Le risque d'inondation de débâcle et le réchauffement climatique à Yakoutsk (Russie)

Romain Rollot, Jean-Louis Ballais, Sébastien Gadal, Yuri Danilov

▶ **To cite this version:**

Romain Rollot, Jean-Louis Ballais, Sébastien Gadal, Yuri Danilov. Le risque d'inondation de débâcle et le réchauffement climatique à Yakoutsk (Russie). Geo-Eco-Trop, 2017, 41 (3), pp.463 - 477. hal-01701061

HAL Id: hal-01701061
https://amu.hal.science/hal-01701061

Submitted on 9 Feb 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Geo-Eco-Trop., 2017, 41, 3, n.s.: 463-477

Numéro spécial

Le risque d'inondation de débâcle et le réchauffement climatique à Yakoutsk (Russie)

Break-up flood risk and climatic warming in Yakoutsk (Russia)

Romain ROLLOT[1], Jean-Louis BALLAIS[1], Sébastien GADAL[1,2] & Youri DANILOV[2]

Abstract : The Léna river is the major axis that structures a part of central and oriental Siberia. Real motorway in winter and seaway in summer, it is the only way that allows the goods transportation in quantity.

More than 40 % of the Saka Republic (Yakoutia) inhabitants live along the Léna. It was the main antropisation axis and is the main urbanization axis at the present day.

Its nival regime is characterized by a great excessiveness due to the cold continental climate and opposes low winter flows to enormous spring flows during break-up.

Climatic warming during the end of XXth century causes increase of flow, thickening of permafrost active band and thinning down of superficial ice layer in winter. In spring, melting is earlier in May and daily discharges are lower in June.

There a few change in summer but September and October discharges decrease. In total, even if the mean annual discharge weakly increases, there is no increasing of the peak flow and thus of the flood risk. Exposure of population to flood risks has been considerably increased by the urban growth of Yakoutsk.

Key-words **:** Léna river**,** break-up, anthropisation, climatic warming, oriental Siberia.

Résumé : La Léna est l'axe majeur structurant l'espace géographique d'une partie de la Sibérie centrale et orientale. Véritable autoroute en hiver et voie maritime en été, elle constitue la seule voie permettant le transport des marchandises en grande quantité. Plus de 40% des habitants de la République de Saka (Yakoutie) habitent le long de la Léna. Elle fut l'axe principal d'anthropisation et aujourd'hui d'urbanisation.

Son régime nival se caractérise par une forte immodération due au climat froid continental et oppose de faibles débits hivernaux à d'énormes débits printaniers lors de la débâcle.

Le réchauffement climatique de la fin du XX^{ème} siècle se marque, en hiver, par l'accroissement du débit, l'épaississement de la couche active du pergélisol, et la diminution de l'épaisseur de la couche de glace superficielle. Au printemps, la fusion est plus précoce en mai et les débits journaliers plus faibles en juin. L'été présente peu de changement alors que les débits de septembre et d'octobre diminuent. Au total, même si le débit annuel moyen augmente légèrement, on n'observe pas d'accroissement du débit de pointe et donc du risque d'inondation. L'exposition des populations aux risques d'inondation s'est considérablement accrue avec la croissance urbaine de la ville d'Yakoutsk

Mots-clés **:** Léna, débâcle, anthropisation, réchauffement climatique, inondation, Sibérie orientale.

[1] Aix-Marseille Université, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-en-Provence, France. jean-louis.ballais@orange.fr
[2] North Eastern Federal University, Department of Geography, Yakoutsk, Russie

INTRODUCTION :
UNE GEOGRAPHIE PHYSIQUE DE LA DEMESURE

Dans un territoire aussi vaste que l'Inde, la République de Sakha ou Yakoutie (environ 3,1 x 10^6 km^2 et 956 712 habitants (estimation en 2015)) connaît une faible diversité paysagère. Le plateau de Sibérie centrale s'étend dans la partie ouest, sur la rive gauche du fleuve Léna. Le plateau de l'Aldan occupe le sud de la région entre les cours de la Léna et de l'Aldan (fig. 1). Hormis les plaines qui bordent l'océan Arctique au nord (plaine de la Kolyma) et certains cours d'eau, le reste de la Yakoutie est essentiellement montagneux. A l'est de la Léna, les reliefs culminent à 3 000 mètres dans les monts Tcherski (le point culminant est le mont Pébéda : 3 003 m). Au sud, l'altitude s'élève jusqu'à plus de 2 200 mètres. Plusieurs grands fleuves drainent ce vaste territoire. Ils ont pour particularité de suivre tous un écoulement Sud-Nord et de se jeter dans les mers du sud de l'océan Arctique. Ce réseau hydrographique est dominé par la Léna longue de 4 400 km et dont le bassin versant (2,49 x 10^6 km^2) est le septième plus grand de la planète et le troisième de Russie.

