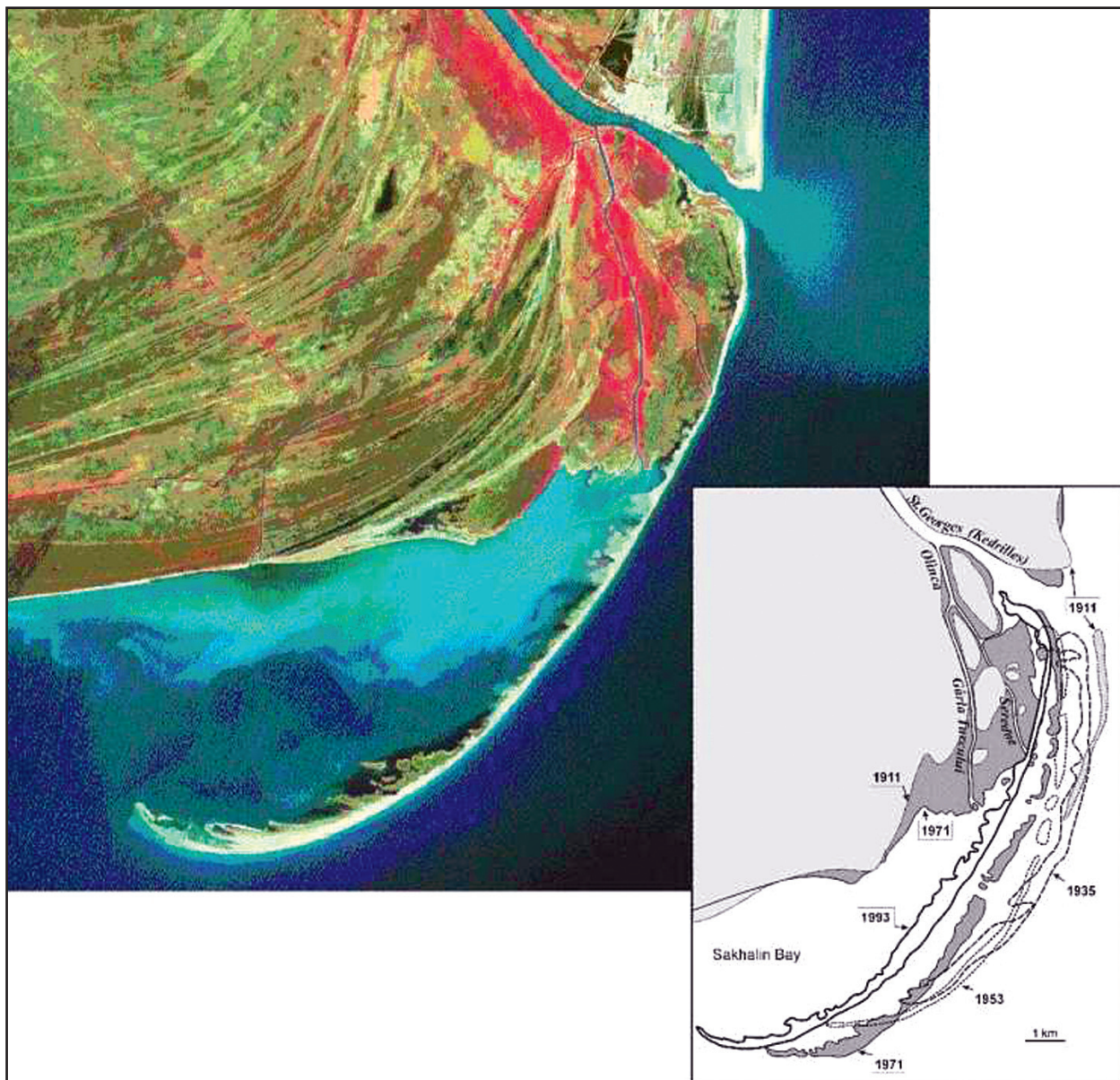


Fig. 13 Evolution du bras de Saint George à l'embouchure (Giosan *et al*, 2003). © Landsat 2000

### BILAN DE L'ÉVOLUTION MORPHOLOGIQUE DU BRAS DE SAINT-GEORGE, 1970-2000

(1) Variations de l'amplitude, de la longueur d'onde et de la sinuosité des méandres (fig. 14). L'indice de sinuosité ( $L/\lambda$ ,  $L$  = longueur du thalweg entre deux inflexions de même sens,  $\lambda$  = longueur d'onde) est élevé (entre 1.2 et 5.9), confirmant la forte sinuosité du bras. Entre 1970 et 2000, il varie peu : stable pour le premier et le dernier méandre, légèrement inférieur (-0,1) pour les méandres 2 et 3, supérieur (+0,1) pour les méandres 4, 5 et 6.

