Dynamiques environnementales

Journal international de géosciences et de l'environnement

38 | 2016

Entre ciel et mer : environnements insulaires et sociétés

Les îles de Brekh à l'embouchure de l'Ienisseï : leur exodynamique comme indicateur environnemental

The Brekh Islands at the mouth of the Yenisei : their exodynamics as an environmental indicator

Sergej Gorškov, Laurent Touchart, Pascal Bartout, Olga Močalova, Zahar Bortnovskij et Aleksej Medvekov

Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/dynenviron/749>

DOI : 10.4000/dynenviron.749

ISSN : 2534-4358

Éditeur

Presses universitaires de Bordeaux

Édition imprimée

Date de publication : 1 juillet 2016

Pagination : 212-231

ISBN : 979-10-300-0068-9

ISSN : 1968-469X

Référence électronique

Sergej Gorškov, Laurent Touchart, Pascal Bartout, Olga Močalova, Zahar Bortnovskij et Aleksej Medvekov, « Les îles de Brekh à l'embouchure de l'Ienisseï : leur exodynamique comme indicateur environnemental », *Dynamiques environnementales* [En ligne], 38 | 2016, mis en ligne le 01 juillet 2017, consulté le 28 novembre 2019. URL : <http://journals.openedition.org/dynenviron/749> ; DOI : 10.4000/dynenviron.749

La revue *Dynamiques environnementales* est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.

Le lac-réservoir de Krasnoïarsk. Ce lac de barrage, d'une capacité de 73 kilomètres cube, subit un marnage pouvant atteindre 18 m. La couleur blanche des calcaires paléozoïques décapés montrent que le niveau de début août a déjà baissé de plusieurs mètres depuis le maximum de juin (cliché : L. Touchart).

Les îles de Brekh à l'embouchure de l'énisseï : leur exodynamique comme indicateur environnemental

Sergej Gorškov¹, Laurent Touchart², Pascal Bartout³, Olga Močalova⁴, Zahar Bortnovskij⁵ et Aleksej Medvekov⁶

Résumé/Abstract

Découvertes par de grands explorateurs, parmi lesquels Moskvitin, puis Nansen, les îles de Brekh forment le delta intérieur du fleuve énisseï au fond d'un golfe de la mer de Kara et constituent le type même de l'embouchure estuaro-deltaïque de la classification de Mihajlov. Elles font partie des aires protégées du Grand Arctique et ont le statut de zakaznik, territoire protégé comprenant des interdictions partielles. Leur environnement périglaciaire et leur situation à l'embouchure d'un des fleuves les plus puissants du monde leur confèrent une dynamique rapide. Les activités humaines situées en amont (construction de barrages retenant les particules sédimentaires, pollution radioactive) s'ajoutent aux modifications récentes. L'article discute de l'éventuelle opportunité de réactiver le projet de transfert de bassin préconisant de détourner une partie des eaux de l'énisseï vers les steppes du Kazakhstan en faisant l'hypothèse que l'interface insulaire entre le fleuve et la mer compose un intégrateur des données environnementales, rendant utile pour les prises de décision aménagementales dans le bassin l'étude de la stabilité des îles de Brekh.

The Brekh Islands at the mouth of the Yenisei: their exodynamics as an environmental indicator

Discovered by great explorers, including Moskvitin and Nansen, the Brekh islands form the inland delta of the Yenisei River at the end of a gulf in the Kara Sea. They represent the type of estuaro-delta mouth in the classification of Mihajlov. They are part of the Great Arctic protected areas with the status of zakaznik, which is a protected territory including partial bans. Their periglacial situation and their location at the mouth of one of the biggest rivers of the world give them a great environmental dynamics. Upstream human activities (sedimentary particles retained in reservoirs, radioactive pollution) are in addition to recent changes. The article discusses the possible opportunity to reactivate the inter-basin transfer project suggesting to derive a part of the waters of the Yenisei River toward the steppes of Kazakhstan assuming that the interface between the river and the sea is an environmental data integrator, making the study of the stability of Brekh islands useful for planning decisions in the basin.

Mots clés/Key-words

Îles deltaïques, aire protégée russe, zakaznik, projet de transfert de bassin, énisseï, mer de Kara.

Delta islands, Russian protected area, zakaznik, inter-basin transfer project, Yenisei, Kara Sea.

Introduction

Le zakaznik (territoire préservé) des îles de Brekh¹ en Russie, qui comprend les îles du delta intérieur du fleuve énisseï, constitué essentiellement de marais et de lacs, est inscrit depuis 1994 au titre de la Convention de Ramsar relative aux zones humides d'importance internationale. Cette reconnaissance mondiale s'appuie avant tout sur l'intérêt de sa protection pour l'habitat des oiseaux d'eau, en tant que lieu de

nidification, de mue et de passage des palmipèdes, notamment la bernache à cou roux, mais aussi pour sa richesse en poissons nobles que sont le corégone et l'esturgeon de Sibérie². Au niveau des aires protégées russes, ce territoire préservé a été créé en 1999 pour tenir compte de l'importance environnementale du cours inférieur de l'énisseï (Syroečovskij et al., 2000). Compte tenu de leur position géographique septentrionale en Russie au débouché du plus grand fleuve mondial se jetant dans l'Arctique (Marchand, 1993 ; Touchart, 2008), soumis à des pollutions

1. Les îles de Brekh sont les Brehovskie ostrova en transcription internationale du russe.

1. Université Internationale de la nature, de la société et de l'homme « Dubna », Russie.
2. EA 1210 CEDETE, Université d'Orléans, France.
3. EA 1210 CEDETE, Université d'Orléans, France.

2. <http://www.ramsar.org/fr/brehovsky-islands-in-the-yenisei-estuary-0>

4. PHOSPHORIS SAS, Russie.
5. Université Internationale de la nature, de la société et de l'homme « Dubna », Russie.
6. Université d'Etat Lomonossov de Moscou, Russie.

figure 1 : Localisation des îles de Brekh à l'embouchure de l'énisseï dans la mer de Kara.

diverses (métaux lourds, radionucléides) dans sa partie moyenne (production d'uranium enrichi et de plutonium à proximité de Krasnoïarsk) et aval (nouveau gisement pétrolier de Vankor, mines de Norilsk), les îles de Brekh sont aujourd'hui sujettes à des questions environnementales liées tant à la qualité des eaux transportées qu'aux dynamiques géomorphologiques en lien avec la fonte du pergélisol.