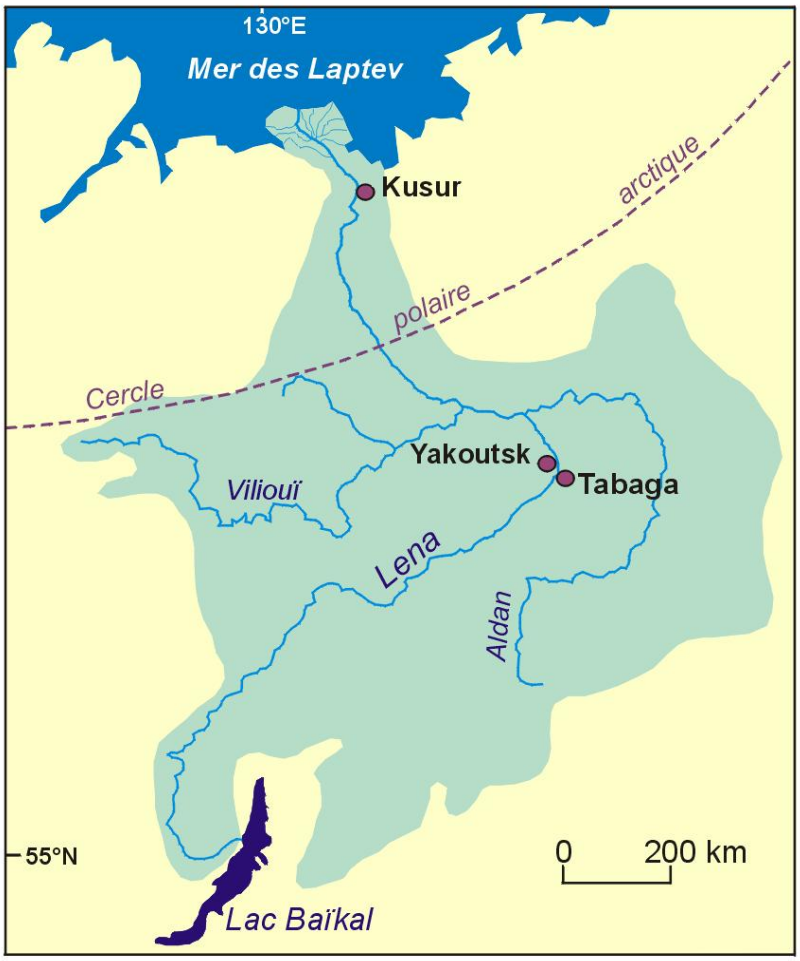

Figure 1 : La Léna et ses principaux affluents (source : R. ROLLOT, 2015).

La ville de Yakoutsk, capitale de la République de Sakha, est la ville la plus froide du monde avec des hivers très longs (7 mois ont une température moyenne inférieure à 0 °C) et des températures en janvier régulièrement inférieures à - 40 °C (tableau I, figure 8). Le minimum est de - 64,4 °C, tout proche du minimum absolu du globe hors Antarctique enregistré un peu au nord-est à Verkhoïansk (- 69,8 °C). En revanche, si l'été est à peine marqué, avec une moyenne de juillet qui n'atteint pas 20 °C, de fortes chaleurs peuvent dépasser 35 ° C en juin, juillet et août (tableau I). Au total, la ville détient le record de l'amplitude thermique annuelle.

Tableau I : Climat de Yakoutsk (source : Pogoda.ru.net).