L'amplitude des méandres va de 1030 m à 5510 m. Les méandres 2, 3, 4, 5 sont peu déformés ( $\pm 30$  m), alors que l'amplitude des méandres 1 et 6 diminue (-70 m); seul le méandre 7 est stable. La longueur d'onde de la plupart des méandres est en diminution (-30 m pour 1, 3, 4, 5; -70 m pour 2 et 6), à l'exception du méandre 7 (+10 m).

Sur la base de la classification élaborée par Hooke (1977), qui repose sur le mouvement des points d'inflexion et des apex (i.e. les variations de l'amplitude et de la longueur d'onde), les méandres du bras de Saint George se caractérisent par une extension et une expansion décroissantes. La mutation est la plus rapide sur les méandres 2 et 5, situés à l'amont des deux systèmes doubles, recoupés respectivement par les canaux de Dunavat de Sus et de Dranov. Le grand méandre de Murighiol présente la même tendance, mais sa taille amortit l'amplitude des déformations. Seul le méandre aval (7) présente une expansion croissante. La translation perpendiculaire sur l'axe du chenal est très faible en amont (PK 78, Murighiol), plus importante à l'aval (méandres 3, 5, 6, 7). Sur le méandre 7, elle est associée à une translation dans le sens du courant dans le chenal.

(2) Périmètre et superficie (fig. 15).

La longueur du périmètre s'accroît de 4 km en 30 ans, soit de 2%. La surface mouillée reste quasi stable (diminution de 0,4 km<sup>2</sup>, soit 1,3%). Leurs valeurs augmentent entre 1970-1980, puis diminuent à partir de 1980. Les îles fluviales apparaissent, puis croissent à partir des années 1980 (1980-90 - 0,19 km<sup>2</sup>; 1990-2000 - 0,33 km<sup>2</sup>).