L'étude présentée vise ainsi à mieux comprendre cette interface amphibie entre milieu continental et océanique dans les hautes latitudes en caractérisant les conditions naturelles du delta moderne de l'énisseï, les mutations opérées dans cette zone climatique périglaciaire depuis la fin du Pléistocène et ainsi mieux déterminer certains aspects importants de l'écologie de la mer de Kara en partie liée à l'écoulement de l'énisseï. C'est à partir de l'état environnemental de ces îles arctiques qu'il sera possible de mieux apprécier les opportunités ou les risques du projet de détournement des eaux du fleuve pour irriguer les steppes kazakhes, à plusieurs milliers de kilomètres plus au sud. L'hypothèse de travail réside dans le fait que les îles de Brekh, situées tout à fait à l'aval du système fluvial et tenant aussi de l'écosystème marin, sont susceptibles de former un indicateur environnemental cumulant de multiples facteurs, si bien que l'étude de leur stabilité ou instabilité pourrait donner des pistes de réflexion sur la marge de progression de futurs aménagements projetés en amont, en particulier les transferts de bassin vers le sud.

Pour ce faire, nous fonctionnerons par changement d'échelles à la fois temporelle et spatiale où s'enchevêtrent aspects physiques et humains.

Une première partie s'intéressera à l'histoire de la connaissance et de la « colonisation » de cet espace du delta de l'énisseï jusqu'à la constitution du zakaznik : il s'agira donc d'une étude à grande échelle, essentiellement lexicographique et descriptive.

Une seconde portera sur le nécessaire recul que l'on doit porter sur cet espace en comprenant les dynamiques pléistocènes de cet espace du froid : il s'agira donc d'une approche à plus petite échelle du milieu naturel et de ses mutations observées au cours des derniers millénaires.

Enfin, une troisième partie étayera la complexité de ce milieu insulaire en introduisant les modifications opérées par l'homme dans ce lieu d'interface entre le continent et l'océan en identifiant les possibilités de suivi des changements opérés au sein du delta pour une meilleure gestion.

I- A la découverte du delta de l'énisseï et des îles de Brekh

Si l'on suit la classification russe de V.N. Mihajlov (Mihajlov, 1991, Mihajlov *et al.*, 2008), dont le géographe français F. Carré (2001) avait montré combien elle était novatrice et importante pour l'épistémologie de l'étude scientifique des embouchures, l'énisseï répond au type estuaro-deltaïque. Cela signifie que, dans une morphologie semi-fermée, ce fleuve construit un delta interne, composé de terrains à fleur d'eau, périodiquement inondés, parcourus par un réseau complexe de bras et de chenaux, troués de lacs et de marais, abritant des fourrés humides et une faune riche. Dans l'esprit de V.N. Mihajlov, le delta interne de l'énisseï coïncide justement avec les îles de Brekh (**figure 1**).

A- Comprendre l'occupation de ses îles par l'Histoire

Le delta de l'énisseï occupe la partie occidentale de la péninsule de Taïmyr en Sibérie Occidentale à une latitude située au-delà du Cercle Polaire Arctique. De par sa situation géographique, sa découverte tout comme sa conquête humaine furent complexes.

En été 1605, le navigateur et marchand Luca Moskvitin prit la tête d'une expédition gouvernementale de l'Etat russe dont l'objectif était une enquête de l'Arctique à l'est du golfe de l'Ob et de la péninsule de Yamal. Après avoir passé la péninsule Gydan à

photo 1 : Le barrage de Saïano-Chouchensk (cliché : S. Gorškov). Le grand barrage situé le plus en amont de l'énisseï alimente la station hydroélectrique la plus puissante de Russie. La digue, haute de 240 m, a été terminée à la fin des années 1970.

photo 2 : Le lac-réservoir de Saïano-Chouchensk (cliché : S. Gorškov). Le lac de barrage, d'une capacité de 31 kilomètres cube, connaît les plus fortes valeurs russes de marnage, la dénivellation verticale pouvant atteindre 42 m, du fait de la mise en réserve des hautes eaux printanières de l'énisseï. Les arbres morts montrent cet étage de balancement des niveaux du lac. Encaissé dans les monts Saïan, le lac retient les sédiments de l'énisseï.

figure 2 : Carte du zakaznik des îles de Brekh (d'après Syroečovskij E.E. Mladšij, 2011, *Vodno-bolotnye ugodja Rossii*, non publié).

l'aide de bateaux, dont certains atteignaient 90 m de longueur, l'expédition atteignit le golfe de l'énisseï et son embouchure. Certains membres de l'expédition furent débarqués et, par voie terrestre, gagnèrent le site de Mangazeya situé en aval de la rivière Touroukhan sur la berge occidentale de l'énisseï. Moskvitin et ses compagnons continuèrent de leur côté la navigation et explorèrent la côte de la péninsule de Taïmyr jusqu'à l'embouchure de la rivière Piassina. En 1608, sur le chemin du retour, Moskvitin et certains membres de l'expédition moururent épuisés par les hivers rigoureux. Grâce aux documents rapportés par l'expédition de Luca Moskvitin, le marchand hollandais Isaac Massa (1612) a pu développer une carte des régions arctiques explorées. Ainsi, le monde a pu apprendre la position géographique de l'embouchure de l'un des plus grands fleuves du monde (Magidovič, 2000).

Trois cents ans plus tard, en 1906, la Compagnie d'Etat de navigation sur l'énisseï fut organisée et fonctionnait de Krasnoïarsk à l'embouchure du fleuve (Vdovin, 2004). La production de pêche de l'énisseï en fut immédiatement doublée et la navigation régulière sur le fleuve a catalysé une recherche pour créer

un chemin commercial navigable entre la Sibérie et l'Europe occidentale.

