

Les systèmes fluviaux à chenaux anastomosés en milieu périglaciaire : la Léna et ses principaux affluents (Sibérie centrale)

Anastomosing-fluvial systems in the periglacial zone: The Lena River and its main tributaries (Central Siberia)

Flusssysteme mit verwilderten Gerinnen in periglazialem Milieu: Die Lena und ihre wichtigsten Zuflüsse (Zentralsibirien)

Emmanuèle Gautier et François Costard

Volume 54, numéro 3, 2000

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/005647ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/005647ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Les Presses de l'Université de Montréal

ISSN

0705-7199 (imprimé)

1492-143X (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Gautier, E. & Costard, F. (2000). Les systèmes fluviaux à chenaux anastomosés en milieu périglaciaire : la Léna et ses principaux affluents (Sibérie centrale). *Géographie physique et Quaternaire*, 54(3), 327–342. <https://doi.org/10.7202/005647ar>

Résumé de l'article

Cette étude concerne les rivières à régime de débâcle en milieu périglaciaire à pergélisol épais et continu. La Léna et ses principaux affluents (Aldan, Vilioui) présentent des formes fluviales spécifiques : on distingue dans le lit mineur des chenaux larges et peu profonds, qui enserrant des bancs sableux et des îles boisées, tandis que dans la plaine et les îles se développent des bras anastomosés plus sinueux et plus étroits. L'objectif de cette étude préliminaire est la compréhension du fonctionnement de ces hydrosystèmes, en se fondant sur une analyse des processus sédimentaires. En premier lieu, l'étude des dépôts dans les chenaux révèle des épaisseurs remobilisées à l'occasion de la crue annuelle, plus fortes dans le cas des bras anastomosés que dans les chenaux principaux. De plus, la méthode de Passega (1957) permet la détermination des modes de dépôt des particules pour chacune des unités fluviales fonctionnelles. En second lieu, l'analyse de coupes situées à l'interface de chenaux actifs et d'unités stabilisées apporte des informations sur les modes de remblaiement des chenaux et met également en évidence des dépôts spécifiques que l'on peut interpréter comme étant liés à des ruptures d'embâcles de glace et de débris ligneux. Enfin, le rôle de l'érosion thermique et mécanique que les cours d'eau exercent localement sur les berges est examiné. Le recul des berges apporte au système une charge abondante très homométrique issue en grande partie de dunes éoliennes anciennes. Au cours de l'étiage d'été, les dépôts des chenaux asséchés sont repris partiellement en charge par la déflation éolienne et contribuent ainsi à l'édification de nouvelles dunes sur les berges.

Essai

LES SYSTÈMES FLUVIAUX À CHENAU ANASTOMOSÉS EN MILIEU PÉRIGLACIAIRE : LA LÉNA ET SES PRINCIPAUX AFFLUENTS (SIBÉRIE CENTRALE)

Emmanuèle GAUTIER et François COSTARD, Université de Saint-Denis et CNRS-Laboratoire de Géographie physique (UMR 8591), 1 Place Aristide Briand, 92195 Meudon Cedex, France ; CNRS-Orsayterre (UMR 8616), Université de Paris-Sud, 91405 Orsay Cedex, France.

RÉSUMÉ Cette étude concerne les rivières à régime de débâcle en milieu périglaciaire à pergélisol épais et continu. La Léna et ses principaux affluents (Aldan, Viliouï) présentent des formes fluviales spécifiques : on distingue dans le lit mineur des chenaux larges et peu profonds, qui enserment des bancs sableux et des îles boisées, tandis que dans la plaine et les îles se développent des bras anastomosés plus sinueux et plus étroits. L'objectif de cette étude préliminaire est la compréhension du fonctionnement de ces hydrosystèmes, en se fondant sur une analyse des processus sédimentaires. En premier lieu, l'étude des dépôts dans les chenaux révèle des épaisseurs remobilisées à l'occasion de la crue annuelle, plus fortes dans le cas des bras anastomosés que dans les chenaux principaux. De plus, la méthode de Passega (1957) permet la détermination des modes de dépôt des particules pour chacune des unités fluviales fonctionnelles. En second lieu, l'analyse de coupes situées à l'interface de chenaux actifs et d'unités stabilisées apporte des informations sur les modes de remblaiement des chenaux et met également en évidence des dépôts spécifiques que l'on peut interpréter comme étant liés à des ruptures d'embâcles de glace et de débris ligneux. Enfin, le rôle de l'érosion thermique et mécanique que les cours d'eau exercent localement sur les berges est examiné. Le recul des berges apporte au système une charge abondante très homométrique issue en grande partie de dunes éoliennes anciennes. Au cours de l'étiage d'été, les dépôts des chenaux asséchés sont repris partiellement en charge par la déflation éolienne et contribuent ainsi à l'édification de nouvelles dunes sur les berges.

ABSTRACT *Anastomosing-fluvial systems in the periglacial zone: The Lena River and its main tributaries (Central Siberia).* This study deals with Siberian rivers dominated by outburst flood within a continuous and deep permafrost zone. The Lena basin rivers (Lena, Aldan and Viliouï) present specific fluvial forms: they consist of multiple wide channels separated by sandy bars and vegetated alluvial islands; sinuous and narrow branches can be observed in the floodplain and on the islands. The objective of this preliminary study is to understand the dynamics of these hydro-systems on the basis of a sedimentary processes analysis. Firstly, the study of the channels deposits reveals that the thickness of sediments remobilised during the annual flood is more important in the case of the anastomosed branches than in the main channels. Furthermore, Passega's method (1957) allows the determination of depositional mechanisms for the active fluvial units. Secondly, the analysis of sections located at the interface between active channels and stabilised units provide information about the channels' sedimentary processes. Specific deposits bordering the channels, that could be associated with log-jams and ice-jams, are also identified as major sedimentation processes. Finally, the effect of thermal and mechanical erosion on the banks is examined. It appears that the narrowly graded sediments deposited in the river bars derive mainly from the remobilisation of ancient aeolian deposits. During the summer low discharge, the dewatered channels are subject to aeolian deflation, building younger dunes on the banks.

ZUSAMMENFASSUNG *Flusssysteme mit verwilderten Gerinnen in periglazialem Milieu: Die Lena und ihre wichtigsten Zuflüsse (Zentralsibirien).* Diese Studie betrifft Flüsse mit Eisgang in periglazialem Milieu mit tiefem kontinuierlichem Permafrostboden. Die Lena und ihre wichtigsten Zuflüsse (Aldan, Viliouï) weisen spezifische Flussformen auf: Man erkennt im Normalbett breite Gerinne mit geringer Tiefe, welche sandige Bänke und bewaldete Inseln umschließen; in der Ebene und den Inseln dagegen entwickeln sich gewundene und engere verwilderte Flussarme. Das Ziel dieser vorbereitenden Studie ist das Funktionieren dieser Wassersysteme zu verstehen und dies ausgehend von der Analyse der Ablagerungsprozesse. Als erstes lässt die Untersuchung der Ablagerungen in den Gerinnen erkennen, dass die Dicke der während der jährlichen Überflutung wiedermobilisierten Ablagerungen in den verwilderten Armen stärker als in den Hauptgerinnen ist. Darüberhinaus erlaubt die Methode von Passega (1957) den Ablagerungsmodus für jede aktive Flusseinheit zu bestimmen. Zweitens liefert die Analyse von Abschnitten am Berührungspunkt von aktiven Gerinnen und stabilisierten Einheiten Informationen über den Aufschüttungsmodus der Gerinne und macht spezifische Ablagerungen deutlich, welche man auf Durchbrüche der Eis- und Holztrümmernhäufung zurückführen kann. Schließlich wird die Rolle der thermischen und mechanischen Erosion untersucht, welche die Wasserläufe örtlich auf die Flussufer ausüben. Der Rückzug der Ufer trägt dem System eine starke, sehr homometrische Schuttlast zu, zum großen Teil aus den alten, durch den Wind gebildeten Dünen stammend. Während des Niedrigwassers im Sommer werden die Ablagerungen der ausgetrockneten Gerinne teilweise durch die Windabnahme wieder angelagert und tragen so zur Errichtung neuer Dünen an den Ufern bei.

INTRODUCTION

LES OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

L'objet de cette contribution est une meilleure connaissance du fonctionnement des systèmes fluviaux à chenaux anastomosés situés en milieu périglaciaire à pergélisol épais et continu. L'étude porte sur un secteur de la Léna en Sibérie centrale (fig. 1). Les formes fluviales de la Léna et ses affluents de Sibérie centrale semblent se rapprocher des styles fluviaux anastomosés précédemment décrits par Schumm (1968), Smith (1976), Rust (1978), Smith et Putnam (1980), Smith et Smith (1980), Smith (1983), Knighton et Nanson (1993, 1994a, 1994b), Nanson et Knighton (1996). Le lit principal de la Léna est constitué de chenaux multiples, larges et très rarement sinueux, qui sont séparés par de vastes îles (fig. 2a et fig. 2b). La plaine d'inondation très étendue est parcourue de chenaux d'une morphologie différente des chenaux principaux : ils sont plus étroits et souvent plus sinueux que les précédents et on les observe également dans les îles (fig. 2a). Par analogie avec les descriptions de systèmes en anastomose, ce dernier type est désigné sous le terme de « chenaux anastomosés ».

Le manque de documents fiables et précis tels que les photographies aériennes et les cartes à grande échelle ne

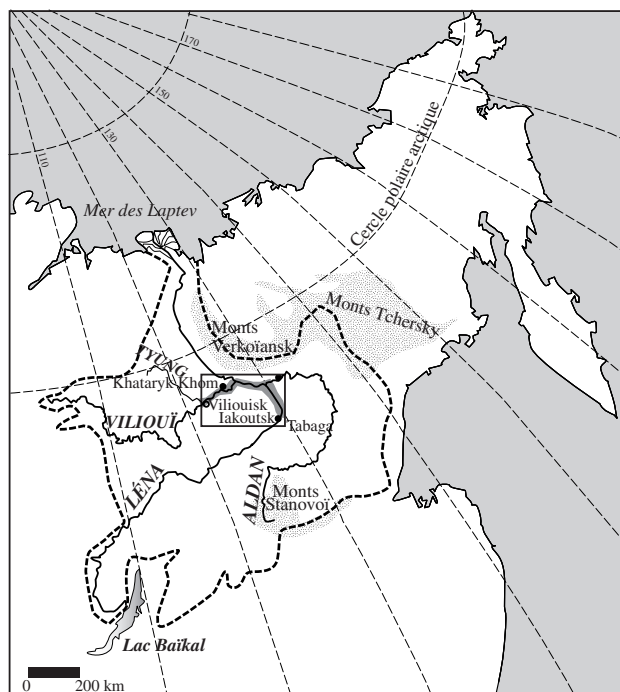
nous permet pas d'évaluer les processus et la vitesse d'évolution des formes fluviales, ce qui nous a conduit à fonder cette première approche sur une identification des différents processus de transfert — dépôt des particules solides pour chacune des unités fluviales fonctionnelles composant le cours d'eau (chenaux principaux et bras anastomosés, berges, et parties stabilisées des îles et de la plaine). L'objectif est donc dans un premier temps d'identifier indirectement par ce biais les mécanismes hydrodynamiques à l'origine de la mise en place de structures sédimentaires spécifiques. Cette démarche permet dans un second temps d'apporter des éléments d'explication du fonctionnement des deux types de chenaux — les chenaux principaux et les bras anastomosés — et d'évaluer dans une certaine mesure leur stabilité en se fondant sur les structures sédimentaires révélatrices de la mobilité des chenaux

Enfin, cette approche fondée sur le fonctionnement sédimentaire examine le rôle joué par le retrait des berges. Concernant les cours d'eau à régime de débâcle inscrits en milieu pergelé, la littérature scientifique a en effet décrit des processus d'érosion thermique efficaces entraînant des vitesses de recul des berges particulièrement élevées (Walker et Arnborg, 1963 ; Jahn, 1975 ; Are, 1983 ; Walker, 1983), même si le retrait des berges fluviales est en moyenne moins prononcé que celui observé sur les côtes. L'objectif est donc d'apporter les premiers éléments d'explication, d'une part, de l'impact du recul des berges sur le fonctionnement sédimentaire du fleuve et, d'autre part, des modes de transferts sédimentaires entre la plaine et les chenaux actifs.