Mois	jan.	fév.	mars	avril	mai	juin	juil	aoû	sep.	oct.	nov.	déc.	An.
Température minimale moyenne (°C)	−41,5	−38,2	−27,4	−11,8	1	9,3	12,7	8,9	1,2	−12,2	−31	−40,4	**−14,1**
Température moyenne (°C)	−38,6	−33,8	−20,1	−4,8	7,5	16,4	19,5	15,2	6,1	−7,8	−27	−37,6	**−8,8**
Température maximale moyenne (°C)	−35,1	−28,6	−12,3	1,7	13,2	22,4	25,5	21,5	11,5	−3,6	−23,1	−34,3	**−3,4**
Record de froid (°C)	−63	−64,4	−54,9	−41	−18,1	−5,4	−1,5	−7,8	−14,2	−40,9	−54,5	−59,8	**−64,4**
Record de chaleur (°C)	−5,8	−2,2	8,3	21,1	31,1	35,1	38,4	35,4	27	18,6	3,1	−3,9	**38,4**
Précipitations (mm)	9	8	7	8	20	35	38	37	31	18	16	10	**237**

LE REGIME DE LA LENA ET SON EVOLUTION AU XX^{ème} SIECLE

La Léna

Plus qu'un simple décor, le fleuve est l'axe structurant l'espace et la vie de cette partie du monde. « Autoroute de glace » en hiver et voie maritime en été, la Léna est la seule véritable voie permettant le transport en grandes quantités de marchandises et de matières premières pour Yakoutsk et sa région. Quand on sait que Yakoutsk se situe à plus de 1 500 kilomètres à vol d'oiseau de tout autre grand centre urbain, et que l'économie régionale est déterminée par l'import-export, l'importance du fleuve prend tout son sens.

Toutefois, la Léna constitue aussi une barrière : par exemple, aucun pont ne relie encore la rive droite à la rive gauche. De plus, à cause de la débâcle, elle est impraticable au printemps et, en été, la navigation peut être rendue difficile à cause du déplacement des bancs de sable, conséquence de la débâcle.

Le régime de la Léna

Le module moyen de la Léna est de 7 007 m^3/s à Tabaga, à l'amont de Yakoutsk. Le régime nival du fleuve se caractérise par une forte immodération due au climat froid continental et oppose de faibles débits mensuels hivernaux (916 m^3/s en avril (https://fr.wikipedia.org/wiki/Léna)) à d'énormes débits printaniers lors de la débâcle (23 561 m^3/s en juin).

La débâcle est régie par des conditions thermiques, hydrologiques et mécaniques particulières. Les conditions thermiques sont très importantes : ce sont elles qui déterminent la formation et la fusion des glaces, la fonte des neiges ainsi que le ruissellement (ETTAMA, 2005). Lorsque l'air se réchauffe au printemps et que le soleil se fait plus haut dans le ciel, leurs actions conjointes provoquent la fonte des premières couches superficielles de glace alors que l'écoulement est encore extrêmement limité. C'est un évènement bénin, parfois appelé débâcle thermique (BELTAOS, 1997), mais c'est toutefois une étape nécessaire de la débâcle.

Le phénomène de débâcle repose aussi sur un certain nombre de conditions hydrologiques qui dépendent de la quantité de précipitations (neige et pluie) tombée dans le bassin versant, et du ruissellement. Ces facteurs ont une influence directe sur l'augmentation du débit du fleuve, sur l'évolution du niveau d'eau, et donc, indirectement, sur l'épaisseur des embâcles et le niveau d'inondation.

Autre déterminant important de la débâcle : les conditions mécaniques. Ce sont les modalités associées à la fracturation de la couverture de glace, au transport des glaçons et à leur accumulation

(ETTAMA, 2005). Les facteurs mécaniques à considérer dans l'élaboration de ces processus sont : la morphologie des chenaux, la « résistance à l'écoulement », le volume de glace, les caractéristiques de l'embâcle et la température des eaux. La morphologie des chenaux affecte la profondeur de la lame d'eau, la vitesse de l'écoulement et la distribution du débit. La « résistance à l'écoulement » (« flow resistance », ETTAMA, 2005) résulte de la rugosité du lit du cours d'eau et de celle de la couche de glace présente sous la surface. Pour ce qui est du volume de glace présent sur le fleuve et de la température de l'eau, ils affectent la résistance de la couche englacée et des embâcles.