Au début du XX^e siècle, atteindre les îles de Brekh par l'ouest et la route maritime du nord était difficile. Le grand explorateur polaire et savant Fridtjof Nansen l'a réalisé avec ses compagnons à bord d'un navire norvégien. Pour ce « voyage dans l'océan Glacial sibérien sur le *Correct* » (Zimmermann, 1930, p. 432), trois russes l'accompagnaient : V.V. Lid, initiateur de cette expédition et fondateur de « la corporation Sibérienne de la navigation, de l'industrie et du commerce », V.V. Vostrotin, propriétaire des mines d'or, invité par V.V. Lid, et I.I. Loris-Melikov, secrétaire de l'ambassade de Norvège. Ils espéraient tous que Nansen pût ouvrir la voie navigable de la Sibérie via l'énisseï et les mers de Kara et de Barents pour le commerce avec l'Europe occidentale.

Ayant quitté le 5 août 1913 la ville de Tromsø au nord de la Norvège, le *Correct* atteint la mer de Kara le 10 août. A partir de là, F. Nansen fait diriger le navire par la Grande

Polynya Sibérienne. La Polynya est le passage au nord des péninsules de Yamal, de Gydan et de Taïmyr vers l'est, découvert en 1894 par l'autre expédition de Nansen avec le navire *Fram* (Gorshkov, 2011). La difficulté réside dans le fait de trouver un passage entre les glaces, ce qu'il parvient à faire le 12 août. Le *Correct* passe alors la péninsule de Yamal, puis arrive sur l'île de Dikson, située à l'extrémité ouest de la péninsule de Taïmyr le 24 août. Le 25 août, le navire atteint l'embouchure du fleuve énisseï et Nansen écrit : « quelle masse d'eau puissante coule dans l'océan ici ! C'est une forte impression, on sent le fait d'être à l'entrée de l'un des plus grands cours d'eau du monde » (Nansen, 1915, p. 76, en russe).

A cause des hauts fonds présents sur la berge occidentale de l'énisseï, l'allure du navire s'est ralentie. Grâce à la jonction avec le navire *Touroukhansk*, arrivé par le Sud et le fleuve énisseï, le *Correct* finit par atteindre un profond canal près de la berge orientale du fleuve le 28 août et s'ancre sur l'île Nossonovski, c'est-à-dire à l'extrémité nord-est des îles de Brekh actuelles (figure 2).

L'objectif de créer des liens commerciaux avec l'Europe est réussi : après 3 300 km parcourus depuis la Norvège et 2 200 km sur l'Ienisseï, le transbordement entre les deux navires peut donc s'effectuer. Les marchandises présentes sur le *Touroukhansk* sont alors embarquées sur le *Correct*, à savoir 1 000 tonnes de ciment, deux chameaux de Mongolie, deux ours de la taïga sibérienne, un loup, ainsi que les billes de pin sibérien (*Pinus sibirica*), de pin sylvestre (*Pinus sylvestris*), d'épicéa sibérien (*Picea obovata*), des balles de lin et de chanvre, du cuir, de la laine, des cornes de cerfs et des wapitis (Nansen, 1915). Cependant, cette première n'eut pas de suite immédiate. Il fallut attendre la fin de la Seconde Guerre mondiale pour que cette route commerciale prît son essor, au moment où Igarka devint un lieu d'exportation du bois vers l'Europe occidentale (Belocerkovskij, 1964).

Depuis les années 1970, les brise-glaces spécialement construits à cet effet font le chemin pour les convois qui transportent la production du Combinat Métallurgique et Minier de Norilsk du port de Doudinka sur l'Ienisseï jusqu'à Mourmansk, Kandalakcha et Arkhangelsk. Au retour, ils transportent des équipements et des biens de consommation (L'vov, 1984).

B- Le zakaznik des îles de Brekh au sein du zapovednik Grand Arctique

L'intégration de l'Union soviétique aux programmes internationaux pour la protection de l'environnement depuis les années 1970, en particulier pour la création des espaces protégés, a permis de répondre aux demandes de l'ONU, de l'UNESCO, de l'UICN et d'autres organisations internationales. À ce titre, il a été décidé la création de neuf espaces naturels protégés dans la Péninsule de Taïmyr et les territoires adjacents, qu'ils soient marins et terrestres, au sein du zapovednik (réserve naturelle) Grand Arctique couvrant une superficie totale de 42 000 km². Cette dynamique a été insufflée entre autres par l'importation en 1974 et 1975 de bœufs musqués en provenance du Canada.

Sept des espaces protégés ont le régime de zapovednik (réserve naturelle de protection stricte et permanente). Ce sont ceux de la Basse Taïmyra, de la Péninsule de Tchéliousskine, de Piassinsk, des îles de la mer de Kara, du Golfe de Middendorf, de l'archipel de Nordenskiöld et de Dikson-Sibiriaïkov (Syroečovskij *et al.*, 2000). Les deux autres espaces possèdent quant à eux le régime de zakaznik (territoire préservé, interdit à certaines saisons ou selon une durée déterminée, pour laisser à la faune le temps de se reproduire ou de se reconstituer, offrant un système contrôlé mais en partie ouvert en dehors de ces périodes) : ce sont la Terre du Nord (Sévernaïa Zemlia) et les îles de Brekh.

La réserve des îles de Brekh, constituée principalement de marais et de lacs, comprend aussi des zones humides situées à l'aval des affluents de l'Ienisseï. Sur sa berge occidentale, ce sont les rivières Mongotché, Tanama, la Grande Khéta et la Petite Khéta. Sur la rive orientale, les rivières se nomment Yakovlev et Mouksounikha. La réserve comprend encore une vaste zone au sud des îles de Brekh à l'ouest du bras principal de l'Ienisseï joignant des îles partagées par des chenaux. Ce sont les îles

de Nakhimov, Velikiy, Makarov, Kazan et certaines anonymes à l'embouchure des rivières Grande Khéta et Petite Khéta. Le modelé des îles voit se succéder des cuvettes marécageuses et des bourrelets de berge et autres accumulations alluviales. Les îles Mininskié situées à l'est du fleuve Ienisseï et du village de Karaoul ont été également attribuées à la réserve (**figure 2**). Au total, la surface de cette zone avec toutes les îles, y compris celles de Brekh, et les chenaux est d'environ 8 600 km².