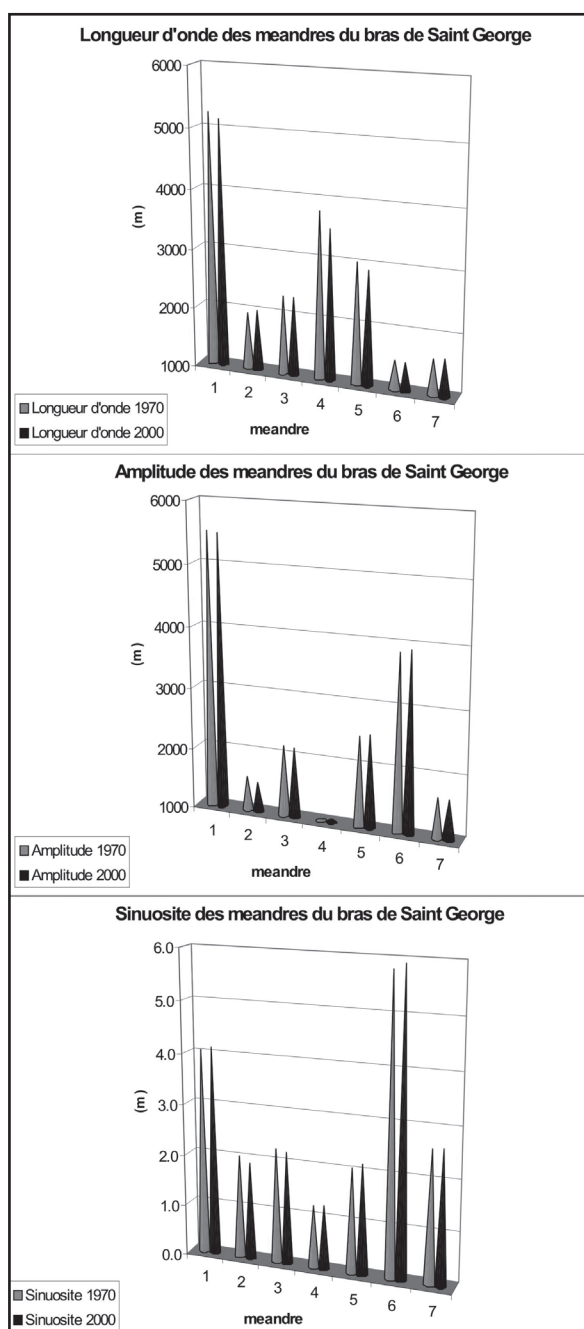


Fig. 14 Longueur d'onde, amplitude et sinuosité des méandres du bras de Saint George

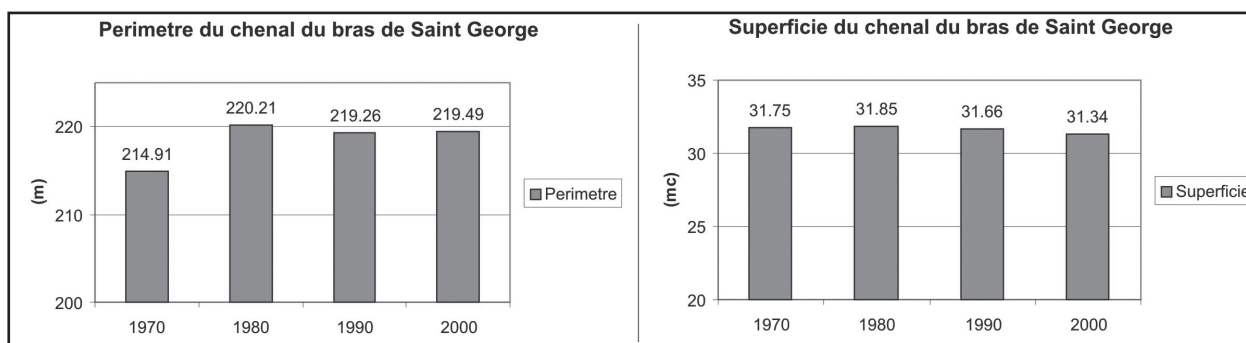


Fig. 15 Evolution du périmètre et de la superficie du chenal entre 1970-2000

## INTERPRÉTATION

Trois différents forçages décalés dans le temps entrent en interaction : la construction des barrages hydro-électriques des Portes de Fer (1971-1984) réduit la charge solide ; le recouplement artificiel des méandres en 1984-1988 ont des effets contradictoires sur les débits liquides et les transformations de la diffluence amont du delta (Bras de Tulcea/bras de Saint George et Sulina) dans les années 1980 qui ont eu comme effet des modifications des distributions des débits liquides et solides entre les trois bras du Danube après les rectifications des méandres du bras de Saint George. Ces forçages ont un impact global sur la dynamique hydro-sédimentaire du bras de Saint-George, mais le recouplement des méandres induit également des effets localisés sur les méandres et aux points de recouplement canaux-méandres.

Dès 1975 les barrages provoquent une réduction du flux solide (fig. 2). A l'aval, le ralentissement du colmatage de l'embouchure ainsi que l'amorce du recul du cordon de Sakhaline confirme la précocité de cet impact. Le système fluvial s'ajuste à ces changements : il se recharge en sédiments en érodant le chenal. Cette réponse est visible sur la plupart des secteurs après 1980. Cette évolution morphologique se traduit, selon les cas, par une réduction de la largeur moyenne du chenal (vraisemblablement corrélée à une incision du fond) ou un élargissement (érosion des berges en réponse au colmatage du fond du chenal). Ces comportements contradictoires se succèdent sur le linéaire : l'élargissement/colmatage est dominant à l'amont du bras, dans la première partie du secteur 4, puis dans les méandres 5 et 6, alors que l'incision verticale caractérise le méandre de Murighiol et l'aval du secteur 4. On peut faire l'hypothèse d'un transit en relais de la charge de fond déstockée par l'érosion du chenal, puis piégée dans les secteurs fluviaux plus sinueux ou moins profonds. La mobilité des méandres est réduite.