Toutes ces conditions sont liées les unes aux autres. Ce sont les conditions thermiques qui enclenchent le processus de débâcle par la fonte des glaces et des neiges et l'augmentation des précipitations en amont du bassin versant. Pourtant, ce sont les différentes conditions mécaniques qui prédominent dans le processus de libération des eaux d'un cours d'eau de l'emprise des glaces et dans la formation d'embâcles (BELTAOS, 1997). L'augmentation des températures de l'air et de la surface engendre une élévation du débit d'abord en amont, au sud, et un accroissement de la température de l'eau. Ensuite, ce sont les différentes spécificités morphologiques du cours d'eau et les caractéristiques mécaniques de la glace qui déterminent la puissance de la débâcle (DMITRY *et al*., 2005). Phénomène complexe, il est encore très difficile d'élaborer de manière fiable des modèles de prévision des impacts de la débâcle sur un territoire (BELTAOS, 2008).

Photo 1 : Blocs de glace charriés lors de la débâcle de la Léna à Tabaga le 11 mai 2015 (Cliché R. ROLLOT).

Photo 2 : Début de débâcle de la Léna à Tabaga le 9 mai 2015 (Cliché R. ROLLOT).

Durant cette période, qui a généralement lieu dans le deuxième et le troisième quart du mois de mai, le débit augmente subitement et le volume d'eau écoulé peut croître de 20 à 45 fois (GAUTIER & COSTARD, 2000). A Tabaga, le débit mensuel moyen peut atteindre jusqu'à 50 000 m^3/s (COSTARD & GAUTIER, 2008) et dépasser 100 000 m^3/s à la tête du delta (figure 2). Ces débits sont

d'autant plus impressionnants que tout ceci se produit en l'espace de quelques jours seulement. Par conséquent, la ligne d'eau à Yakoutsk s'élève entre 8 et 10 m durant cette période (GAUTIER & COSTARD, 2000) quand se forment des embâcles très résistants.

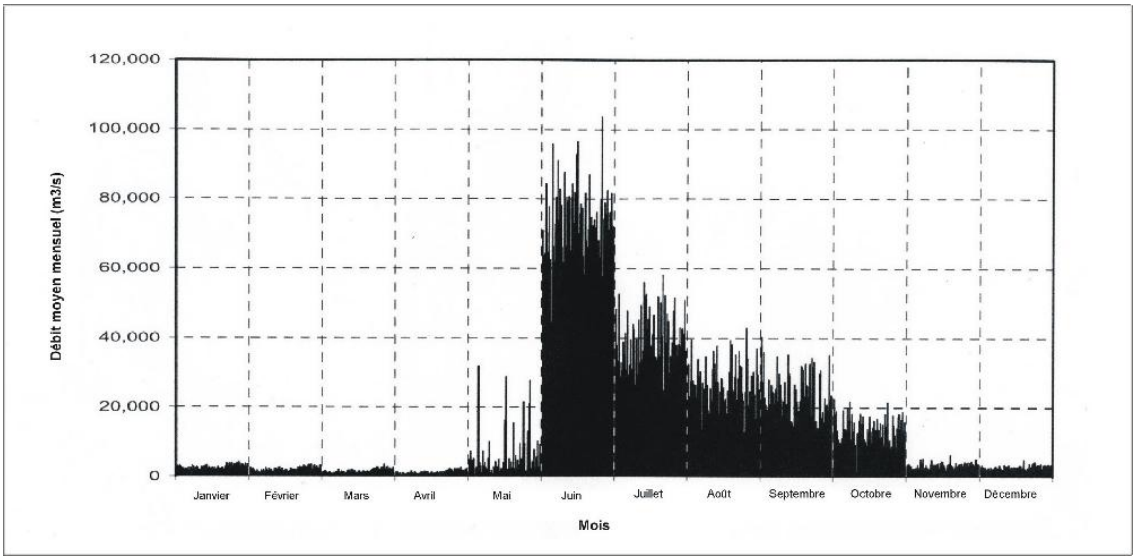

Figure 2 : Débit mensuel moyen de la Léna à Kusur de 1935 à 1999 (source : YANG *et al*., 2002).