Administrativement, la réserve est située dans la région d'Oust-Ienisseï, dans le district autonome de Taïmyr. La population locale est constituée d'environ 5 000 personnes, en grande partie des Russes, mais également des Dolgans, des Nenets et des Enets qui possèdent de nombreux sites religieux et cérémoniels. Les activités économiques sont étroitement liées à l'utilisation des ressources naturelles de la région comme l'élevage de rennes, la pêche et la chasse (notamment celle du renard polaire en hiver). La multiplication des points de pêche permanents et temporaires n'est pas sans poser un problème environnemental car ceux-ci ont un impact sur les conditions de vie des palmipèdes (Syroečovskij E.E. Mladšij, 2011, *Vodno-bolotnye ugodja Rossii*, non publié).

II- La contrainte du froid et ses conséquences sur ce milieu périglaciaire

La réserve des îles de Brekh appartient à la ceinture géographique arctique (Guljuk, 1984) où le paysage végétatif est formé par la toundra arctique. Au nord de cet espace domine la toundra naine typique, alors que la partie sud est occupée par une mosaïque de toundra, de prairies et de fourrés de saules et d'aulnes. Enfin, sur les élévations, nous trouvons une toundra arbustive où les saulaies sont sporadiques (Syroečovskij E.E. Mladšij, 2011, *Vodno-bolotnye ugodja Rossii*, non publié).

A- Un milieu physique insulaire typique de la ceinture géographique arctique

Dans cet espace plat, le micromodelé est le fait des terrasses alluviales de l'Ienisseï accidentées de buttes de ségrégation de glace, de polygones de toundras et de coins de glace (campagne de terrain de l'un des auteurs, S. Gorškov, en 1959). Les dépôts fluviatiles sont liés au transport solide par l'Ienisseï qui est d'environ 11 millions de tonnes par an (Lisicyn, 1978, Gordeev, 2012). Bien que huit grands barrages hydroélectriques aient été construits sur le fleuve ou ses affluents³ au cours du XX^e siècle (Avakjan *et al.*, 1987), réduisant de fait la charge en sédiments au niveau des biefs aval, l'augmentation de l'intensité de l'érosion dans ces zones a eu pour conséquence de permettre à l'Ienisseï aval (à partir d'Igarka) de conserver une concentration de matériaux en suspension identique.

3. Soit les réservoirs de Krasnoïarsk (100 mètres de hauteur) et de Saïano-Chouchensk (220 m de hauteur) sur le fleuve Ienisseï, ceux d'Irkoutsk (30 m de hauteur), de Bratsk (106 m de hauteur), d'Oust-Ilimsk (88 m de hauteur) et de Bogoutchany (70 m de hauteur) sur l'Angara et ceux de Koureïsk (72 m de hauteur) sur la rivière Koureïka et de Khantaïsk (50 m de hauteur) sur la Khantaïka (Avakjan *et al.*, 1987).

Ces sédiments, constitués de sables et limons cimentés par la merzlota, interstratifiés avec des débris végétaux et de la tourbe, forment des îles recouvertes à chaque débâcle annuelle de l'Ienisseï (l'archipel de Brekh ne dépassant jamais les 10 m de hauteur). De fait, V.I. Kravcova et E.V. Čerepanova (2003, p. 309) ont constaté que de 1955 à l'an 2000 la superficie des îles de Brekh avait augmenté de 41,6 km², portant celle-ci à 2 867 km². Les zones principales d'accumulation sont concentrées sur le bord nord des îles et sur les berges des chenaux, le taux d'accumulation pouvant atteindre jusqu'à 25 m/an, à savoir 0,05% de la superficie des îles par an pour la période étudiée (figure 3).

Sur le plan climatique, la température moyenne annuelle de l'air est d'environ -11°C, la température du mois le plus chaud (juillet) atteignant + 11-13°C. Les extrêmes thermiques pour leur part se situent à -56°C en janvier et + 31°C en juillet. Au cours des 50 dernières années, la température moyenne dans ce secteur de l'Arctique a augmenté de 0,8°C (figure 4). Les précipitations dans ce milieu sont peu importantes bien que non négligeables, à savoir 375 mm/an. La couverture de neige compte 244 jours et s'établit du 7-8 octobre au 7-8 juin (Alekseevskij, 2007).

En surface des îles, la dynamique morphologique périglaciaire joue à plein avec la présence de boulgouniakhs (buttes de gonflement avec la présence d'un cœur de glace) et de dépressions drainées par des petits lacs thermokarstiques et

figure 3 : Carte de la dynamique du delta intérieur de l'Ienisseï de 1955 à 2000 (d'après Kravcova V.I. et Čerepanova E.V., 2003).

L'Iénisseï à l'entrée de Krasnoïarsk (cliché : L. Touchart).

La photo est prise de Krasny Bérég, à l'endroit précis où l'Iénisseï quitte les monts Saïan pour entrer dans les plaines et plateaux de la Sibérie centrale. On aperçoit les constructions de l'agglomération millionnaire de Krasnoïarsk, à la traversée de laquelle l'Iénisseï se charge en polluants (métaux lourds et radionucléides).

figure 4 : Carte de l'augmentation de la température moyenne annuelle au centre de l'Arctique russe lors des 50 dernières années (d'après Alekseevskij N.I., 2007).

des zones humides aux chenaux asséchés. Les lacs présents dans ce milieu de toundra sont conformes aux lacs d'origine périglaciaire dont le fonctionnement morphologique (Tricart et Cailleux, 1967) et biogéochimique (Wetzel, 2001) est bien connu de la littérature internationale. Ils ont ici habituellement une faible profondeur de 2 à 3 mètres, pouvant parfois atteindre dans certains cas 15 à 20 mètres.

Pédologiquement, ces milieux donnent des sols principalement à gleys tout le long du profil avec un puissant horizon d'humus. La profondeur du dégel pour les années chaudes peut atteindre 1,5 à 2 m dans les sols sablonneux et 1 m dans les tourbières, mais se limite à 1,3 m pour les années froides.

Que ce soient la dynamique morphologique, pédologique et même hydrologique, tout ce milieu dépend donc du gel et du dégel de la fine épaisseur de glace présente sur ou dans le sol. De fait, comprendre les mutations de cet environnement revient à s'intéresser à la géocryologie.