A partir de 1984, le recouplement des méandres provoque un accroissement du débit liquide moyen annuel qui augmente la puissance fluviale et doit logiquement aboutir à une accentuation de l'évolution précédente. L'analyse montre cependant que ce n'est pas toujours le cas : on peut séparer les impacts globaux et locaux.

Globalement, la longueur d'onde et la sinuosité du système semblent se « figer », à l'exception de son extrémité aval (méandre 7). La tendance générale est une réduction de la longueur d'onde et de l'amplitude des méandres recouplés, traduisant une expansion-extension décroissante, significative d'une perte d'énergie. La réduction des largeurs (= incision), dominante dans les méandres amont (1, 2 et 3), contraste avec l'élargissement du chenal (= colmatage) à partir du méandre 4 (fig. 7) : on peut faire l'hypothèse que la charge de fond déstockée à l'amont est en cours de transit dans les méandres aval. Il est enfin difficile d'expliquer le maintien d'une bonne mobilité dans le méandre recouplé 7, à l'aval.

Dans le détail, les évolutions doivent être interprétées en fonction des contextes locaux : amont/aval des canaux de recouplement, méandres court-circuités. A l'amont du système (PK 108-90, fig. 5), le chenal s'élargit progressivement entre 1970 et 2000 (à l'exception du PK 99) et une île se développe à partir de 1990 : l'érosion des berges est donc bien une réponse au colmatage du chenal. A partir du PK 91, très proche de l'entrée du canal de recouplement de Mahmudia, la réduction de la largeur du chenal pourrait correspondre à une incision par érosion régressive, induite par l'accélération des vitesses du flux.

Dans le méandre recouplé de Murighiol, l'évolution morphologique traduit une réduction de l'énergie, de l'amont (mobilité des apex, translation latérale au PK 78, forte réduction de largeur entre 1990 et 2000) vers l'aval (largeur stable, apparition d'îles), qui s'explique par la captation d'une part importante du débit liquide par le canal de recouplement.

Dans les méandres 5, 6 et 7, les variations alternativement positives/négatives de la largeur pourraient traduire le transit de la charge de fond et le ré-ajustement du lit qui l'accompagne. La translation des extradors démontre que ces méandres bien qu'ils aient été recouplés, disposent encore d'une dynamique naturelle. Mais la vitesse d'extension des apex s'est encore réduite depuis 1980. Enfin, dans les zones de recouplement canaux-méandres, le chenal naturel est déformé dans la direction de l'écoulement, témoignant de l'énergie importante du flux liquide au débouché des canaux artificiels.

Ces observations sont conformes à celles de Ionita et Radoane (1986). Mais elles ne recourent pas systématiquement les données bibliographiques sur la dynamique des méandres recouplés. Laczay (1977) confirme la variation rapide de la largeur des fleuves hongrois, alors que Matthes (1947) montre la stabilité des méandres du Mississippi. Sur la Wales, Thorne et Lewin (1979) démontrent que les recouplements favorisent le colmatage, la réduction de la mobilité des méandres et l'élargissement dans les secteurs chenal recouplé-méandre. Mais Mosley (1975) décrit une augmentation de la sinuosité du fleuve Bollin (Cheshire) après recouplement, comme Brice (1977) pour le Sacramento, où l'augmentation de la sinuosité s'accompagne d'une réduction de la largeur du chenal. Enfin, pour Hickin (1983), les coupures n'introduisent que des perturbations passagères du système fluvial.

D'autres chercheurs ont fait des remarques sur l'incidence des rectifications avant et après (Lathrap, 1968), ou sur les évolutions à long temps (300 ans sur le fleuve Klaralven par Sundborg, 1956).

Les mutations du Danube apparaissent donc originales, par la rapidité et l'ampleur des réponses morphologiques. Ces particularités peuvent s'expliquer par la granulométrie très fine des sédiments, à dominante limono-argileuses, y compris sur les berges et les apex des méandres, qui est caractéristique du delta d'un très long fleuve médio-européen.

Elle confère une grande mobilité à la charge sédimentaire, qui permet une réponse rapide du système fluvial au double forçage des barrages et des recoupements de méandres.