DYNAMIQUE ET FORMES FLUVIALES DES COURS D'EAU DE SIBÉRIE CENTRALE

UNE HYDROLOGIE COMMANDÉE PAR LES DÉBÂCLES

La Léna en Sibérie centrale (fig. 1) traverse l'une des régions les plus froides du globe. La lakoutie détient en effet l'un des records de froid ($-72\text{ }^{\circ}\text{C}$ au sol) et d'épaisseur du pergélisol (1 500 m à Oimaïkon, Anisimova *et al.*, 1973). Des précipitations très faibles (190 mm par an, en juillet essentiellement), une évaporation et une sublimation intenses signent un climat particulièrement sec (Katasonov et Soloviev, 1969). Les données hydrologiques présentées dans cette étude sont issues des relevés du Service de la navigation à lakoutsk (station de jaugeage de Tabaga, près de lakoutsk, fig. 1) ; elles permettent de compléter des traits hydrologiques déjà connus et de retrouver des caractères communs à l'ensemble des cours d'eau à débâcle en milieu périglaciaire (Kolupaïla et Pardé, 1933 ; Arnborg *et al.*, 1966 ; Cook, 1967 ; Pissart, 1967 ; Tchalov *et al.*, 1976 ; Guilcher, 1979 ; Gautier et Costard, 1997). Grâce à son bassin versant immense (2,49 millions de km^2), la Léna apporte annuellement à la mer des Laptev 525 km^3 d'eau répartis très inégalement au cours de l'année (Antonov, 1960 ; Gordeev et Sidorov, 1993). Les basses eaux hivernales sont très creusées : sous une carapace de glace épaisse de 2 m en moyenne, le débit du fleuve est alors extrêmement indigent (moins de $1\,500\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ à la station de Tabaga, tabl. I,






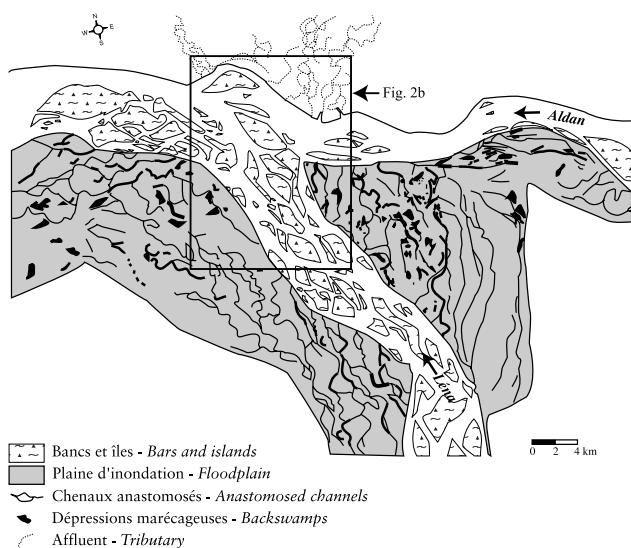
-  Bassin de la Léna - *Lena basin*
-  Station de jaugeage - *Gauging site*
-  Secteur d'étude - *Studied reach*

FIGURE 1. Carte de localisation du secteur étudié dans le bassin de la Léna.

Location of the reach studied in the Lena basin.



(Sources : Image Landsat, cartes du Service de la Navigation de Yakoutsk et relevés de terrain - Landsat images, Yakutsk Navigation Survey maps and field survey)

FIGURE 2a. La plaine d'inondation de la Léna à la confluence de l'Aldan.

The Lena River floodplain at the Aldan River junction.

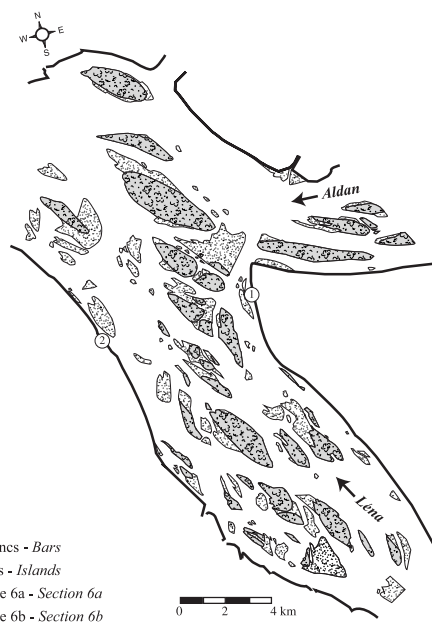


FIGURE 2b. Formes fluviales de la Léna à la confluence de l'Aldan après la crue de juin 1996.

Fluvial forms of the Lena River at the Aldan River junction after the flood of June 1996.

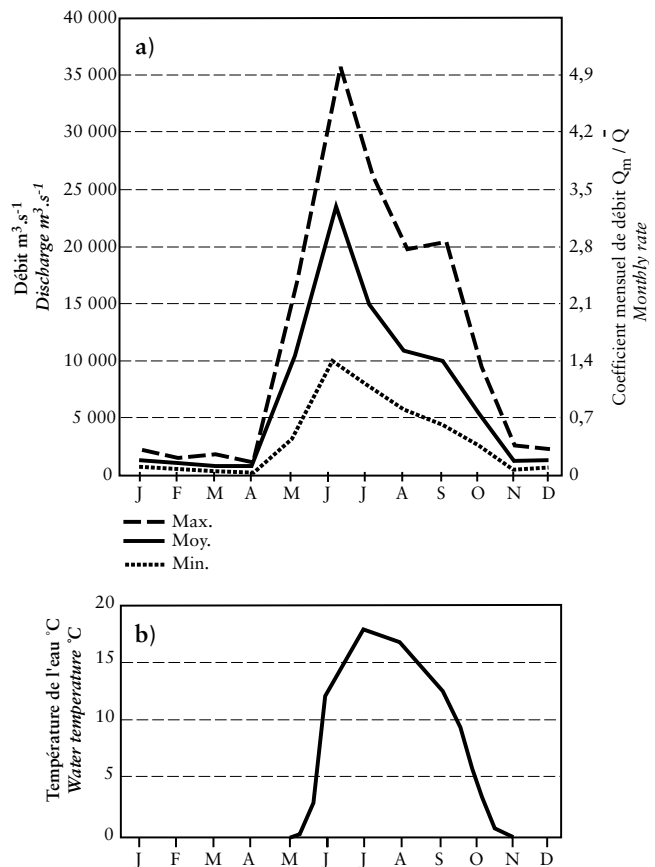
TABLEAU I

Données hydrologiques de la Léna, de l'Aldan et de la Vilioui (d'après les données du Service de la navigation de Yakoutsk)

	Léna à Tabaga (1927 - 1980) 1 527 km de la mer des Laptev - Bassin versant : 897 000 km ²	Aldan (1942 - 1980) 151 km de la confluence de la Léna - Bassin versant : 696 000 km ²	Vilioui (1959 - 1980) 122 km de la confluence de la Léna - Bassin versant : 452 000 km ²
1. Débits moyens mensuels (m³.s⁻¹)			
Janvier	1 510	443	332
Février	1 120	309	336
Mars	920	253	316
Avril	870	253	273
Mai	10 800	9 300	1 990
Juin	23 700	19 500	5 200
Juillet	15 100	10 400	3 480
Août	11 000	8 920	1 890
Septembre	10 300	7 630	960
Octobre	5 840	3 500	852
Novembre	1 530	899	358
Décembre	1 690	722	355
2. Module (m³.s⁻¹)			
	7 070	5 190	1 360
3. Maximum journalier (m³.s⁻¹)			
	47 800 le 24/05/66	47 900 le 17/05/62	11 200 les 8 et 9/06/78
4. Débit spécifique (l.s⁻¹.km⁻²)			
	7,88	7,46	2,99

fig. 3a) et atteint un étiage de $870 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à la fin de la saison froide. Au printemps, la température des eaux croît rapidement pour atteindre 17°C à 18°C en juillet et en août (fig. 3b). La débâcle se manifeste en lakoutie au cours de la seconde quinzaine du mois de mai et en quelques jours, le volume d'eau écoulé croît de 20 à 45 fois. La pointe de crue atteint en moyenne $24\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, mais peut s'élever à $50\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($47\,800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ le 24 mai 1966 à Tabaga, par exemple). La ligne d'eau s'élève alors à lakoutsk de 8 à 10 m par rapport au niveau des basses eaux hivernales. Vers l'aval, le débit est quasiment doublé grâce aux apports de l'Aldan (tabl. I) : lors des grandes crues, la Léna envahit la plaine sur une largeur de 25 km (fig. 2a). La débâcle, commandée par le tracé méridien du fleuve, montre un décalage de 30 à 50 jours entre l'amont et l'aval du bassin (Costard, 1994). Dans la moyenne vallée du Yenisseï, Yamskikh *et al.* (1999) ont observé que la rupture de la glace du fleuve précède de 20 à 25 jours l'augmentation des températures atmosphériques. La Vilioui, affluent de rive gauche de la Léna également évoqué dans ce travail (fig. 1, tabl. I), connaît une débâcle plus rapide grâce à l'orientation ouest-est de son tracé. En Sibérie centrale, la crue annuelle dure en moyenne six semaines ; dès le milieu du mois de juillet, le niveau baisse très rapidement laissant affleurer de vastes zones de dépôts sableux. Cependant, en fin d'été, des pluies d'orages viennent atténuer quelque peu l'affaiblissement du débit (fig. 3a).

D'après le service de la Navigation, la Léna à Tabaga transporte annuellement 8 millions de tonnes de sédiments en suspension ; cette valeur est proche de celle donnée par Antonov (1960) : 7 millions de tonnes (soit un taux de dégradation qui atteint respectivement $8,92 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$ et $7,8 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$). Lopatin (1952) et Lvovitch (1971) proposent respectivement des apports de 11,7 et 15,4 millions de tonnes pour la basse Léna (soit un taux de $4,7 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$ ou de $6,18 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$). Selon Gordeev et Sidorov (1993), la mer des Laptev reçoit par an 17,6 millions de tonnes d'éléments en suspension grâce à la Léna ($7,1 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$). D'après les données du Service de la navigation à lakoutsk, les trois quarts des transports en suspension seraient effectués au moment des crues. Cette charge fine (limons et sables fins) se dépose préférentiellement dans les îles et dans la plaine. Les transports de fond ne sont pas estimés. Les dragages rudimentaires effectués lors de notre mission sur le terrain ont révélé un matériel grossier (galets bien roulés) déposé dans le fond des chenaux, qui n'apparaît nulle part à la surface des bancs ou dans les berges. Seul l'Aldan à l'amont immédiat de la confluence avec la Léna montre des galets (la médiane, ou D_{50} , mesurée par nos soins en cet endroit précis est de 130 mm) organisés en petits bourrelets alignés dans le sens du courant et séparés par des sillons de 10 à 20 cm de profondeur. Cette organisation des galets est probablement liée au raclage exercé par les radeaux de glace au moment de la débâcle. Les bancs sont composés essentiellement de sables moyens, bien triés. La granulométrie mesurée en de nombreux endroits, montre un matériel homométrique (la médiane des prélèvements variant entre 200 et $300 \mu\text{m}$ sur les bancs) très semblable sur la Léna, l'Aldan et la Vilioui.



(D'après les données du Service de Navigation à lakoutsk -
From the Navigation Survey, Yakutsk)

FIGURE 3. a) Régime hydrologique de la Léna en Sibérie centrale (station de Tabaga, 1927-1980). b) Températures moyennes de l'eau de la Léna à Tabaga (1950-1980).

a) Water mean temperatures in the Lena River at Tabaga (1950-1980).
b) Discharge of the Lena River in Central Siberia (Tabaga gauging site, 1927-1980).

La géochimie du fleuve est bien connue grâce aux mesures effectuées par les Russes depuis 1935 et grâce à d'importants programmes internationaux (Gordeev et Sidorov, 1993 ; Létolle *et al.*, 1993 ; Martin *et al.*, 1993 ; Huh *et al.*, 1998a, 1998b, 1999 ; Kattner *et al.*, 1999). La Léna apporte annuellement à la mer des Laptev 49,2 millions de tonnes de substances dissoutes (soit un taux de dénudation chimique de $19,76 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$) avec, naturellement, des concentrations inversement proportionnelles au débit : 60 à $70 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ en juin - juillet et plus de $300 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ en mars - avril (Gordeev et Sidorov, 1993).