Dans les régions du nord de la Russie, les conséquences de la débâcle des fleuves sont considérées comme les risques environnementaux les plus importants (PROWSE *et al*., 2007). Les impacts de la débâcle interfèrent sur le domaine écologique comme sur les activités socio-économiques et le fonctionnement des sociétés humaines exposées (BELTAOS, 1997). Comme précisé précédemment, la débâcle s'accompagne fréquemment de crues plus ou moins importantes qui peuvent causer de graves inondations au sein des communautés vivant dans les vallées (figure 3). De plus, elle limite considérablement l'utilisation pour la navigation ou la production d'hydroélectricité (BELTAOS, 1997, DESHAIES, 2007, ETTAMA, 2005, PROWSE 2007). D'un point de vue géomorphologique, la débâcle provoque le charriage d'une quantité considérable d'alluvions de l'amont vers l'aval. Ceci a pour conséquence de modifier chaque année la position des bancs de sable dans le lit des rivières (GAUTIER & COSTARD, 2000). A cause du transport d'imposants blocs de glace, de l'augmentation des températures de l'eau et de la vitesse du courant, la débâcle génère aussi une érosion mécanique et thermique des berges du cours d'eau. Cette dernière ajoute une menace supplémentaire sur l'équilibre des écosystèmes et sur les activités humaines proches.

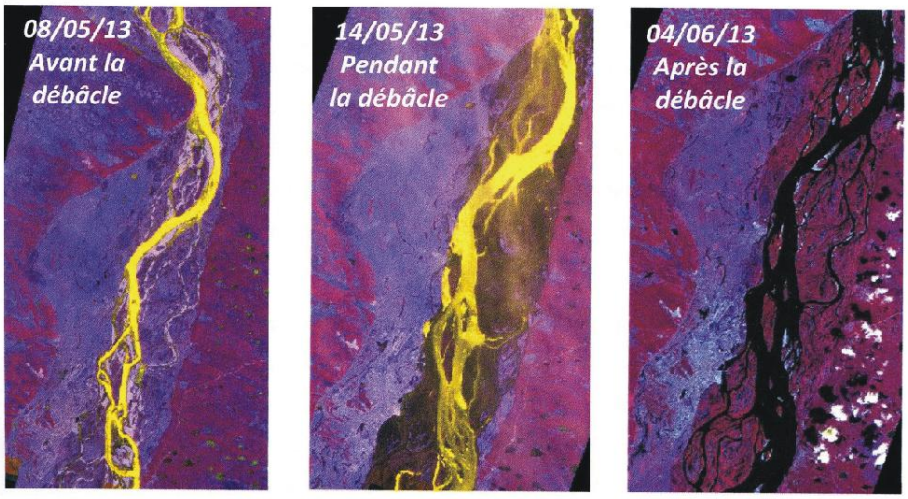

Figure 3 : Suivi temporel de la débâcle de la Léna à Yakoutsk (2013).
Compositions colorées (RVB) réalisées à partir des images EO1-ALI du 08/05, 14/05 et 04/06 2013
(Source : R. ROLLOT, 2015).

L'évolution du régime au XX^{ème} siècle et le réchauffement climatique

A Kusur, à la tête du delta, depuis le milieu des années 1930, le débit hivernal (novembre-avril) a cru de 27,90% et, pendant la période de fusion de la neige, a cru de 3 900 m^3/s (63 %) en mai et 3 000 m^3/s (4 %) en juin en raison, surtout, d'un accroissement de la couverture neigeuse (figure 4).

Mais le débit moyen mensuel a décru en juillet de 3 900 m^3/s (- 10%), en septembre de 3 200 m^3/s (- 13 %) et en octobre de 460 m^3/s (- 3%). En revanche, il a cru en août de 700 m^3/s (+ 5%)). Au total, l'accroissement annuel est de 6 % seulement (YANG *et al*., 2002).