B- L'évolution géocryologique de cet espace périglaciaire

Plusieurs générations d'héritages se succèdent dans la région, modelées par plusieurs changements dans les conditions subaériennes et subaquatiques : les glaciations pléistocènes ; la formation d'une couverture de loess sous laquelle il est possible de trouver des fossiles d'animaux et de végétaux au sein des dépôts périglaciaires ; l'héritage du pergélisol continu et de manifestations de divers processus cryogéniques anciens inhérents à la zone périglaciaire, comme les gonflements dus au gel, la gélifluxion, le mouvement des mers de pierre, les polygones délimités par des

coins de glace ; des dépôts alluvionnaires et des reprises d'érosion linéaire dans ceux-ci, des défluviations des cours d'eau (Gorškov et al., 2003).

Au cours de l'été 1959, sur la deuxième terrasse de rive gauche de l'Ienisseï, à une latitude de 59°35', l'un des auteurs (S. Gorškov) a découvert dans des vallons subméridionaux de 100 à 300 m de large et 1 à 2 km de long, une structure polygonale abritant des trous d'eau dans des marécages de forme géométriques délimités par des bourrelets de 1 à 2 m de large et de 10 à 15 m de long. La profondeur des trous d'eau pouvait atteindre 1 m à 1,20 m et les bourrelets bordaient des coins de glace.

Leur dégel observé en 2009 (S. Gorškov) s'est révélé catastrophique pour l'aval de la plaine d'inondation de la rivière Kotchoumdek (qui se situe à une altitude de 5-6 m), laquelle se jette ensuite dans la Toungouska Pierreuse. La raison de ce dégel brutal est à rechercher du côté de la mise en valeur humaine de cet espace. En effet, la destruction des fourrés denses de saule et d'aulne visant à augmenter la superficie des prairies vouées à la fenaison a provoqué l'apparition de puits de 3 m de profondeur et 1,30 m de diamètre. Ce processus a pris 2-3 ans et a eu pour conséquence directe de faire affleurer dans la plaine d'inondation des polygones et des coins de glace auparavant enfouis sous plus d'un mètre d'alluvions et qui ont fondu au contact avec l'air libre.

D'après les images satellites Landsat 8 OLI/TIRS C travaillées par l'un des auteurs (Z. Bortonovskij), les îles de Brekh sont constituées du même type de structure à buttes de gonflement, polygones et coins de glace, il est donc probable qu'une telle exodynamique engendre des résultats similaires à ceux observés par S. Gorškov. Toutefois, le substrat est différent puisque des dépôts congelés glacio-marins et marins de 120 m d'épaisseur (où des glaces massives du Pléistocène moyen et inférieur sont incluses) sont présents sous les sédiments deltaïques (Svitoč, 2003 ; Špoljanskaja, 2015). Ces sédiments du Pléistocène remplissent la profonde incision préglaciaire de la vallée de l'Ienisseï, semblable aux autres grandes vallées fluviales du plateau continental arctique russe (Svitoč, 2003).

III- Les îles de Brekh, interface environnementale entre le bassin de l'Ienisseï et la mer de Kara

Dans le bassin de l'Ienisseï (2 580 000 km² de superficie), les signaux des changements naturels et artificiels s'intègrent et affectent non seulement le delta, mais aussi de manière significative la mer de Kara. Par l'intermédiaire de l'Ienisseï, la zone arctique

reçoit ainsi la chaleur accumulée par l'eau, mais aussi les sédiments, les substances biogènes et les polluants, y compris les radionucléides (Ajbulatov, 2000 ; Gordeev, 2012 ; Linnik et al., 2016).

A- La mer de Kara

La mer de Kara est la moins salée des mers arctiques (Karabaev, 1973), car elle reçoit énormément d'eau douce via les nombreux fleuves qui s'y jettent. L'énisseï y apporte en moyenne, pour la période 1940-2010, 624 km³ d'eau par an (Dobrovol'skij, 2011). A ces écoulements s'ajoutent ceux du golfe de l'Ob, à savoir l'Ob lui-même mais aussi le Taz et le Pour (530 km³/an), de la Piassina (82 km³/an) et de la Taïmyra inférieure (38 km³/an) (Trěšnikov, 1983). Au total, ce sont 1274 km³ d'eau par an qui alimentent la mer de Kara. Cependant, ces chiffres ne tiennent pas compte de la présence d'environ 40 petits fleuves côtiers sur les péninsules de Taïmyr, de Gydan, de Yamal et d'Ougra : par conséquent, P.N. Makkaveev (2015) estime que le débit annuel aboutissant dans la mer de Kara est de l'ordre de 1350 km³.

La mer de Kara étant une mer épicontinentale, elle est extrêmement plane et sujette à d'importantes remontées d'eau marine (à 500 km de l'embouchure dans le golfe de l'énisseï, la ligne d'eau des étiages en été n'est qu'à 1 m au-dessus du niveau de la mer) et les crues inondent les parties basses de vallées sur une très grande surface.

Au niveau sédimentaire, la mer de Kara reçoit chaque année 11 millions de tonnes de matières solides (90% en suspension et 10% en transport de fond) par l'énisseï et 14,9 millions de tonnes par l'Ob (Lisicyn, 1978). Une couche d'eau superficielle dessalée et riche en particules fines joint chaque été les embouchures aux îles de la Nouvelle-Zemble, couvrant alors toute la mer de Kara (Zav'jalov et al., 2015), fait augmenter la productivité d'écosystèmes marins pauvres par ailleurs et provoque un renouvellement salutaire des eaux marines.

Cependant, il existe aussi des aspects négatifs à ce fonctionnement en lien notamment avec l'anthropisation des bassins fluviaux.

B- La contamination par des radionucléides de la vallée de l'énisseï

Le problème de la pollution radioactive de l'énisseï doit être pris en compte pour préserver l'équilibre écosystémique du fleuve lui-même et de la mer de Kara.

photo 3 : L'énisseï près du confluent avec la Toundgouska Pierreuse (cliché : S. Gorškov). La photo est prise à l'endroit où, à l'époque soviétique, les autorités envisageaient de construire le barrage d'Ossinovsk, un peu en amont du confluent avec la Podkamennaja Toundgouska. Après la rencontre avec cet affluent, l'énisseï écoule un module brut de 9 300 mètres cube par seconde.