## CONCLUSION

Sur le bras méandriforme de Saint George, la réduction des débits solides provoquée par les barrages, puis l'augmentation du débit liquide après le recoupement artificiel des méandres, déterminent une augmentation globale progres-

sive de l'énergie fluviale. Ces forçages donnent naissance à un mécanisme d'ajustement, qui tend vers un nouvel équilibre. En diminuant la distance entre deux points d'un méandre, les canaux de recoupement augmentent la puissance spécifique à leur débouché, mais la réduisent sur le méandre recoupé. La traduction morphologique (réduction de la longueur d'onde et de l'amplitude des méandres, changement de la sinuosité et de la largeur du chenal, colmatage ou incision) est variable d'un point à un autre en fonction du contexte dynamique et de la succession d'amont vers l'aval.

---

## REFERENCES

- ABAD, J. D., GARCIA, M. H., 2006 – RVR Meander: A toolbox for re-meandering of channelized streams. *Computer & Geosciences*, 32, 92-101
- ANTONELLI, C., PROVANSAL, M., VELLA, C., 2004 – Recent morphological changes in a deltaic environment. The case of the Rhone river, *Geomorphology* 57, 385-402
- ANTONELLI, C., PROVANSAL, M., FLEURY, J., PICHARD, G., 2004 – Analyse de l'évolution séculaire du lit du Rhône à Arles à partir de l'analyse d'image. Implications géomorphologiques et paléo-hydrologiques. *Méditerranée*, 1-2, 135-142
- ASTRADE, L., DUMONT, A., 2000 – L'évolution du profil en long d'un cours d'eau navigable sous l'effet des aménagements, la Grande Saône du début du XIXe s. à aujourd'hui. *Geocarrefour*, vol 75 4/2000
- BILLI, P., RINALDI, M., SIMON, A., 1997 – Disturbance and adjustment of the Arno River, Central Italy, Historical perspective, the 2000 years. *Management of landscapes Disturbed by Channel Incision*
- BONDAR C., 2004 – Etude des conséquences de la construction du chenal Bastroe dans la Réserve de la Biosphère du Delta du Danube - Roumanie sur l'environnement. *Rapport GeoEcoMar, Bucarest, Roumanie*
- BOYD, F. EDWARDS., DUANE, H. S., 2002 - River meandering dynamics. *Physical review E*, vol 65, 046303
- BRAVARD, J-P., PETIT, F. – Les cours d'eau, Dynamique du système fluvial. Armand Colin
- CUBIZOLLE, H., 1996 – La morphodynamique fluviale dans ses rapports avec les aménagements hydrauliques: l'exemple de la Dore au XX e siècle (Massif Central, France). *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 1, 67-82
- DOLLAR, EVAN S. J., 2002 – Fluvial geomorphology. *Progress in Physical Geography* 26, 1, 123 - 143
- DOUGLAS, F.S. JR., SIMON, A., STEFFEN, L.J., 2000 – Reservoir effects on downstream river channel migration, *Environmental Conservation* 27, 1, 54-66
- ELLIOT, JOHN. G., GYETVAI, S., 1999 – Channel-Pattern Adjustment and geomorphic Characteristics of Elkhead creek, Colorado, 1937-97. U.S. Geological Survey, Water Resources Investigations Report 99-4098
- GUILLEN, J., PALANQUES, A., 1992 – Sediment dynamics and hydrodynamics in the lower course of a river highly regulated by dams: the Ebro River. *Sedimentology*, 39, 567-579
- HOOKE, J.M., 1984 – Changes in river meanders: a review of techniques and results of analyses. *Progress in Physical Geography*, vol 8, 473-508
- HOOKE, J.M., 1986 – Changes in river morphology. *International Geomorphology*, Part I, 591-600
- JUGARU, L., PROVANSAL, M., 2005 - Caractérisation sédimentaire des apports du Danube dans la plaine deltaïque lors d'une forte crue - avril 2005, Congrès de l'Association des Sédimentologues Français, Gien, Octobre 2005
- KELLERHALS, R., 1982 – Effect of River Regulation on Channel Stability. *Gravel-bed Rivers*, 685-715
- LETEINTURIER, B., ENGELS, P., PETIT, F., CHIFFAUT A., 2000 – Morphodynamisme d'un tronçon de Loire bourbonnaise depuis le XVIIIe siècle. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 4, 239-252
- LITEANU, E., PRICĂJAN, A. – Alcătuirea geologica a Deltei Dunarii, *Studii Tehnice si Economice*, seria E, 6, Institutul geologic, București
- PANIN N., 1974 – Evolutia Deltei Dunarii in timpul Holocenului. *Studii Tehnice si Economice ale Institutului Geologic, Seria H- Geologia Cuaternarului*, 5, 107-121, Bucuresti
- PANIN, N., 1976 – Some aspects of fluvial and marine processes in Danube Delta. *Institutul de geologie si geofizica, Anuarul Institutului Geologie si Geofizica*, vol L
- PANIN N., JIPA D.C., GOMOIU M.T., SECRIERU D., 1998 – Importance of sedimentary proceses in environmental changes: Lower River Danube – Danube Delta – Westwrn Black Sea System. In " *Environmental Degradation of the Black Sea: Challenges and Remedies*" (U. Unluata Ed.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht
- PANIN, N., 1989 – Danube Delta. Genesis, evolution and sedimentology. *Rev. Roum. Géol. Géophys. Géogr., Ser. Géographie*, 33: 25-36, Bucharest
- PANIN, N., 2003 – The Danube Delta. Geomorphology and Holocene evolution: a Synthesis. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 4, 247-262