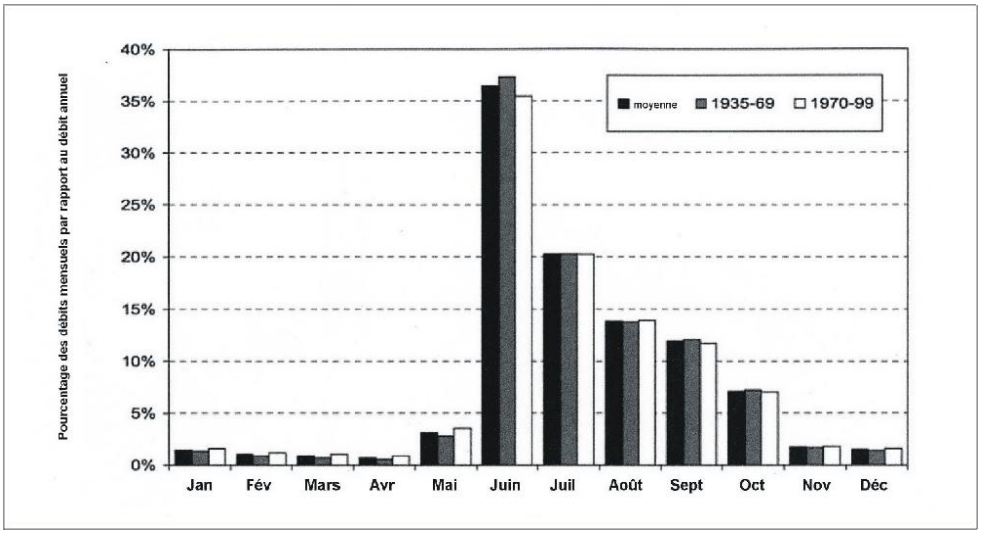

Figure 4 : Pourcentage des débits mensuels par rapport au débit annuel de la Léna entre 1939 et 1969 et entre 1970 et 1999 (Source : YANG *et al*., 2002)

La diminution du débit moyen en juillet et septembre est cohérente avec la diminution des précipitations estivales, particulièrement nette en juillet et août sur l'ensemble du bassin versant (figure 5), responsable d'une diminution des précipitations moyennes annuelles d'environ 5 mm, alors que le réchauffement hivernal s'accompagne d'un accroissement des précipitations d'environ 12 mm/an (YANG *et al*., 2002).

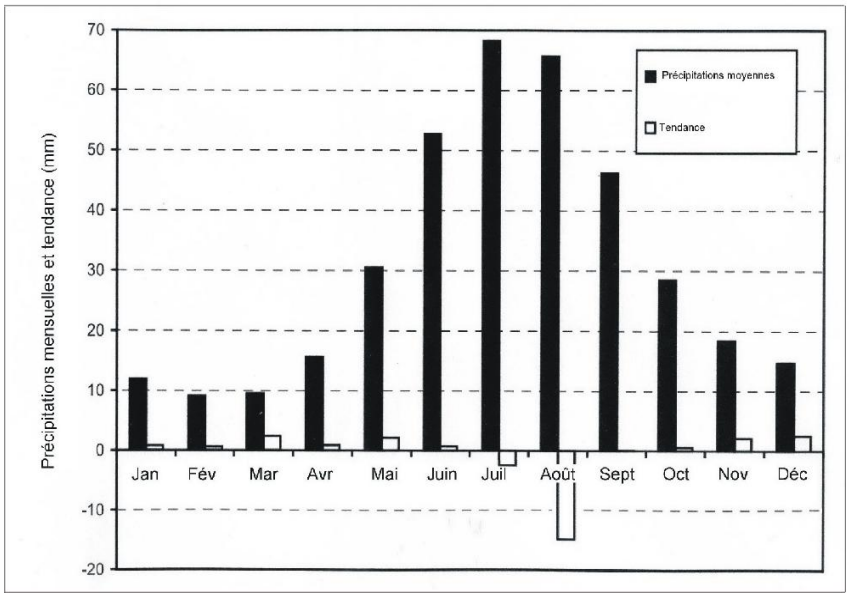

Figure 5 : Précipitations moyennes mensuelles et tendance dans le bassin versant de la Léna de 1935 à 1998 (source : YANG *et al*., 2002).

La croissance du débit hivernal est due à l'augmentation générale des températures sur l'ensemble du bassin versant de la Léna, principalement en hiver, alors que l'évolution des températures estivales est plus contrastée, mais plus réduite (figure 6).