LES FORMES FLUVIALES

La Léna et ses affluents de Sibérie centrale semblent rassembler un certain nombre de caractères propres aux rivières anastomosées (tabl. II).

La pente de la Léna et de ses deux affluents (Aldan, Vilioui) est particulièrement faible ($0,0001$), ce qui leur

TABLEAU II

Comparaison des caractères géomorphologiques et sédimentaires de la Léna en Sibérie centrale avec les rivières d'Australie centrale (Gibling *et al.*, 1998), la basse vallée de la Saskatchewan et la haute vallée de la Columbia (Smith, 1983)

	Climat chaud et sec		Climat froid (sans pergélisol)	
	Rivières du bassin du lac Eyre (Australie centrale)	Basse Saskatchewan (Cumberland Marshes)	Columbia supérieur (Radium - Golden)	Léna moyenne (Sibérie centrale)
1. Profil en long	Faible (< 0,0002)	Faible (0,00012)	Faible (0,00009)	Faible (0,0001)
2. Sinuosité	Faible	Moyenne (1,4)	Faible (1,16)	Faible 1,1)
3. Bande de méandrage	Locale	Confinée	Absente	Absente
4. Variations de débit	Très fortes	Fortes	Fortes	Très fortes
5. Stabilité des chenaux	Forte	Forte	Forte	Forte
6. Avulsions	-	Peu nombreuses	Communes	Peu nombreuses
7. Chenaux abandonnés	Absents	Communs	Communs	Communs
8. Sédiments des chenaux	Agrégats de fines & sables	Sable & gravier	Sable & gravier	Sable moyen
9. Sédiments de plaine et sols	Dépôts fins & vertisols	Dépôts fins, organ., tourbe	Dépôts fins, organ., tourbes	Sables, fines, organ., podzols
10. Dépôts entre chenaux actifs et plaine				
10a. Levées	Petites	Importantes	Importantes	Absentes
10b. Dépôts de brèches	Peu nombreux	Peu nombreux	Communs	Absent
10c. Dépôts de rupture d'embâcle	Absent	Absent	Absent	Communs
11. Taux de sédimentation	Faible (4 cm . 100 an ⁻¹)	Moyen (5 - 30 cm . 100 an ⁻¹)	Élevé (30 - 100 cm . 100 an ⁻¹)	?
12. Lacs	Communs	Communs	Communs	Communs
13. Végétation	Dense localement	Dense	Dense	Dense
14. Formes associées	Dunes éoliennes	Cônes alluviaux	-	Dunes éoliennes

confère une puissance spécifique modeste (inférieure à 10 W.m²).

La Léna en Sibérie centrale est composée d'un lit mineur large en moyenne de 5 à 7 km, formé de bras multiples (entre 5 et 10 bras, appelés « chenaux principaux » dans cette étude) (fig. 2b, fig. 4). Ces bras sont rectilignes et peu profonds (10 à 15 m au maximum au moment des crues), mais des zones plus profondes (plus de 20 m) sont apparues très ponctuellement grâce aux sondages acoustiques. La largeur des chenaux varie entre plusieurs centaines de mètres et trois kilomètres. Ces bras multiples enserment de grandes îles (fig. 2b, fig. 4) longues de 1 à 5 km et de grands bancs sableux. Aux chenaux principaux, il faut ajouter de nombreux bras anastomosés plus étroits que les précédents (quelques dizaines de mètres de large), souvent sinueux, qui parcourent les îles et la plaine (fig. 2a). Un certain nombre d'entre eux n'est pas directement connecté avec un chenal principal, ou bien encore disparaît progressivement vers l'aval. C'est par ces chenaux anastomosés que les crues pénètrent dans les îles et la plaine.

Le lit mineur est bordé par une plaine d'inondation très étendue, essentiellement développée en rive gauche de la Léna sur le secteur allant de Iakoutsk à la confluence de la Vilioui. La largeur de cette plaine est d'une quinzaine de kilomètres (fig. 2a) ; on passe progressivement vers l'ouest au bas plateau parsemé de dépressions thermokarstiques et de

lacs en ourson. Cette plaine riche en marécages et en lacs est traversée par les chenaux anastomosés précédemment décrits, mais aussi par des bras morts couverts d'une végétation dense. Les îles et la plaine présentent plusieurs niveaux : le niveau inférieur, légèrement plus haut que le sommet des bancs présents dans les bras principaux, est submergé chaque année. La végétation y est dominée par les bouleaux (*Betula pendula*) et les saules (*Salix nana*) ; c'est sur ce niveau inférieur que sont localisés les chenaux anastomosés. Un niveau médian, inondé tous les 2 ou 3 ans (A. Alabyan, Université de Moscou, communication personnelle), domine de 5 à 6 m la partie basse des îles. Enfin, le niveau supérieur surplombe le premier niveau de 8 à 10 m ; les crues l'atteignent tous les 10 ans en moyenne. Il est intéressant de savoir que Yamskikh *et al.* (1999) décrivent le même dispositif dans la vallée du Yenisseï : la plaine alluviale historique est constituée également de plusieurs niveaux de « terrasses » qui correspondent à différentes puissances de crues¹. En ce qui concerne la Léna, les deux niveaux supérieurs sont parsemés d'anciens chenaux dont les parties les plus profondes forment des dépressions marécageuses et lacustres. La végétation y est dense, on y remarque essentiellement de l'épicéa (*Picea obovata*), des

1. « Modern floodplain formation is the result of simultaneous alluvial accumulation on geomorphological surfaces of different heights over the last 400-500 years » (Yamskikh *et al.*, 1999, p. 247).

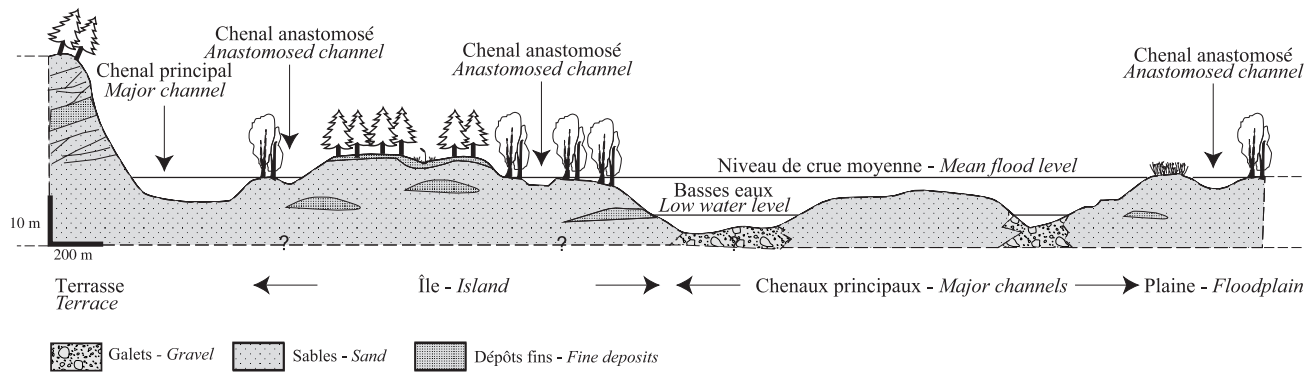


FIGURE 4. Coupe transversale schématique de la plaine de la Léna. *Schematic cross section of the Lena River floodplain.*

pins (*Pinus sosna*) sur les couches actives et les sols les plus épais ainsi que des mélèzes (*Larix dahurica*) sur les sols moins épais.

Localement, le fleuve vient éroder le pied du niveau de terrasse principal (terrasse de « Bestyakhskaya ») haut d'une trentaine de mètres ; cette formation, constituée majoritairement de dépôts éoliens, est riche en couches massives de glace.

La Léna, l'Aldan et la Vilioui présentent une profonde similitude de formes fluviales, bien que la Vilioui soit de plus petite taille. On note sur cette rivière quelques passages plus méandriformes (en particulier à la hauteur de Viliouisk, fig. 1), de même que sur la Tyung (affluent de rive gauche de la Vilioui). Cependant, les plaines associées à ces secteurs à méandres possèdent également des chenaux anastomosés.

LES ENSEIGNEMENTS APPORTÉS PAR L'ÉTUDE DES SÉQUENCES SÉDIMENTAIRES DES CHENAUX ET DES BERGES DE LA LÉNA MOYENNE

MÉTHODOLOGIE

Les observations ont été faites immédiatement après la pointe de la crue annuelle, qui a correspondu à une crue moyenne (environ $20\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ à Tabaga). L'attention s'est portée sur les dépôts observés dans des formes mobiles (les bancs construits dans les chenaux principaux et dans les bras anastomosés), ainsi que dans les parties basses des îles annuellement submergées où des coupes avaient été dégagées par érosion des berges sur une hauteur de plusieurs mètres. Au sein des berges, deux types principaux de formations ont pu être observés : certains secteurs sont constitués de remblaiement sableux massifs (d'origine éolienne ou fluviale) ; d'autres, plus contrastés, montrent une alternance de dépôts sableux — souvent marqués par des stratifications obliques — et des dépôts limoneux ou argileux. Les coupes présentées dans cette étude ont été choisies dans ce dernier groupe, plus riche d'informations morphosédimentaires.

Les relevés stratigraphiques effectués ont été complétés par la suite en laboratoire par des analyses granulométriques

des différents niveaux. Afin de déterminer précisément les différents modes de dépôt des particules solides, la méthode de Passega (1957, 1963, 1964, 1977) a été appliquée. Cette méthode, utilisant deux paramètres texturaux du sédiment (M , la médiane ou D_{50} et C , le percentile le plus grossier, ou D_{99}), permet de mieux mettre en évidence les conditions de transport-dépôt des particules solides et d'établir une typologie génétique des différentes unités de la plaine et de la bande active.

La géométrie des remblaiements a été précisément relevée : épaisseur des lits, pendage, nature des contacts entre les différents niveaux, présence ou non de stratifications obliques, extension et évolution latérales des différentes strates. Parallèlement, sur les coupes dégagées, on a retenu la classification de Friend (1983) fondée sur l'analyse de l'architecture en deux ou en trois dimensions des corps sédimentaires, afin d'évaluer l'immobilité ou au contraire l'instabilité des chenaux. Ainsi, Friend distingue deux grands types de forme des remblaiements : les *ribbons bodies* qui traduiraient la présence d'un chenal fixe, tandis que les *sheet bodies* seraient mis en place par des bras migrant latéralement rapidement. Les coupes nous permettent donc une analyse en deux dimensions des corps sédimentaires.

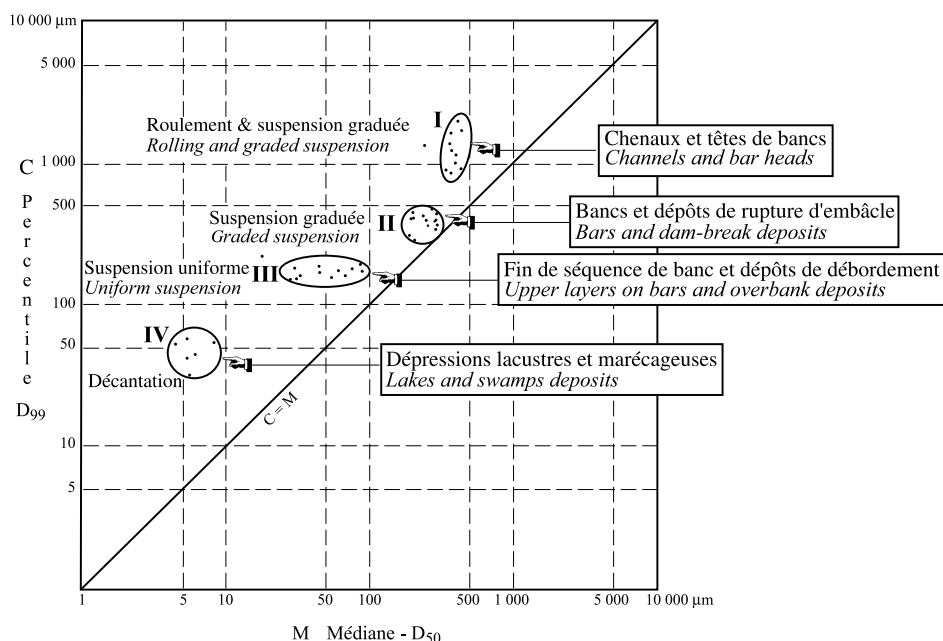
Enfin, l'épaisseur de la couche active a été relevée latéralement dans les berges et verticalement grâce aux sondages électro-magnétiques.