N.A. Ajbulatov (2000) brossa la situation à l'échelle macro-régionale à la fin des années 1990, indiquant que la radioactivité artificielle de la mer de Kara était liée à l'enfouissement de déchets, à des essais d'armes nucléaires, à des émissions industrielles provenant tant de Russie que d'Europe de l'Ouest, mais aussi aux conséquences de l'accident de Tchernobyl, ainsi qu'à une contamination locale due aux essais atomiques en Nouvelle-Zemble. Le même auteur note que la part des apports fluviaux de l'Ob et de l'énisseï en radionucléides artificiels est faible dans la pollution de la mer de Kara, tout en affirmant que « le plus haut niveau d'activité pour le ¹³⁷Cs est observé au niveau des estuaires des fleuves Ob et lenisseï et leurs abords marins » (Ajbulatov, 2000, p. 265, en russe). De fait, le niveau maximum d'activité de 100 Bq/kg pour le ¹³⁷Cs a été enregistré en 1993 à l'embouchure du fleuve lenisseï (Ajbulatov, 2000), justement à côté des îles de Brekh.

photo 4 : Les polygones de toundra des plaines deltaïques polaires russes (cliché : V. Tumskoj). Dans le delta interne de l'énisseï, le micro-modèle des îles de Brekh est formé de grands polygones de toundra. En été, chaque bloc central, légèrement déprimé, est susceptible de recueillir un peu d'eau de fonte, formant autant de petites mares. Les périmètres plus clairs sont des veines et des coins de glace. La photo est prise dans le delta de la Yana.

La part de pollution amenée par le fleuve lenisseï provient du Combinat extractif chimique, le G.Kh.K., construit au milieu des années 1950 sur la rive est du fleuve à 40 km en aval de Krasnoïarsk. Ce combinat produisait du plutonium et des armes nucléaires (Ajbulatov, 2000) avant de diversifier ses fonctionnalités. À la fin 2014, ses activités principales sont : 1) le transport et le stockage du combustible nucléaire usé ; 2) la production d'énergie thermique pour le chauffage et l'eau chaude de la ville de Jeleznogorsk (Železnogorsk) ; 3) le démantèlement

Le confluent de l'Iénisseï et de l'Angara (cliché : L. Touchart). La rencontre des deux gros cours d'eau sibériens produit un module brut de 7 800 mètres cube par seconde. La photo est prise exactement à la Strelka (confluent ayant la forme d'une aiguille) en se tournant du côté de l'Angara, descendue par des trains de bois flottés issus de l'exploitation de la taïga.

des objets de l'industrie militaire ; 4) la construction du stockage « sec » et le fonctionnement « humide » des technologies de déchets nucléaires ; 5) la mise en place d'une usine de production de combustibles pour les réacteurs surgénérateurs rapides ; 6) la création d'un centre pilote de démonstration pour le retraitement de déchets nucléaires (www.sibghk.ru).

Dans le passé, à cause de la décharge des déchets liquides dans l'Ienisseï par ce combinat, les sédiments de fond accumulaient des radionucléides, principalement lors des inondations (Suhorokov et al., 2000). Les particules vaseuses et argileuses (de 0,01 à 0,001 mm), ainsi que les biogènes ont eu tendance à absorber les radionucléides artificiels ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{90}Sr , ^{239}Pu , ^{60}Co . Ce processus a eu lieu dans la partie intérieure de la plaine d'inondation de l'Ienisseï, dans d'autres dépressions et des bras morts, à savoir dans des canaux séparés du chenal principal. Mais les activités du Combinat sont actuellement partiellement suspendues (Rezwickij, 2007, Touchart, 2014), en réponse à une action similaire aux États-Unis (communication orale, A.Ju. Ozerskij). La surveillance de la contamination par les radionucléides s'est progressivement organisée dans le cours moyen du fleuve Ienisseï. Les sites-tests sont l'île Atamanovski, en 8 km en aval de Combinat, l'île Beresovy en 20 km et la zone du village Kazatchinskoé en 180 km (Linnik et al., 2016). Il semble que le risque de la contamination par les radionucléides du système moyen et inférieur de l'Ienisseï incluant les îles de Brekh ait considérablement diminué. Le risque a, par conséquent, aussi diminué pour la mer de Kara, mais il dépend beaucoup de leur migration à partir de la côte est de la Nouvelle-Zemble.

Conclusions et discussions sur les risques pour l'écologie des îles arctiques ou l'opportunité pour le développement des steppes méridionales d'une dérivation de l'eau de l'Ienisseï

Deux grandes visions continuent à s'opposer aujourd'hui chez les chercheurs russes qui travaillent sur le milieu géographique de l'Ienisseï, concernant l'opportunité ou non d'améliorer l'alimentation en eau d'une partie des steppes kazakhes par le détournement d'eau provenant du grand fleuve sibérien. C'est que le vieux projet soviétique dit Sibaral ou le plan Davydov (Baby, 1952, Radvanyj, 1982) discuté de l'après-guerre aux années 1970 sous différentes versions et abandonné au milieu des années 1980, est périodiquement réactivé, sous des formes en général très réduites, par les autorités politiques (Allouche, 2004), tant celles de la Fédération de Russie que des républiques d'Asie centrale, le président du

photo 5 : La population du cours inférieur de l'Ienisseï (cliché : S. Gorškov). Les Vieux-Croyants constituent la population russe traditionnelle de la moyenne et basse vallée de l'Ienisseï. Quand ils défrichent les petits bois de saules et d'aulnes pour agrandir leurs prairies de fauche, cela peut provoquer la fonte partielle de certaines formes merzlotiennes. Le Vieux-Ritualiste photographié raconte comment il est tombé dans un puits d'eau profond provoqué par la fonte dans un polygone.

Kazakhstan ayant encore relancé l'idée en 2010.

L'étude des îles de Brekh donne quelques connaissances supplémentaires enrichissant le débat, si on les considère comme un indicateur intégrant l'évolution du milieu et les conséquences de la pression anthropique. S'appuyant sur les conclusions de V.I. Kravcova et E.V. Čerepanova (2003) et sur ses campagnes de terrain commencées dans les années 1950, l'un des auteurs du présent article (S. Gorškov) préconise de dériver une partie des eaux de l'Ienisseï en direction de l'Irtych, en s'appuyant sur les éléments suivants.