- PATRUT I., PARASCHIV C., DĂNET T., MOTAS L., DĂNET N., BALTRES N., 1983 – The geological constitution of the Danube Delta. A. Inst. Geol. Geofiz., 59: 55-61, București
- POPA, A., 1993 – Liquid and sediment inputs of the Danube River into the north-western Black Sea. In Transport of Carbon and Nutrients in Lakes and Estuaries, Part 6 (Kempe, S., Eisma, D & Degens, E.T) Mitteilungen aus dem Geologisch – Palaontologischen Institut und Museum der Universität Hamburg SCOPE/UNEP Sonderheft 74, 137. 149
- POPA, A., 1997 – Environment changes in the Danube Delta caused by the hydrotechnical works on the Sf. Gheorghe branch, Geo-Eco-Marina, 2, p 135-147
- PROVANSAL, M., VELLA, C., ARNAUD FASSETTA, G., SABATIER, F., MAILLET, G., 2003 – Role of fluvial sediments inputs in the mobility of the Rhone delta coast (France), Geomorphologie, no 4, p 271-282
- RACCASI, G., JUGARU, L., PROVANSAL, M. (SOUS-PRESSE), 2005 - Incertitudes inhérentes à l'acquisition et au traitement de données anciennes dans la mise en place de modèle 2D, 3D et diachronique. Cas de deux milieux fluviaux: le bas Rhône et le delta du Danube, Colloque Incertitude et Environnement Mesures, Modèles, Gestion, Arles, Novembre 2005
- SCHMITT, L., MAIRE, G., HUMBERT, J., 2001 – La puissance fluviale: definition, interet et limites pour une typologie hydro-geomorphologiques de rivieres. Z. Geomorph. N. F. 45,2,201-224, Berlin – Stuttgart
- TIMAR, G., 2003 - Controls on channel sinuosity changes: a case study of the Tisza River, the Great Hungarian Plain. Quaternary Science Review, 22, 2199-2207
- UNGUREANU, GH. V., STANICA, A., 2000 – Impact of human activities on the evolution of the Romanian Black Sea beaches, Lakes& Reservoirs: Research and Management, 5, 111-115
- URIBELARREA, D., PÉREZ-GONZALEZ, A., BENITO, G., 2003 – Channel changes in the Jarama and Targus rivers (central Spain) over the past 500 years. Quaternary Science Reviews, 2209-2221
- VESPREMEANU STROE, A., CONSTANTINESCU, S., 2000-2001 – Tarmul Sulina- Sf Gheorghe. Elemente de morfodinamica, Studii si cercetari de geografie, t. XLVII-XLVIII, p 217-227, Bucuresti
- WINKLEY, B.R., 1982 – Response of the Lower Mississippi to River Training and Realignment. Gravel-bed Rivers, 659-681
- \*\*\*\* 1970-1972, 1980 – Cartes topographiques et photographies aériennes, Direction Topographique Militaire, Bucarest