LES SÉQUENCES SÉDIMENTAIRES DES CHENAUX ACTIFS

Dans les chenaux principaux, les bancs sont constitués de matériel sableux disposés en lits horizontaux d'une dizaine de centimètres d'épaisseur ; le matériel très homogène (la médiane $M = 200\text{-}300\ \mu\text{m}$, fig. 5) est très semblable sur les trois cours d'eau. Sur l'image CM (fig. 5, groupe II), ces sables moyens semblent avoir été déplacés par suspension graduée (ou saltation) ; de plus, médiane et percentile sont très proches, ce qui signe un bon tri des particules. Ces lits sableux sont légèrement plus grossiers et moins bien triés en tête de banc ($M = 360\ \mu\text{m}$) et ont été probablement déplacés à la fois par roulement et saltation (fig. 5, groupe I). Lorsque le banc connaît une amorce de

FIGURE 5. Construction de l'image CM des dépôts fluviaux de la Léna, de l'Aldan et de la Vilioui (d'après Passega, 1957).

CM diagram of the fluvial deposits of the Lena, Aldan and Vilioui rivers (adapted from Passega, 1957).



colonisation végétale par de jeunes saules, les dépôts sont plus épais (jusqu'à 30 cm). Au creux de l'étiage, une étude des bancs en coupe a été réalisée et ces lits sub-horizontaux ont pu être observés sur une épaisseur dépassant deux mètres.

Dans les chenaux anastomosés, on note une différence : si les sables présentent la même granulométrie que précédemment, les lits sont plus épais (30-35 cm) et recouverts de fines couches (2 à 4 cm) de sables fins et limons. D'après l'interprétation de l'image CM, les niveaux de sables fins et limons (M variant entre 30 et 100 μm , groupe III, fig. 5) ont été apparemment mis en mouvement par suspension uniforme. Immédiatement après le passage de la crue annuelle, ces particules fines sont très visibles, mais quelques jours, voire deux à trois semaines après la baisse du niveau de l'eau, très rapide, la surface des bancs perd une partie de ces éléments les plus fins, du fait de la déflation éolienne particulièrement active sous ces latitudes.

Une première interprétation peut être avancée : les 10 à 30 cm de sables moyens semblent représenter l'épaisseur de sédiments remobilisés dans les chenaux lors de la crue annuelle. Le dépôt semble généralement plus épais dans les bras anastomosés où la séquence se termine par l'abandon des particules les plus fines au moment de la décrue. Ce premier niveau d'analyse des formes actives est riche d'informations pour la compréhension des séquences sédimentaires complexes des îles et de la plaine.

LES SÉQUENCES SÉDIMENTAIRES DU PREMIER NIVEAU DES ÎLES ET DE LA PLAINE

L'érosion thermique active exercée à l'encontre de certaines berges, ainsi que l'abaissement rapide du niveau de l'eau offrent la possibilité d'étudier de nombreuses coupes dans le plus bas niveau des îles et de la plaine. Les trois coupes présentées dans cette étude (fig. 6a, 6b et 6c) sont

situées au contact d'un chenal actif et de la plaine ou d'une île ; elles appartiennent donc à des unités submergées chaque année, mais stabilisées par la présence d'un couvert végétal. Ces coupes possèdent un certain nombre de traits sédimentaires en commun : on y retrouve à la base des lits horizontaux de sables moyens bien triés surmontés de niveaux limoneux et de sables montrant des stratifications obliques très marquées.

Description des coupes

Le site de la figure 6a est en rive droite de la Léna, en amont immédiat de la confluence de l'Aldan (fig. 2b), révèle à la base (niveau 1) 2 m de sables organisés en lits horizontaux, épais de 10 cm recouverts par 2 ou 3 cm de limons : la position des échantillons sur l'image CM montre une profonde ressemblance entre ces sables et les prélèvements effectués dans les bancs mobiles ; ils ont en effet été mis en mouvement par saltation (groupe II sur l'image CM, fig. 5). Ces niveaux sableux sont surmontés par des limons (niveau 2, fig. 6) et des passées de sables fins (la valeur de M est respectivement de 29 et 80 μm , groupe III, fig. 5), caractéristiques de dépôts de débordement. Le mètre supérieur (niveau 3, fig. 6) est composé de sables moyens, bien triés ; ils sont donc très proches des strates basales (groupe II, fig. 5), mais disposés en stratifications entrecroisées. Ce niveau 3, qui s'étend latéralement sur environ 25 m, s'amincit sur ses bordures où son épaisseur n'est plus que 20-30 cm. La partie superficielle montre une évolution pédogénétique (sol de type podzolitique).

La figure 6b représente une coupe en rive gauche de la Léna, en face (mais à 8 km !) de la précédente (localisation sur la fig. 2b). À la base (niveau 1), sur 2,5 m on peut voir des couches de sables moyens déplacés par saltation (groupe II, fig. 5) alternant avec des lits plus grossiers montrant un mélange entre roulement et saltation (groupe I,

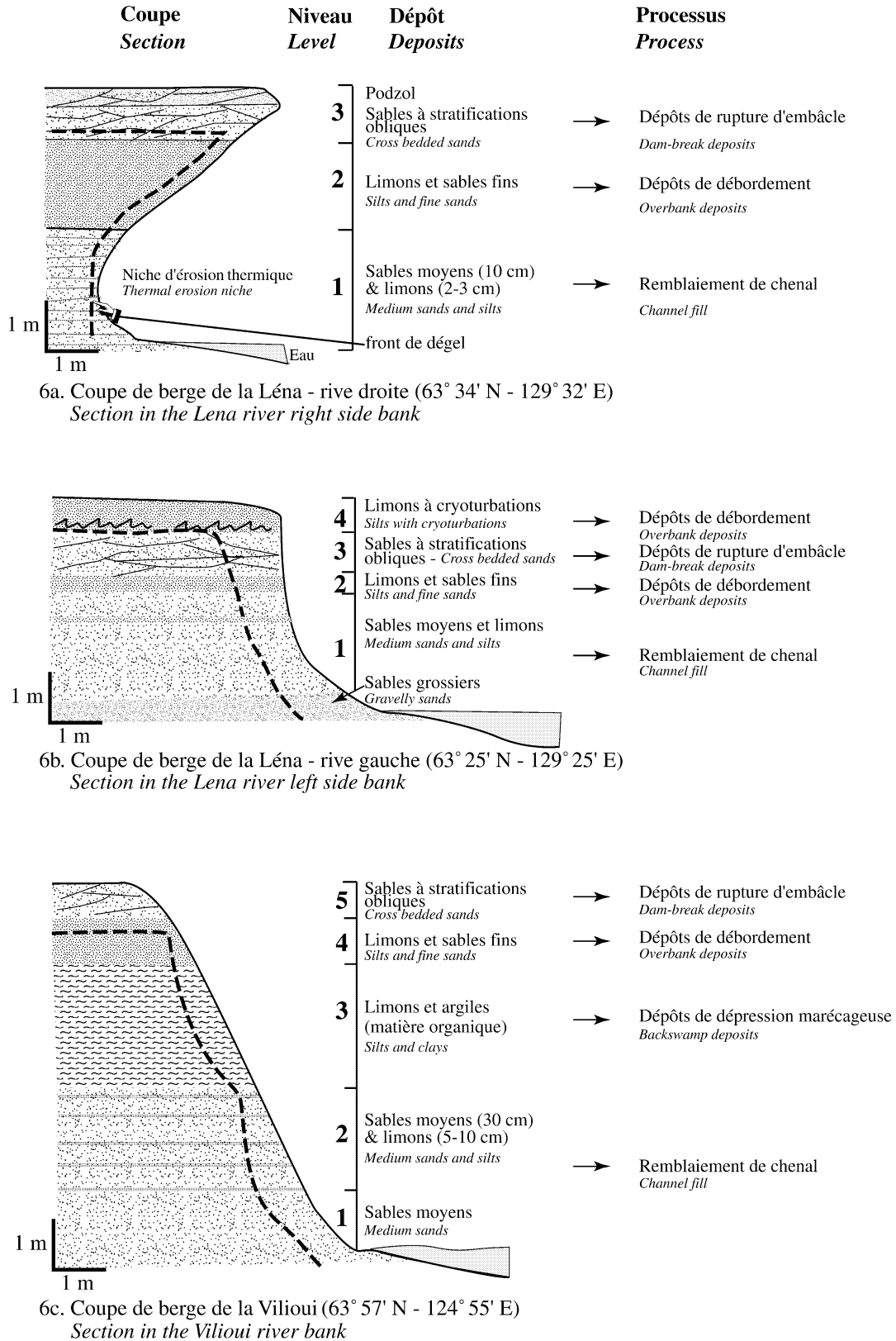


FIGURE 6. Séquences sédimentaires de la Léna et de la Vilioui. *Sediment sequences in the Lena and the Vilioui rivers.*

fig. 5) et vers le haut du niveau a été mis en place un dépôt limoneux peu épais (15 cm). Au-dessus (niveau 2), l'épaisseur des lits sableux décroît, tandis que se développent des limons de débordement (dont la valeur de M est de $30 \mu\text{m}$, groupe III, fig. 5). Dans le niveau 3, se distingue bien un niveau sableux à stratifications obliques (groupe II, fig. 5) ; ce dépôt, qui s'étend latéralement sur 16 m, voit son épaisseur diminuer vers ses extrémités. Les 70 cm supérieurs (niveau 4) sont des limons à figures de cryoturbation.

Enfin, la coupe de la figure 6c relevée sur la Vilioui est plus haute et un peu plus complexe. À la base (niveau 1), on trouve un remblaiement d'un mètre de sables montrant un mélange entre roulement et suspension graduée ($M = 350 \mu\text{m}$, groupe I, fig. 5). Au-dessus (niveau 2), deux mètres sont organisés en lits sableux de 30 cm d'épaisseur (transport-dépôt par saltation, groupe II, fig. 5), ils présentent les mêmes caractères texturaux que les sables sous-jacents, mais sont régulièrement entrecoupés par 5 à 10 cm de limons et sables fins (liés à la suspension uniforme, groupe III, fig. 5). Ces dépôts sont tout à fait comparables à ceux présents dans un chenal secondaire très proche. Suit une épaisseur de 2,5 m de limons et d'argiles noires riches en matière organique probablement déposés par décantation dans une dépression marécageuse (groupe IV, fig. 5). Cette strate est surmontée de nouveau par des limons à passées de sables fins (niveau 4) qui attestent de la reprise de débordements (groupe III, fig. 5). Enfin, sur les 70 cm supérieurs, la coupe montre des sables moyens et fins à minces niveaux de limons, marqués par des stratifications obliques très prononcées (niveau 5).

ÉLÉMENTS D'INTERPRÉTATION DU FONCTIONNEMENT DES DIFFÉRENTES UNITÉS DE LA MOSAÏQUE FLUVIALE

Les processus de remblaiement des chenaux

Dans les bras principaux, l'épaisseur de sédiments mobilisée et redéposée au moment de la crue observée, qui a été d'une intensité moyenne, est plus faible que dans les branches anastomosées qui traversent les îles et la plaine (une dizaine de centimètres dans le premier cas contre une trentaine dans le second). Les bras anastomosés constituent de véritables pièges à sédiments du fait du fonctionnement hydrologique des cours d'eau à régime de débâcle : l'écoulement ne s'y produit qu'au moment des débits les plus importants (de fin mai à fin juin) et dès lors que la décrue s'amorce, les chenaux se vidangent rapidement, le matériel solide étant alors abandonné. Les sables déplacés lors de la pointe de crue sont recouverts par les particules fines au moment où les bras anastomosés se déconnectent des chenaux principaux. Les bancs des bras principaux sont aussi rapidement exondés et les chenaux d'étiage conservent un écoulement pérenne, ce qui assure un meilleur transfert des particules fines.