L'étude de la dynamique des îles effectuée par V.I. Kravcova et E.V. Čerepanova (2003), en comparant des cartes topographiques des années 1950 à l'échelle du 1 / 100 000 avec des images MSS/Landsat de 1973 et ETM/Landsat de 1999 et de 2000, leur a permis de conclure que « malgré des nombreux réservoirs construits dans le bassin de l'Ienisseï,

ces ingénieries hydrauliques n'ont pas provoqué de changements importants sur le cours inférieur du fleuve. La cascade de grands réservoirs sur l'Ienisseï et sur ses affluents n'a réduit le débit d'eau du fleuve que de 1% » (en russe). En outre, contrairement à l'embouchure de beaucoup de grands fleuves mondiaux fortement perturbés par la pression anthropique sur tout ou partie de leur bassin (Mississippi, Nil, Irrawaddy, fleuve Jaune ...), le delta de l'Ienisseï n'a que peu subi de modifications au cours des dernières décennies et a été conservé dans un état quasi-naturel.

Or, la stabilité des îles du delta est importante pour la compréhension de la réponse du milieu à la création des huit grands réservoirs dans le bassin de l'Ienisseï. Durant la période de remplissage de ces réservoirs, soit de 1957 à 2015, le déficit d'écoulement de l'Ienisseï cumulé sur les 59 ans a été de seulement 476 km³. Cela signifie, comme l'un des auteurs du présent article l'a déjà écrit, que les pertes en eau de l'Ienisseï par l'artificialisation du bassin ne dépassent pas 1 à 2 % de l'écoulement (Gorškov et Tel'nova, 2012). Par conséquent, S. Gorškov pense qu'il serait possible d'utiliser le canal de la rivière Ket' à la rivière Kas (figure 5), construit au XIX^e siècle, pour transporter 10 à 12 km³ d'eau de l'Ienisseï vers l'Ob via l'Irtych.

Au contraire, s'appuyant sur le traitement d'images satellites et des campagnes de terrain commencées dans les années 2010, un autre des auteurs du présent article (Z. Bortnovskij) estime que l'intégrité du bassin de l'Ienisseï ne doit pas être perturbée car il agit comme un phénomène auto-régulatif naturel. Il insiste en plus sur le fait que ce projet n'a pas le même intérêt géopolitique qu'à l'époque soviétique, car l'amont de l'Irtych se situe au Kazakhstan et non en Russie, et

figure 5 : Schéma en perspective du transfert de bassin de l'Ienisseï à l'Irtych (d'après Gorškov S.P. et Tel'nova N.O. 2012).

les eaux de l'Irtych Noir sont dérivées pour partie vers la Chine par le canal Karamaï, mais également vers Karaganda au Kazakhstan.

Quelle que soit celle des deux actions possibles, l'ensemble des auteurs se rejoint sur la conclusion que, dans un avenir proche, la réserve des îles de Brekh n'est pas menacée par une variation importante de la quantité d'eau et de sédiments en transit. Elle est également protégée naturellement grâce à la faible activité d'abrasion de la mer de Kara. Cependant, bien que la hauteur des marées, principalement semi-diurnes, ne soit que rarement supérieure à 0,8 m et bien que les variations saisonnières de niveau de la

mer de Kara dans la baie ne dépassent pas 0,3 m (Kravcova et Čerepanova, 2003), nous suggérons de les prendre davantage en compte grâce à l'analyse comparative des images de satellites.

Remarque : Sauf indication contraire, les noms russes de personne sont écrits dans la transcription internationale ISO/R 9:1968 du cyrillique, afin de donner des références bibliographiques incontestables, tandis que les noms de lieu, dont la francisation est en général bien établie, sont écrits dans l'orthographe française la plus courante (Ienisseï par exemple).