L'épaisseur remobilisée et redéposée semble importante ; il faut cependant souligner le fait que ces valeurs ont été mesurées dans les chenaux à la suite d'une crue d'une intensité moyenne. La répétition des mesures à l'échelle pluri-annuelle à la suite de crues d'intensités variables

apporteraient des estimations d'un tout autre ordre. Par ailleurs, il est difficile de comparer ces données avec celles d'études concernant d'autres systèmes anastomosés qui portent sur une estimation des taux de sédimentation à l'échelle de l'ensemble de la plaine et sur un pas de temps long (en particulier, Smith, 1986).

Sur les coupes, on a vu que la base des séquences sédimentaires étudiées (fig. 6, niveaux 1) est formée de sables dont les caractères texturaux sont très proches de ceux identifiés sur les bancs actifs. De plus, ils sont également organisés en lits sub-horizontaux. Les strates sont superposées, sans figure apparente d'érosion entre elles. Les lits sableux sont scellés par les limons. Il pourrait donc s'agir de remblaiements de chenaux mis en mouvement essentiellement par suspension graduée au moment de la pointe de la crue. Les particules plus fines signeraient la fin de crue dans les chenaux anastomosés, qui se « vidangent » rapidement après la pointe de débit et piègent par là les particules fines.

Les épaisseurs déposées, la géométrie des lits et la répétition des séquences sables-limons pourraient en particulier être les signes d'une faible mobilité latérale des chenaux. Cependant, l'hypothèse de la stabilité latérale ne pourrait être vérifiée qu'au moyen d'un suivi diachronique de l'évolution des mésoformes. Par ailleurs, les dépôts présentent une structure proche de celle définie par Friend (1983) en *ribbon body*, ce qui renforce l'hypothèse de l'absence d'une migration latérale du chenal. Enfin, on pourrait interpréter les limons et sables fins présents sur les niveaux 2 des coupes 6a et 6b comme le signe de la fermeture du chenal et de la substitution de la sédimentation sableuse par des dépôts de débordement.

Les dépôts associés aux ruptures d'embâcles

Les sables à stratifications obliques (niveaux 3 des coupes 6a et 6b et niveau 5 de la coupe 6c) sont d'un grand intérêt. D'un point de vue textural, ils présentent les mêmes caractères que les dépôts des chenaux ; le mode de transport-dépôt des particules y est le même. Ils sont à peine emboîtés dans le niveau sous-jacent. Latéralement, le dépôt s'amincit. Cependant plusieurs éléments les différencient des remblaiements mis en place dans les chenaux : leur présence dans la partie haute des berges, leur faible épaisseur, l'absence de répétition sable-limon, leur extension spatiale limitée et, surtout, la présence de stratifications obliques. On peut tenter de mettre en relation l'ensemble de ces caractères avec le fonctionnement original du fleuve pour comprendre la genèse de ces dépôts. En effet au début de la débâcle, le fleuve charrie de grandes quantités de radeaux de glace et de troncs d'arbres qui, en s'amoncelant, créent localement des embâcles. L'accumulation des débris provoque une élévation éphémère de la ligne d'eau, le barrage venant à céder rapidement sous la pression. Ce mécanisme entraîne le « déroutage » de l'eau du chenal vers la plaine ou à l'intérieur d'une île, créant ainsi une amorce de chenal. Dans l'amorce de chenal ainsi formée, se déposent des sédiments semblables à ceux du bras actif voisin. La présence de stratifications obliques marquées signe la progression latérale de la langue de sables auxquels se mêle

une petite quantité de limons (niveau 5 de la coupe 6c de la Vilioui). Il s'agit en quelque sorte de la première étape du mécanisme d'avulsion et ce processus semble donc être commun sur la Léna et ses affluents. Forbes (1983) décrit des processus d'avulsion semblables sur la rivière Babbage (Yukon) où se forment également des barrages de glace ; dans un autre contexte climatique, les accumulations de débris ligneux ont les mêmes effets (Harwood et Brown, 1993). Cependant, l'avulsion peut être stoppée à son stade initial : les dépôts de rupture d'embâcle sont alors scellés par des limons de débordement (niveau 4 de la fig. 6b) ou bien encore, stabilisés par la végétation, le dépôt subit une pédogénèse (partie superficielle de la coupe 6a).

Le fonctionnement hydrodynamique des cours d'eau sibériens est probablement à l'origine de la fréquence de ce processus. La formation éphémère et la rupture des barrages favorisent la première étape du mécanisme d'avulsion et la mise en place de faciès sédimentaires spécifiques. Seule l'augmentation soudaine de l'énergie de l'eau au moment de la rupture de l'embâcle permet d'expliquer la présence de ces sables dans la partie haute des berges. Cependant, la brièveté de ce phénomène particulier et des débits morphogènes, en général, font que l'amorce de chenal ne se prolonge que rarement vers l'aval. D'une façon générale, il semble que l'on puisse ajouter aux facteurs de l'anastomose les forts écarts de débits et la brièveté des écoulements morphogènes (tabl. II). De plus, du fait d'un profil en long très doux, l'énergie hydraulique est très limitée. On comprend donc pourquoi le mécanisme d'avulsion est fréquemment bloqué à son stade initial. Trois caractères remarquables sur les coupes révèlent l'aspect éphémère de ce mécanisme et l'inefficacité des écoulements : la faible épaisseur déposée, l'enfouissement de ces dépôts sous des limons de débordement et sous la végétation et enfin, l'absence de trace d'érosion entre le dépôt et la formation sous-jacente. On peut avancer une dernière hypothèse pour expliquer l'absence de structure d'érosion entre les sables à stratifications obliques et les formations sous-jacentes : en Sibérie centrale, l'arrivée de la lame d'eau « chaude » précède le réchauffement atmosphérique et on peut alors supposer que les ruptures d'embâcle et leurs dépôts associés se produisent sur un sol encore gelé. Cela signifierait que ce processus se réalise sur un pas de temps très court au tout début de la crue.

Les dépôts de rupture d'embâcle peuvent être dans une certaine mesure comparés à ceux des *crevasse splays*, l'un des éléments caractéristiques des mécanismes sédimentaires des rivières anastomosées. Décrit par Smith (1983, 1986), Smith et Smith (1980) et par Miall (1996), en particulier, le mécanisme de « crevasse » est l'ouverture d'une brèche dans une levée naturelle, qui crée une amorce de chenal dans laquelle se déposent des sédiments proches de ceux du chenal (cette similitude est soulignée par Smith [1983] sur la Magdalena). Les chenaux anastomosés sont fréquemment bordés d'épais bourrelets de berges : les levées forment des rides alluviales hautes par exemple de 2,5 m sur la Columbia et de 4 m sur la Saskatchewan (Smith, 1983). Dans le cas des rivières australiennes, les

levées sont plus modestes (Gibling *et al.*, 1998). Ce type de formation ne semble pas se développer sur la Léna et ses affluents en Sibérie centrale ; on ne retrouve en effet ni la morphologie ni les dépôts caractéristiques des levées. Si l'on retient l'explication de Smith (1986), selon laquelle l'importance des levées est fonction de la durée de submersion du chenal, on peut émettre certaines hypothèses sur l'absence de ces levées dans le cas des hydrosystèmes sibériens. D'une part, la crue est trop brève pour favoriser ce type d'accumulation ; d'autre part, les radeaux de glace mêlés à de nombreux troncs d'arbres exercent au cours de la débâcle un véritable « labourage » des berges. On peut alors supposer que des rides alluviales composées de sables et de limons ne résisteraient pas.

De cette analyse il ressort que le mécanisme d'avulsion complète, aboutissant à un véritable changement de tracé du chenal, semble peu fréquent. Enfin, plusieurs indices indirects viennent étayer ce constat. La présence d'îles boisées est le signe d'une stabilité des formes fluviales à l'échelle historique. Par ailleurs, le Service de la navigation de Iakoutsk n'évoque pas de changement rapide du tracé des chenaux principaux (utilisés pour la navigation) ; cet organisme est dans l'obligation d'approfondir par curage l'un des chenaux principaux pour assurer un tirant d'eau suffisant aux bateaux qui doivent, durant le court été, évacuer vers la mer des Laptev les ressources dont regorge le sous-sol sibérien.

Les unités stabilisées : la plaine et les îles

La plaine et les îles sont jalonnées de bras dont le nombre décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne vers l'intérieur, d'amorce de chenaux sans exutoire, d'anciens chenaux enfouis sous la végétation et de dépressions occupées par des marécages ou des lacs. On ne dispose que peu d'informations sur la sédimentation pour deux raisons : la grande difficulté de circulation dans la ripisylve très dense et la présence du pergélisol à 90 cm de profondeur en été (valeur moyenne sous couvert arboré évaluée par sondage électro-magnétique). Les prélèvements effectués dans la couche active ont montré des dépôts de limons de débordement transportés par suspension uniforme (fig. 5). Dans les dépressions correspondant probablement à d'anciens chenaux, les dépôts sableux sont recouverts d'une épaisseur variable de matière organique et de sédiments fins déposés par décantation. Il n'a pas été possible d'effectuer de carottages plus profondément du fait de la présence du pergélisol ; les variations verticales de faciès ainsi que les taux de sédimentation n'y sont donc pas évalués.

L'étendue spatiale des zones humides et la richesse des sédiments en matière organique permettent de rapprocher cette plaine de la classe C2a définie au sein de la typologie des plaines alluviales établie par Nanson et Croke (1992). Les plaines de la classe C sont engendrées par les systèmes fluviaux de faible énergie et sont caractérisées par la présence d'un matériel fin dont la cohésion est renforcée par la végétation ; le sous-ensemble C2a regroupe les systèmes anastomosés développés en milieu subarctique, intertropical ou encore de montagnes humides.

LE CYCLE SÉDIMENTAIRE

Les transferts sédimentaires entre unités mobiles et unités stabilisées au sein des hydrosystèmes fluviaux sont également régis par deux paramètres propres aux milieux périglaciaires : d'une part, la présence d'un pergélisol, qui dans le cas de la Sibérie centrale est épais et continu, et, d'autre part, l'efficacité de la dynamique éolienne.

LE RÔLE RELATIF DE L'ÉROSION THERMIQUE DES BERGES

Are (1983) fait état d'un suivi pluri-annuel du recul des berges des rivières du bassin de la Léna : le taux moyen de recul est de 6,5 m par an ; sur les chenaux principaux, l'érosion atteint 19 à 24 m, mais c'est en tête d'îles que les plus forts taux ont été observés : jusqu'à 40 m par an. Remarquons qu'en regard à la taille du fleuve et aux débits mis en œuvre au moment des crues, ces taux ne semblent pas particulièrement forts. Dans le cadre de cette étude, faute de pouvoir suivre l'évolution de certaines berges sur plusieurs années, le problème de l'érosion thermique et de ses interrelations avec la dynamique fluviale a été abordé par plusieurs biais. Le parcours effectué sur la Léna en bateau de Iakoutsk jusqu'à la confluence de la Vilioui, puis sur cet affluent jusqu'à la confluence de la Tyung (à la hauteur de Viliouisk), nous a permis d'observer des points très localisés, mais peu nombreux, d'érosion des berges. Ainsi, les sites caractérisés par les signes manifestes d'un fort recul des berges (comme par exemple, la niche d'érosion thermique représentée sur la fig. 6a) ont fait l'objet de relevés géomorphologiques et sédimentologiques ; des échantillons de sédiments gelés ont été prélevés et ont été pesés avant et après séchage pour estimer leur part en eau. Enfin, des sondages électro-magnétiques ont été effectués au sommet des différents niveaux de la plaine alluviale, des bras à sec et des bancs pour mesurer la profondeur du toit du pergélisol. Enfin, dans les berges, une sonde thermique a permis d'évaluer l'épaisseur affectée par la pénétration de l'onde de dégel (fig. 6).

Ces approches menées de front permettent de hiérarchiser les facteurs favorables à l'érosion thermique (Gautier et Costard, 1997 ; Costard *et al.*, 1999 ; Costard et Gautier, en cours). En premier lieu, les facteurs sédimentologiques semblent prépondérants : les niches d'érosion thermique se développent préférentiellement à la faveur d'une discontinuité sédimentologique : au contact sable/limon. Ainsi, les sédiments sableux, contenant entre 8 et 13 % de glace, montrent un recul plus prononcé, alors que les limons, qui ont une teneur plus élevée en glace (entre 26 et 28 %) semblent mieux résister à l'érosion thermique. En second lieu, des facteurs liés à la dynamique fluviale jouent un rôle important. Les zones d'érosion thermique se développent préférentiellement dans les berges concaves ou les berges au pied desquelles se situe une mouille, en tête d'île, dans les zones de confluence de deux bras, ce qui rejoint les observations de Are (1983). Par conséquent, il serait plus approprié de parler « d'érosion latérale contrôlée par le dégel de la berge » (communication personnelle d'A. Pissart).

La pénétration de l'onde de dégel dans la berge au contact de la lame d'eau « chaude » du fleuve (17 °C à 18 °C mesurés en juillet) provoque une décohésion massive des sédiments sableux ou limoneux et facilite leur reprise en charge par le cours d'eau. Les deux mécanismes (érosion thermique et érosion fluviale) injectent donc dans le système fluvial une charge solide abondante et homométrique.

LE CYCLE D'ÉCHANGE SÉDIMENTAIRE

Au cours de l'été, se produisent fréquemment de véritables tempêtes déclenchées par de forts vents durant lesquelles la visibilité était réduite à quelques mètres par la présence de particules soulevées par le vent. Après la tempête, il était facile d'observer sur le terrain des microformes de déflation façonnées à la surface des vastes zones exondées lors des basses eaux estivales. Le corollaire de cette activité éolienne est la formation de dunes édifiées sur les berges (en particulier sur la Vilioui).

Le rôle de la déflation éolienne dans les plaines alluviales de milieu froid est connu. Péwé le signale en Alaska (1955). Pissart, à l'île du Prince-Patrick (1966) et à l'île de Banks (1977), montre que l'étiage d'été déploie des conditions favorables à l'action éolienne dans les lits asséchés, même sous des vents faibles. Pissart souligne bien le fait que « les seules actions éoliennes qui engendrent des dépôts observables autres que des tâches de poussière sur la neige, sur l'île de Banks comme sur l'île Prince Patrick, se produisent dans les lits fluviaux et à proximité de ceux-ci » (Pissart, 1987, p. 109).

En second lieu, les analyses granulométriques renseignent sur la genèse des sédiments transportés par les cours d'eau sibériens. Le tri des éléments est très prononcé, comme nous l'avons souligné plus haut : on peut remarquer en particulier sur l'image CM (fig. 5) que les particules remobilisées par suspension graduée sont très proches de la droite C = M, ce qui atteste un bon tri. De plus, les courbes granulométriques de certains échantillons prélevés à la surface des bancs évoquent de par leur profil redressé une origine éolienne (fig. 7).

Ces faits nous amènent à avancer l'hypothèse que par érosion latérale, le fleuve remanie actuellement des sédiments éoliens stockés en particulier dans le niveau pléistocène principal (« terrasse de Bestyakhskaja »). Ces sables éoliens, qui perdent toute cohésion lors du dégel superficiel le long des berges, assurent donc une alimentation sédimentaire abondante et homométrique au fleuve et à ses tributaires. Rappelons que des apports sédimentaires importants participent également à l'anastomose fluviale. Ils contribuent en grande partie à l'édification de la plaine actuelle et, pour une petite partie, à la construction de nouvelles dunes, de taille probablement beaucoup plus modeste que celle des dunes du Pléistocène.

COMPARAISON AVEC D'AUTRES SYSTÈMES ANASTOMOSÉS

Les systèmes fluviaux à chenaux anastomosés ont été reconnus et distingués très tôt par Schumm (1968), puis par Mollard (1973) et Rust (1978) des autres styles fluviaux (en

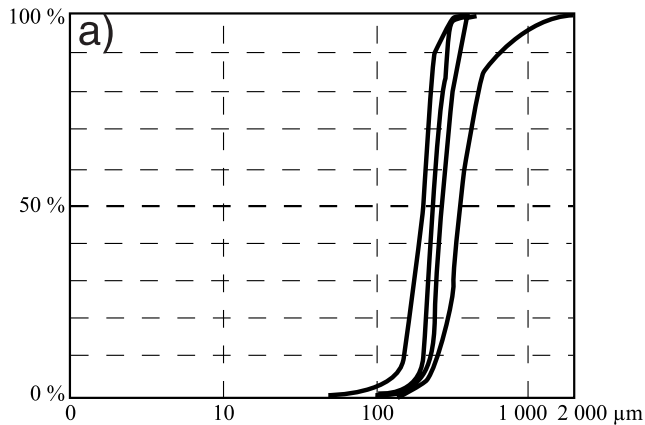
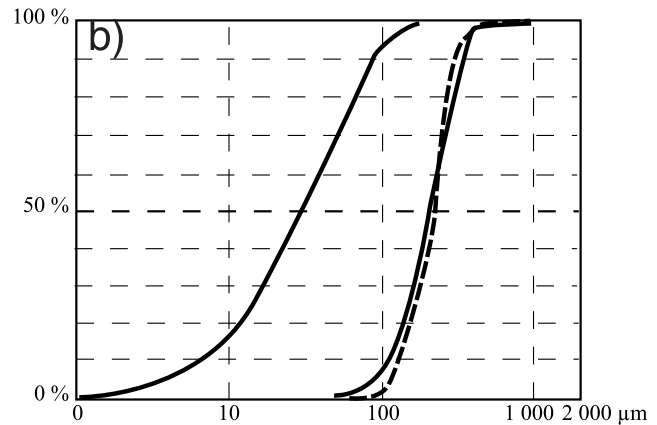


FIGURE 7. a) Courbes granulométriques des bancs de la Léna (en amont immédiat de la confluence de l'Aldan). b) Courbes granulométriques du niveau 1 de la coupe 6a.



a) Grain size distribution in the section 6a (level 1). b) Grain size distribution of the Léna River bars (upstream the Aldan junction).

tresses, à méandres ou rectilignes). Selon Schumm (1968), l'anastomose est le fait de systèmes fluviaux peu énergiques, caractérisés par de nombreux chenaux stables où dominent les transports en suspension. C'est à D.G. Smith que l'on doit les premiers travaux portant spécifiquement sur des rivières anastomosées du Canada (Smith, 1976 ; Smith et Putnam, 1980 ; Smith et Smith, 1980 ; Smith, 1983). Smith (1986) définit précisément les caractères de l'anastomose : *i*) une faible énergie déterminée par un profil en long très doux ; *ii*) des formes en plan constituées de chenaux multiples sinueux ou rectilignes, interconnectés et stables ; *iii*) une plaine d'inondation étendue et riche en zones humides (marécages, lacs, tourbières occupant d'anciens bras abandonnés) ; et *iv*) une accréation verticale dominante et rapide, liée le plus généralement à un bassin subsident. Cette étude montre que la Léna moyenne et ses affluents répondent aux trois premiers critères ; la prédominance de l'accréation verticale, pour laquelle on ne dispose aujourd'hui que de preuves indirectes, reste à démontrer, sachant que le bassin de l'Aldan et de la Léna moyenne correspondent effectivement à des zones subsidentes (Nekrasov et Gordeyev, 1973).

La diversité des milieux climatiques où se développe ce style fluvial est la preuve que le climat n'exerce pas d'influence déterminante sur l'anastomose : les travaux de D.G. Smith ont porté en premier lieu sur des rivières de milieu à hiver froid et à crues printanières de débâcle (l'Alexandra, la Mistaya et la Saskatchewan). Les processus d'avulsion sur la Saskatchewan ont également fait l'objet des travaux de N.D. Smith et Perez-Arlucea, (1994) et de Perez-Arlucea et N.D. Smith (1999). D.G. Smith (1986) montre avec l'exemple de la Magdalena, en Colombie, que ce style fluvial peut aussi être présent en milieu intertropical. Les zones arides semblent également favorables à l'anastomose : l'Australie centrale, qui fait l'objet d'une littérature abondante (Rust, 1981 ; Rust et Legun, 1983 ; Nanson *et al.*, 1986 ; Rust et Nanson, 1986 ; Knighton et Nanson, 1994a et 1994b ; Gibling *et al.*, 1998), ou bien encore les régions sèches des États-Unis d'Amérique

(Schumann, 1989). Les milieux tempérés n'en sont pas non plus exempts (Miller, 1991 ; Harwood et Brown, 1993).

D'après Knighton et Nanson (1993), trois facteurs principaux déterminent l'anastomose fluviale : une puissance de l'écoulement très limitée, une érodabilité des berges faible et des apports sédimentaires modérés à élevés. Par la suite, estimant que le terme même d'anastomose ne rend pas compte de la diversité naturelle de ce style fluvial, Nanson et Knighton (1996) préfèrent adopter le terme de rivière en anabranches, comprenant six types, au sein desquels l'anastomose (au sens strict) représente la première catégorie. Il est intéressant de situer la Léna par rapport aux trois principaux facteurs déterminant l'anastomose fluviale selon Knighton et Nanson (1993). En ce qui concerne la puissance, lorsque l'on replace la Léna moyenne sur le graphe mettant en relation le débit de plein bord (ou la crue annuelle moyenne) avec la pente, établi par Leopold et Wolman (1957) (fig. 8a), il apparaît clairement que ce grand fleuve sibérien appartient aux systèmes fluviaux peu énergiques, ne disposant que d'une puissance spécifique restreinte (fig. 8b). On peut alors retenir l'hypothèse émise par Knighton et Nanson (1994a), Nanson et Knighton (1996) et reprise par Gibling *et al.* (1998) selon laquelle la formation de chenaux anastomosés est une adaptation du système fluvial à trois variables fondamentales (débits liquide, solide et profil en long) : concentrer l'énergie dans des chenaux multiples plus étroits et plus profonds plutôt que la disperser à travers la plaine permet au cours d'eau de mobiliser des débits liquides et solides importants dans des bassins affectés de pentes très faibles. Le réseau en anabranches réduit la résistance à l'écoulement et optimise le transfert de l'eau et des sédiments lorsque les possibilités d'augmenter la pente sont nulles.

La brièveté dans le temps des écoulements efficaces restreint également l'énergie dont dispose le cours d'eau. Ceci se vérifie sur le bassin de la Léna, et la très forte variabilité du régime hydrologique en général et des crues est l'un des paramètres partagés par l'ensemble des systèmes anastomosés (tabl. II), qu'il s'agisse des rivières de l'ouest du Canada régies par la fonte des neiges et des glaces (Smith,