Références bibliographiques

- Alekseevskij N.I., Red., (2007).** *Geoëkologičeskoe sostojanie Arktičeskogo poberež'ya Rossii i bezopasnost' prirodopol'zovanija*. Moskva, GEOS, 585 p.
- Allouche J., (2004).** Continuité et discontinuité dans la politique de l'eau en Asie centrale, *Cahiers d'Asie centrale*, 13/14 : 285-300.
- Avakjan A.B., Saltankin V.P., Šarapov V.P., (1987).** *Vodohranišča*. Moskva, Mysl', 325 p.
- Ajbulatov N.A. (2000).** *Ekologičeskoe èho holodnoj vojny v morjah Rossijskoj Arktiki*. Moskva, GEOS, 307 p.
- Guljuk G.I., Red., (1984).** *Klimatičeskoe rajonirovanie*, in *Geografičeskij atlas SSSR*. Moskva, GUGK, 252 p. : 98.
- Baby J., (1952).** Les grands travaux et la lutte pour la transformation de la nature en URSS, *L'Information Géographique*, 16(2) : 43-51.
- Belocerkovskij M.Ju., (1964).** *Sibir'.* Fotoal'bom. Moskva, Mysl', geografičeskaja serija naša rodina, 239 p.
- Carre F., (2001).** XLVIII^e chronique océanographique, *Norais*, 188(4) : 107-152.
- Dobrovol'skij S.G., (2011).** *Global'nye izmenenija rečnogo stoka*. Moskva, GEOS, 660 p.
- Gordeev V.V., (2012).** *Geohimija sistemy reka – more*. Moskva, Sam Poligrafist, 452 p.
- Gorshkov S.P. (2011).** Fridtjof Nansen (on the 150th of anniversary of his birth), *Geography, Environment, Sustainability*, 4 (4) : 132-138.
- Gorškov S.P., Tel'nova N.O., (2012).** "Celesoobraznost' sozdanija Rossijsko-Kazahstanskoy vodohozjajstvennoj sistemy: geoëkologičeskij podhod" in *Rossija i ee regiony: integracionnyj potencial, riski, puti perehoda k ustojčivomu razvitiu*. Moskva, KMK, Serija Ustojčivoye razvitie: problememy i perspektivy, vol. 5 : 205 – 214.
- Gorškov S.P., Vandenberg G., Alekseev B.A., Močalova O.I., Tiškova M.A., (2003).** *Klimat, merzloty i landšafy Sredneenisejskogo regiona*. Moskva, Geografičeskij fakul'tet MGU, 96 p.
- Karabaev G.S., Red., (1973).** *Resursy poverhnostnyh vod SSSR*. Leningrad, Gidrometeoizdat, tom 16 "Angaro-Enisejskij rajon", v. 1 "Enisej", 723 p.
- Kravicova V.I. et Čerepanova E.V., (2003).** *Dinamika del't rek Jeniseja i Pura*, *Vodnyye resursy*, 30(3) : 304-311.
- Linnik V.G., Ivanickij O.M., Sokolov A.V., Sokolov P.V., (2016).** Organizacija racional'nogo radioëkologičeskogo kadastra doliny r. Jenisej dlja ocenki radiacionnogo vozdejstviya na okružajuščuju sredu i naselenie, in *Sergeevskie čtenija. Inženernaja geologija i geoëkologija. Fundamental'nye problememy i prikladnyye zadachi*. Moskva, RUDN, Vol. 18: 633-637.
- Lisicyn A.P., (1978).** *Processy okeanskoj sedimentacii*. Moskva, Nauka, 390 p.
- L'vov A.L., (1984).** *Bol'soj Noril'sk*. Moskva, Metallurgija, 160 p.
- Magidovič V.I., Red., (2000).** *Arktika – moj dom : istoriya osvojenija severa v biografijah znamenityh ljudej*. Moskva, Severnyye Prostory, 280 p.
- Marchand P., (1993).** Géopolitique de l'eau sur le territoire de l'ex-URSS, *Revue géographique de l'Est*, 1 : 37-76.
- Makkaveev P.N., (2015).** Vlijaniye materikovogo stoka na gidrohimičeskij režim Karskogo morja, in *Ekosistemy Karskogo morja – novye dannye èkspedicionnyh issledovanij. Materialy naučnoj konferencii*. Moskva, APR : 50- 53.
- Mihajlov V.N., (1997).** *Ust'ja rek Rossii i sopredel'nyh stran, prošloe, nastojaščee, buduščee*. Moskva, GEOS, 413 p.
- Mihajlov V.N., Dobrovol'skij A.D., Dobroljubov S.A., (2008).** *Gidrologija*. Učebnik dlja vuzov. Moskva, Vysshaya škola, 3^e éd., 463 p.
- Nansen F., (1915).** *V stranu buduščego*. Petrograd, Ksido, 454 p.
- Radvanyj J., (1982).** *Le géant aux paradoxes, fondements géographiques de la puissance soviétique*. Paris, Editions Sociales, 423 p.
- Rezvickij E.V., (2007).** *Ocenka zagriznenija territorii Krasnojarskogo kraja tehnogennym radionuklidami v zone vlijanija FGUP «Gornohimičeskij kombinat»*. Krasnojarsk, kandidatskaja dissertacija himičeskij nauk, special'nost' : èkologija, 115 p.
- Svišč A.A., (2003).** *Morskoy plejstocen poberežij Rossii*. Moskva, GEOS, 362 p.
- Suhorukov F.V., Mel'gunov M.S. & Kovalev S.I., (2000).** *Osnovnye čerty raspredelenija tehnogennyh radionuklidov v alljuvial'nyh počvah i donnyh osadkah reki Enisej*, *Sibirskij èkologičeskij žurnal*, 1 : 39-50.
- Syroëčovskij E.E., Rogačeva E.V., Syroëčovskij E.E. Mladšij, (2000).** *Bol'soj Arktičeskij zapovednik*, in *Zapovedniki Sibiri*, Moskva, LOGATA, t. 2 : 56-81.
- Špoljanskaja N.A., (2015).** *Plejstocen-golocenovaja istorija razvitija kriolitozony «glazami» podzemnyh l'dov*. Iževsk, Iževskij Institut komp'yuternykh issledovanij, 344 p.
- Touchart L., (2008).** *Ienisseï*, in Graf E., Rouanet H. & Mayorkas J., *Encyclopædia Universalis* Paris, 30 vol., 6^e éd., 32 616 p., vol. 12, 993 p. 198-200.
- Touchart L., (2014).** *La pollution radioactive, une concentration dans les bassins de l'Ob et de l'Iénisseï ?*, in *Les territoires de l'eau en Russie*. Paris, L'Harmattan, 333 p. : 246-249.
- Trěšnikov A.F., Red., (1983).** *Geografičeskij ènciklopedičeskij slovar'*, Moskva, Sovetskaya ènciklopedija, 528 p.
- Tricart J. & Cailleux A., (1967).** *Traité de géomorphologie. Tome II Le modelé des régions périglaciaires*. Paris, Sedes, 512 p.
- Vdovin, A.S., Red., (2004).** *Enisejskaja provincija. Al'manah*. Krasnojarsk, RIO GOU VPO KGPU im. V.P. Astaf'eva, Vol. 1, 112 p.
- Wetzel R.G., (2001).** *Limnology, lakes and river ecosystems*. San Diego, Academic Press, 1006 p.
- Zav'jalov P.O., Ižickij A.S., Osadčev A.A. i dr., (2015).** *Struktura termohalinnyh i biooptičeskikh polej na poverhnosti Karskogo morja osen'ju 2011 goda*, in *Ekosistemy Karskogo morja – novye dannye èkspedicionnyh issledovanij. Materialy naučnoj konferencii*. Moskva, APR : 15-18.
- Zimmermann M., (1930).** *Fridtjof Nansen*, *Annales de Géographie*, 39(220) : 432-436.

Le barrage de Divnogorsk (cliché : L. Touchart). Derrière les argousiers et les pins, l'Iénisseï sort du barrage de Divnogorsk-Krasnoïarsk, qui alimente la seconde station hydroélectrique la plus puissante de Russie. La digue, haute de 124 m, a été terminée dans les années 1960. En aval des deux barrages, l'érosion a été ravivée et le fleuve en transporte les sédiments jusqu'à l'embouchure.

Île de Mull, les Hébrides
intérieures, Écosse (cli-
ché : A.-M. Meyer).