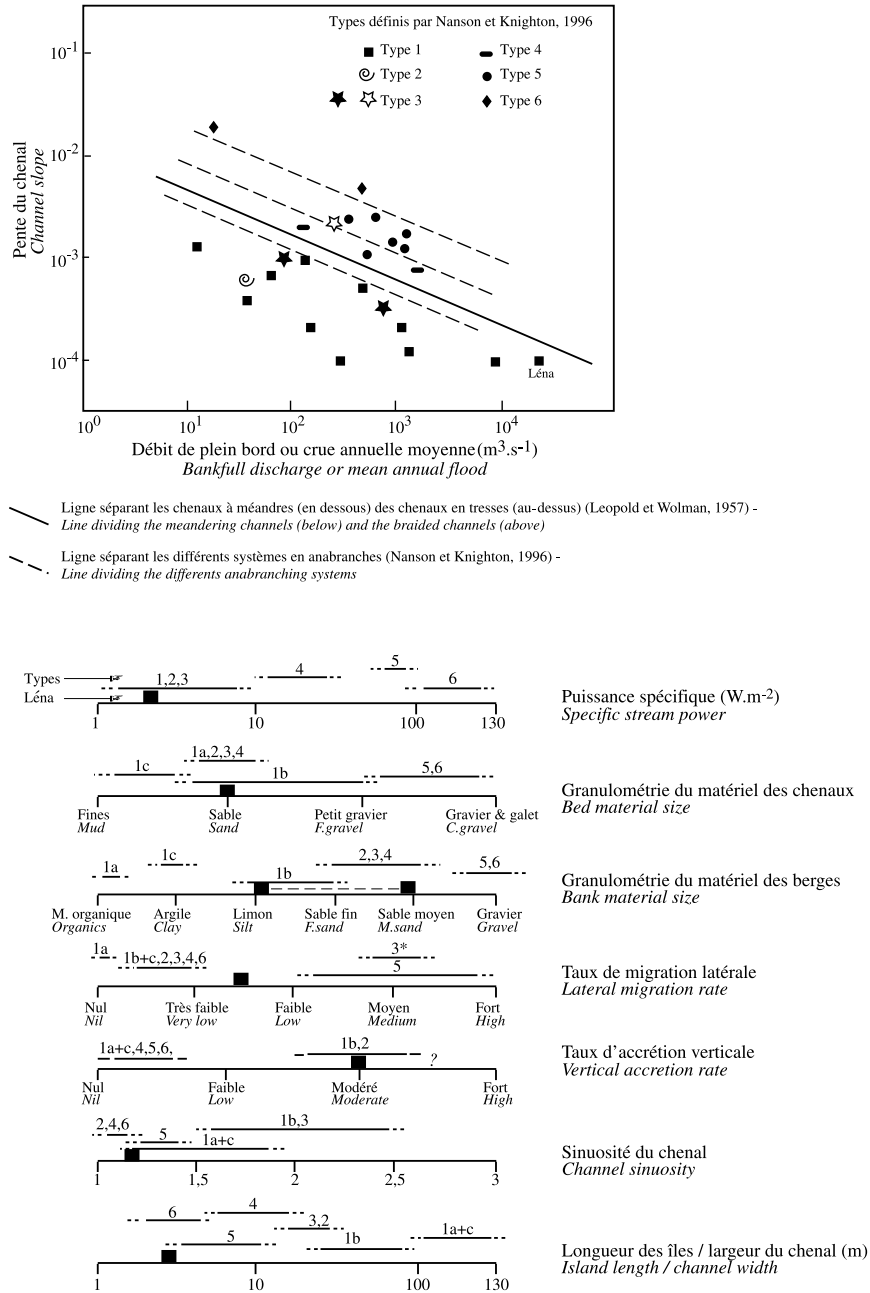


FIGURE 8. Position de la Léna moyenne sur le graphe de Leopold et Wolman (1957) et par rapport aux six types de rivières en anabranches définis par Nanson et Knighton (1996).

Location of the Lena River on the diagram by Leopold and Wolman (1957) and position in relation to the six types of anabranching rivers distinguished by Nanson and Knighton (1996).

1976 ; Smith et Putnam, 1980 ; Smith et Smith, 1980 ; Smith, 1983 ; Smith et Perez-Arlucea, 1994), ou à plus forte raison encore des rivières du bassin semi-aride du lac Eyre (Knighton et Nanson, 1994a).

Cette inefficacité des écoulements ne permet pas aux cours d'eau de migrer latéralement, d'autant que la résistance des berges, renforcée fréquemment par la présence de la végétation (Smith, 1976), commande la migration latérale. Dans le cas des cours d'eau sibériens, plusieurs faits mis en évidence dans cette étude nous amènent à nuancer l'importance du rôle exercé par la végétation, et ce, pour trois raisons principales. Tout d'abord, la végétation n'est pas le facteur mais plutôt la conséquence d'une certaine stabilité latérale. En effet, les racines ne se développent que dans la couche active épaisse de 90 cm en moyenne sous couvert arboré ; or les îles et la plaine sont « perchées » de plusieurs mètres au-dessus du fond des chenaux principaux. Par conséquent, la moindre encoche à la base d'une berge provoque l'écroulement des arbres qui entraînent dans leur chute plusieurs dizaines de mètres cubes de sédiments. En second lieu, comme on l'a vu plus haut, l'érosion thermique est un facteur franc de fragilisation des berges. En troisième lieu, les sédiments des berges sont hétérogènes (sables fins, moyens, limons et argiles), ce qui offre une maigre résistance à l'érosion. Il semblerait donc qu'à la diffé-

rence d'autres systèmes anastomosés, la stabilité des formes fluviales des cours d'eau sibériens ne soit pas dépendante de la résistance des berges, mais bien plus du faible niveau d'énergie du système, entraînant l'incapacité des chenaux à modifier leur tracé.

En précisant la position de la Léna moyenne par rapport aux paramètres morphométriques et granulométriques mis en avant par Nanson et Knighton (1996) (fig. 8b, tabl. II), il semblerait que le fleuve ait un certain nombre de points communs avec le type 1 (*cohesive sediment anabranching rivers*) représentant les systèmes anastomosés (au sens strict), catégorie b (*organo-clastic systems*), mais aussi avec le type 2 (*sand-dominated, island-forming anabranching rivers*), sans pour autant leur ressembler complètement. Les cours d'eau de Sibérie se distinguent du type 1 de par le manque de cohésion des sédiments de berges, l'absence de levées et une dichotomie sédimentaire moins marquée entre les chenaux et la plaine. Le style 2 montre une certaine instabilité des formes du fait de mécanismes d'avulsion et une plus grande homogénéité sédimentaire (notons toutefois que Nanson et Knighton, 1996, ne disposent que d'un exemple connu pour établir ce type 2). Ce constat nous amène à souligner une nouvelle fois l'importance des processus sédimentaires à l'interface des parties actives et stabilisées du lit et l'influence majeure exercée par la glace (c'est-à-dire, pergélisol, érosion

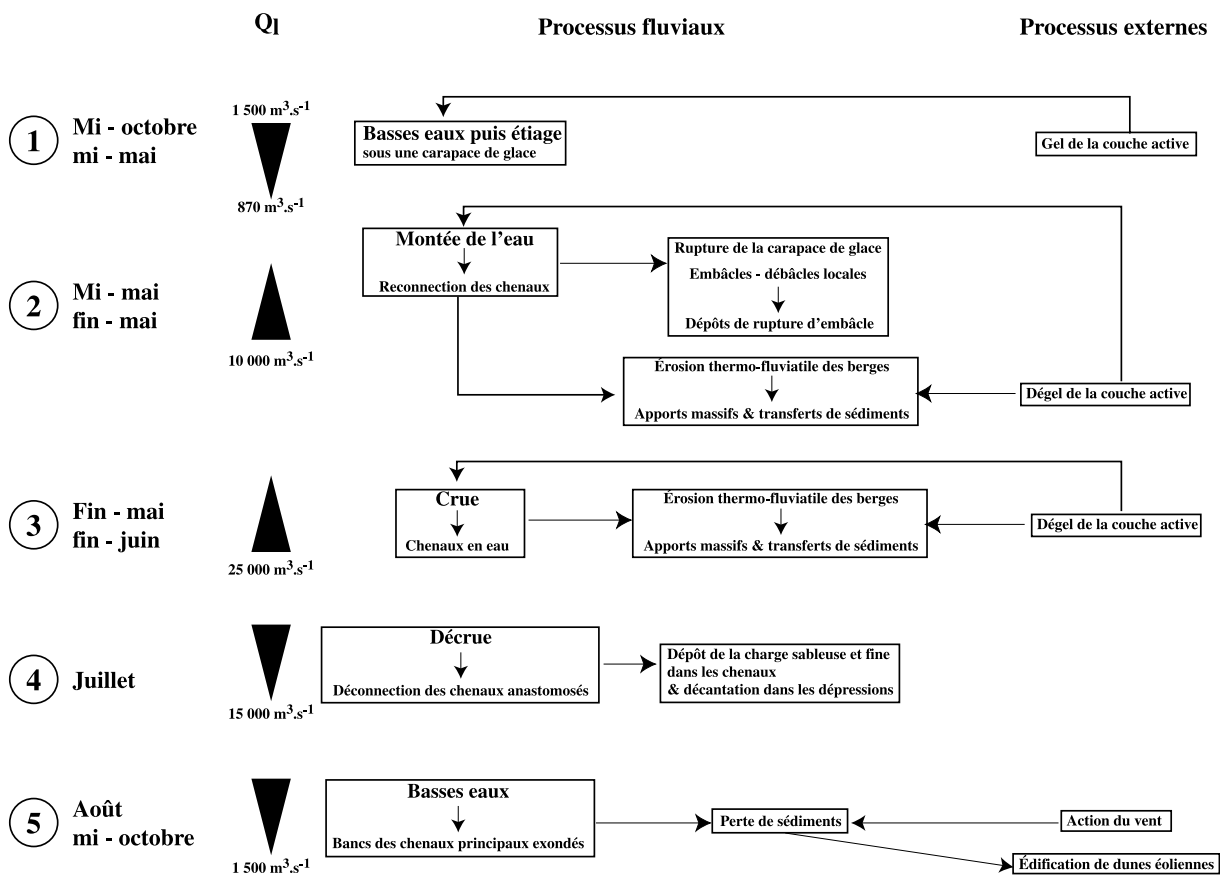


FIGURE 9. Le cycle hydromorphodynamique de la Léna.

Hydromorphodynamic cycle of the Lena River.

thermique et radeaux de glace sur le fleuve). L'élaboration d'études en géomorphologie fluviale sur d'autres grands fleuves allogènes traversant le domaine périglaciaire permettra peut-être de créer une nouvelle catégorie à la classification établie pour les systèmes en anabranches.

CONCLUSION

Cette étude tente d'apporter une contribution sur le fonctionnement des systèmes fluviaux anastomosés en milieu pergélisolé de Sibérie centrale. L'analyse de séquences sédimentaires éclaire le fonctionnement contrasté des chenaux principaux et des bras anastomosés. Ainsi, dans les chenaux principaux de fleuves et rivières sibériens, une épaisseur annuelle de 10 à 30 cm de sédiments est remobilisée lors d'une crue annuelle ordinaire ; la géométrie des remblaiements permet d'avancer l'hypothèse d'une faible mobilité latérale des chenaux. Le mécanisme d'avulsion est mis en évidence par la présence de dépôts à stratifications obliques, mais son action reste limitée dans le temps et ne semble pas provoquer de changements rapides dans le tracé des chenaux. L'action thermo-mécanique exercée le long des berges peut être particulièrement efficace mais reste très localisée. Elle injecte dans le système fluvial une quantité de sédiments qui excède la capacité de transport du fait d'une puissance spécifique trop faible, de la brièveté du travail géomorphologique et de l'irrégularité des débits dans l'espace. Ces sédiments sont donc localement et brièvement remis en mouvement et très longuement stockés dans les îles ainsi que dans les bras anastomosés.

La Léna représente un système complexe se caractérisant par de nombreuses interfaces, comme les échanges thermiques entre le pergélisol et la rivière engendrant un continu déplacement des fronts de dégel latéraux (érosion thermique) et verticaux (talik), ou comme la mobilisation des sédiments, leurs prises en charge successives par l'écoulement fluvial puis par l'érosion éolienne sur un pas de temps très court et leur stockage pluridécennal dans les îles et la plaine (fig. 9). Seul un vaste programme pluriannuel et pluridisciplinaire concernant un tel système fluvial pourrait quantifier précisément ces échanges dans le temps et dans l'espace.

REMERCIEMENTS

Cette recherche s'intègre dans le cadre du programme Dynamique et Bilan de la Terre et du Programme National Sol et Érosion de l'INSU (CNRS, France). Elle a également bénéficié du soutien financier du Laboratoire de Géographie Physique (CNRS, UMR 8591 à Meudon), du Centre de Géomorphologie (CNRS, Caen) et de l'Université d'Orléans (Département de géographie, aménagement et cartographie). Le sondeur électro-magnétique a été gracieusement mis à notre disposition par le Centre de Géomorphologie de Caen. Que nos collègues russes du département de géographie de l'université Lomossou de Moscou, qui nous ont accueillis sur leur bateau en Sibérie et fait partager leur connaissance de la Léna, trouvent ici l'expression de notre gratitude. Ce travail a également reçu les conseils éclairés du professeur A. Pissart de l'Université de Liège (Belgique).

Nous remercions également le Dr M. Church ainsi qu'un lecteur anonyme pour leurs remarques constructives.

RÉFÉRENCES

- Anisimova, N.P., Nikitina, N.M., Piguzova, U.M. et Shepelyev, V.V., 1973. Water sources of Central Yakutia - Guidebook, 47 p. *In* Proceedings, II International Conference on Permafrost. Yakutsk, U.R.S.S., National Academy of Sciences, Washington D.C., 783 p.
- Antonov, S., 1960. Delta reki Leny. *Trudy Okeanographicheskoy Komissiyi. Ak. Nauk. SSSR*, 6 : 25-34.
- Are, F.E., 1983. Thermal abrasion on coasts, p.24-28. *In* Proceedings, Fourth International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska. National Academy Press, Washington D.C., 1524 p.
- Arnborg, L., Walker, H.J. et Peippo, J., 1966. Water discharge in the Colville River, Alaska, 1962. *Geografiska Annaler*, 48a : 195-210.
- Cook, F.A., 1967. Fluvial processes in the High Arctic. *Geographical Bulletin*, 9 : 262-268.
- Costard, F., 1994. Érosion thermique sur Mars et en Sibérie. *Environnements Périglaciaires*, 1 : 33-44.
- Costard, F., Aguirre-Puente, J., Greeley, R. et Makhloufi, N., 1999. Martian fluvial-thermal erosion : Laboratory simulation. *Journal of Geophysical Research*, 104 (E6) : 14091-14098.
- Forbes, L., 1983. Morphology and sedimentology of a sinuous gravel bed channel system : Lower Babbage river, Yukon coastal plain, Canada. *In* Modern and ancient fluvial systems. International Association of Sedimentologists, Special Publication, 6 : 195-206.
- Friend, P.F., 1983. Towards the field classification of alluvial architecture or sequence. *In* Modern and Ancient Fluvial Systems. International Association of Sedimentologists, Special Publication, 6 : 345-354.
- Gautier, E. et Costard, F., 1997. Érosion thermique et dynamique fluviale en Sibérie centrale - résultats préliminaires. *Environnements périglaciaires*, 4 (12) : 65-75.
- Gibling, M.R., Nanson, G.C. et Maroulis, J.C., 1998. Anastomosing river sedimentation in the Channel County of Central Australia. *Sedimentology*, 45 : 595-619.
- Gordeev, V.V. et Sidorov, I.S., 1993. Concentrations of major elements and their outflow into the Laptev Sea by the Lena river. *Marine Chemistry*, 43 : 33-45.
- Guilcher, A., 1979. *Précis d'hydrologie marine et continentale*. Masson, Paris, 344 p.
- Harwood, K. et Brown, A.G., 1993. Fluvial processes in a forested anastomosing river : Flood partitioning and changing flow patterns. *Earth Surface Processes and Landforms*, 18 : 741-748.
- Huh, Y. et Edmond, J.M., 1999. The fluvial geochemistry of the rivers of Eastern Siberia : III. Tributaries of the Lena and Anabar draining the basement terrain of the Siberian craton and the Trans-Baikal highlands. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63 (7/8) : 967-987.
- Huh, Y., Pantelev, G., Babich, D., Zaitsev, A. et Edmond, J.M., 1998a. The fluvial geochemistry of the rivers of Eastern Siberia : II. Tributaries of the Lena, Omoloy, Yana, Indigirka, Kolyma, Anadyr, draining the collisional/accretionary zone of the Verkhojansk and Cherskiy ranges. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62 (12) : 2053-2075.
- Huh, Y., Tsoi, M.Y., Zaitsev, A. et Edmond, J.M., 1998b. The fluvial geochemistry of the rivers of Eastern Siberia : I. Tributaries of the Lena river draining the sedimentary plateau of Siberian craton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62 (10) : 1657-1676.
- Jahn, A., 1975. *Problems of the Periglacial Zone*. Washington D.C., Warszawa, 223 p.
- Katasonov, E.M. et Soloviev, P.A., 1969. Guide to trip in Central Yakutia. *In* Palaeogeography and Periglacial Phenomena. International Symposium, Yakutsk, 87 p.
- Kattner, G., Lobbes, J.M., Fitznar, H.P., Engbrodt, R., Nöthig, E.M. et Lara, R.T., 1999. Tracing dissolved organic substances and nutrients from the Lena river through Laptev Sea (Arctic). *Marine Chemistry*, 65 : 25-39.

- Knighthon, A.D. et Nanson, G.C., 1993. Anastomosis and the continuum of channel pattern. *Earth Surface Processes and Landforms*, 18 : 613-625.
- Knighthon, A.D. et Nanson, G.C., 1994a. Flow transmission along an arid zone anastomosing river, Cooper Creek, Australia. *Hydrological Processes*, 8 : 137-154.
- _____. 1994b. Waterholes and their significance in the anastomosing channel system of Cooper Creek, Australia. *Geomorphology*, 9 : 311-324.
- Kolupaila, S. et Pardé, M., 1933. Le régime des cours d'eau d'Europe orientale. *Revue de Géographie alpine*, 21 : 651-738.
- Leopold, L.B. et Wolman, M.G., 1957. *Rivers Channel Patterns - Braided, Meandering and Straight*. US Geological Survey Professional Paper, 282-B : 35-85.
- Létolle, R., Martin, J.B., Thomas, A.J., Gordeev, V.V., Gusarova, S. et Sidorov, I.S., 1993. ^{18}O abundance and dissolved silicate in the Lena delta and Laptev Sea (Russia). *Marine Chemistry*, 43 : 47-64.
- Lopatin, G.V., 1952. Nanosy rek SSSR. *Geographie, Mémoire de la Société fédérale de Géographie, Moscou*, 14 : 336 p.
- Lvovitch, M.I., 1971. Reki SSSR. *Moscou*, 349 p.
- Martin, J.B., Guan, D.M., Elbeaz-Poulichet, F., Thomas, A.J. et Gordeev, V.V., 1993. Preliminary assessment of the distribution of some trace elements (As, Cd, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn) in a pristine aquatic environment: the Lena river estuary (Russia). *Marine Chemistry*, 43 : 185-199.
- Miall, A.D., 1996. *The Geology of Fluvial Deposits - Sedimentary Facies, Basin Analysis and Petroleum Geology*. Springer, Berlin, 582 p.
- Miller, J.R., 1991. Development of anastomosing channels in south-central Indiana. *Geomorphology*, 4 : 221-229.
- Mollard, J.D., 1973. Air photo interpretation of fluvial features, p. 341-380. *In Proceedings of the 9th Canadian Hydrology Symposium*. National Research Council of Canada, Edmonton, 250 p.
- Nanson, G.C. et Croke, J.C., 1992. A genetic classification of floodplains. *Geomorphology*, 4 : 459-486.
- Nanson, G.C. et Knighton, A.D., 1996. Anabranching rivers : Their cause, character and classification. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21 : 217-239.
- Nanson, G.C., Rust, B.R. et Taylor, G., 1986. Coexistent braids and anastomosing channels in an arid-zone river : Cooper Creek, central Australia. *Geology*, 14 : 175-178.
- Nekrasov, I.A. et Gordeyev, V.V., 1973. The Northeast of Yakoutia - Guidebook, 46 p. *In Proceedings, II International Conference on Permafrost*. Yakutsk, U.R.S.S., National Academy of Sciences, Washington D.C., 783 p.
- Passega, R., 1957. Textures as characteristic of clastic deposition. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 9 : 1952-1984.
- _____. 1963. Analyses granulométriques, outil géologique pratique. *Revue de l'Institut français du Pétrole*, XVIII (11) : 1489 - 1499.
- _____. 1964. Grain size representation by CM pattern as a geological tool. *Journal of Sedimentary Petrology*, 34 (4) : 830 - 847.
- _____. 1977. Significance of CM diagrams of sediments deposited by suspension. *Sedimentology*, 24 : 723 - 733.
- Perez-Arlucea, M. et Smith, N.D., 1999. Depositional patterns following the 1870s avulsion of the Saskatchewan River (Cumberland Marshes, Saskatchewan, Canada). *Journal of Sedimentary Research*, 69 (1) : 62-73.
- Péwé, T.L., 1955. Origin of the upland silt near Fairbanks, Alaska. *Bull. Geological Society of America Bulletin*, 66 : 699-724.
- Pissart, A., 1966. Le rôle géomorphologique du vent dans la région de Mould Bay, île Prince Patrick. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 10 : 226-236.
- _____. 1967. Les modalités de l'écoulement de l'eau sur l'île Prince-Patrick (76°N, 120°W) Arctique canadien. *Biuletyn Periglacialny*, 16 : 219-224.
- _____. 1977. Dépôts et phénomènes éoliens sur l'île de Banks, Territoire du Nord-Ouest, Canada. *Journal canadien des Sciences de la Terre*, 14 (11) : 2462-2480.
- _____. 1987. Géomorphologie périglaciaire - texte des leçons de la chaire Francqui belge. *Laboratoire de Géomorphologie et de Géologie du Quaternaire, Université de Liège*, 135 p.
- Rust, B.R., 1978. A classification of alluvial channel systems, p. 187-198. *In Fluvial Sedimentology*. Canadian Society of Petroleum Geology Memoir 5.
- _____. 1981. Sedimentation in an arid-zone anastomosing fluvial system : Cooper Creek, central Australia. *Journal of Sedimentary Petrology*, 51 : 745-755.
- Rust, B.R. et Legun, A.S., 1983. Modern anastomosing-fluvial deposits in arid Central Australia, and a Carboniferous analogue in New Brunswick, Canada, p. 385-392. *In Modern and ancient fluvial systems*. International Association of Sedimentologists, Special Publication 6.
- Rust, B.R. et Nanson, G.C., 1986. Contemporary and palaeo channel patterns and the Late Quaternary stratigraphy of Cooper Creek, southwestern Queensland, Australia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 11 : 581-590.
- Schumann, R.R., 1989. Morphology of Red Creek, Wyoming, an arid-region anastomosing channel system. *Earth Surface Processes and Landforms*, 14 : 277-288.
- Schumm, S.A., 1968. Speculation concerning palaeohydrologic controls of terrestrial sedimentation. *Geological Society of America Bulletin*, 79 : 1573-1588.
- Smith, D.G., 1976. Effect of vegetation on lateral migration of anastomosed channels in a glacier meltwater river. *Geological Society of America Bulletin*, 87 : 857-860.
- _____. 1983. Anastomosed fluvial deposits : Modern examples from Western Canada, p. 155-168. *In Modern and ancient fluvial systems*. International Association of Sedimentologists, Special Publication 6.
- _____. 1986. Anastomosing river deposits sedimentation rates and basin subsidence, Magdalena River, Northwestern Columbia, South America. *Sedimentary Geology*, 46 : 177-196.
- Smith, D.G. et Putnam, P.E., 1980. Anastomosed river deposits : Modern and ancient examples in Alberta, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 17 : 1396-1406.
- Smith, D.G. et Smith, N.D., 1980. Sedimentation in anastomosed river systems : Example from alluvial valleys near Baff, Alberta. *Journal of Sedimentary Petrology*, 50(1) : 157-164.
- Smith, N.D. et Perez-Arlucea, M., 1994. Fine-grained splay deposition in the avulsion belt of the lower Saskatchewan River, Canada. *Journal of Sedimentary Research*, B64 : 159-168.
- Tchalov, R.S., Berkovitch, K.M., Borsouk, O.A., Kirik, O.M., Lodina, R.V., Paklina, L.M., Rouleva, S.N. et Tchernov, A.V., 1976. Régime fluvial de la moyenne et basse Léna. *Université d'État de Moscou, Faculté de géographie, Laboratoire de recherche sur l'érosion des sols et les processus fluviaux*. Moscou, 600 p. (en russe).
- Walker, H.J., 1983. Erosion in a permafrost dominated delta, p. 1344-1349. *In Proceedings Fourth International Conference on Permafrost, Alaska*. National Academy Press, Washington D.C., 1524 p.
- Walker, H.J. et Arnborg, L., 1963. Permafrost and ice-wedge effects on riverbanks erosion, p. 164-171. *In Proceedings of First International Conference on Permafrost*. National Academy of Sciences, Washington, D.C., 320 p.
- Yamskikh, A.F., Yamskikh, A.A. et Brown, A.G., 1999. Siberian-type Quaternary floodplain sedimentation : The example of the Yenisei river, 241-252. *In A.G. Brown et T.A. Quine, édité, Fluvial Processes and Environmental Change*. John Wiley, Chichester, 413 p.