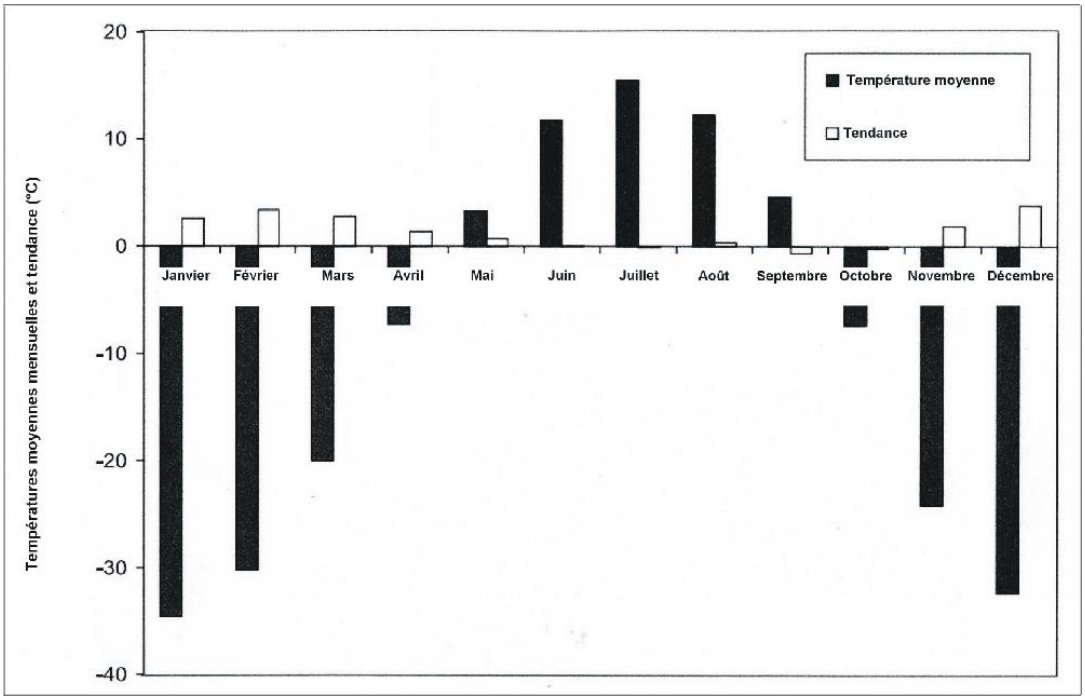

Figure 6 : Températures moyennes mensuelles et tendance dans le bassin versant de la Léna de 1935 à 1998 (Source : YANG *et al*., 2002).

Le réchauffement climatique est également responsable de l'augmentation de l'épaisseur de la couche active (figure 7) surtout depuis le milieu des années 60, ce qui accroît la possibilité de stockage d'eau et donc permet un accroissement possible des débits d'hiver (YANG *et al*., 2002).

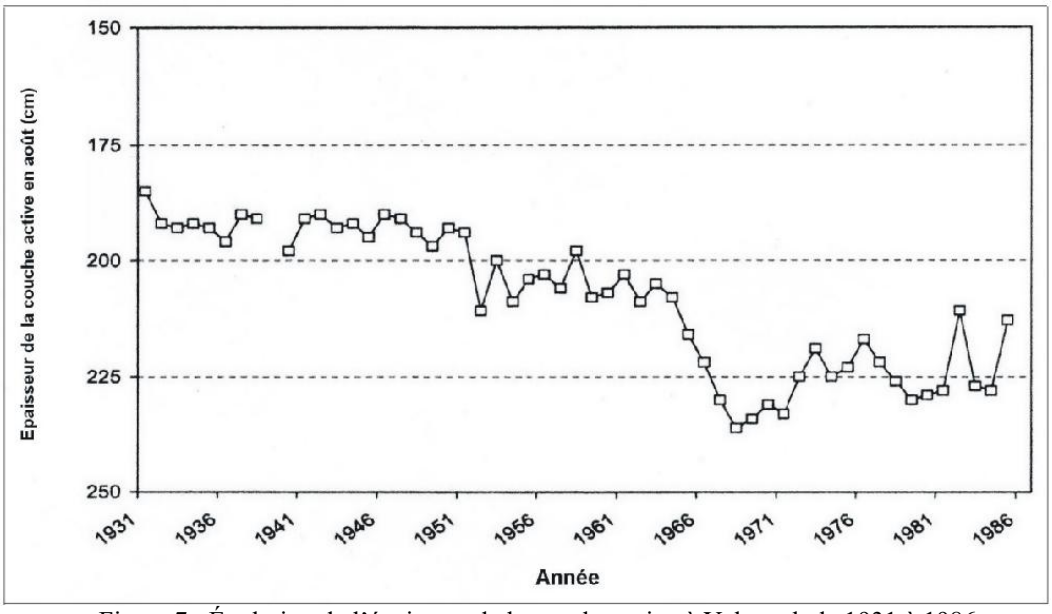

Figure 7 : Évolution de l'épaisseur de la couche active à Yakoutsk de 1931 à 1986 (Source : YANG *et al*., 2002).

Cette épaisseur croissante risque de poser problème à Yakoutsk, la plus grande ville du monde construite sur du pergélisol continu (figure 8), la plupart des habitations reposant sur des piles de béton.

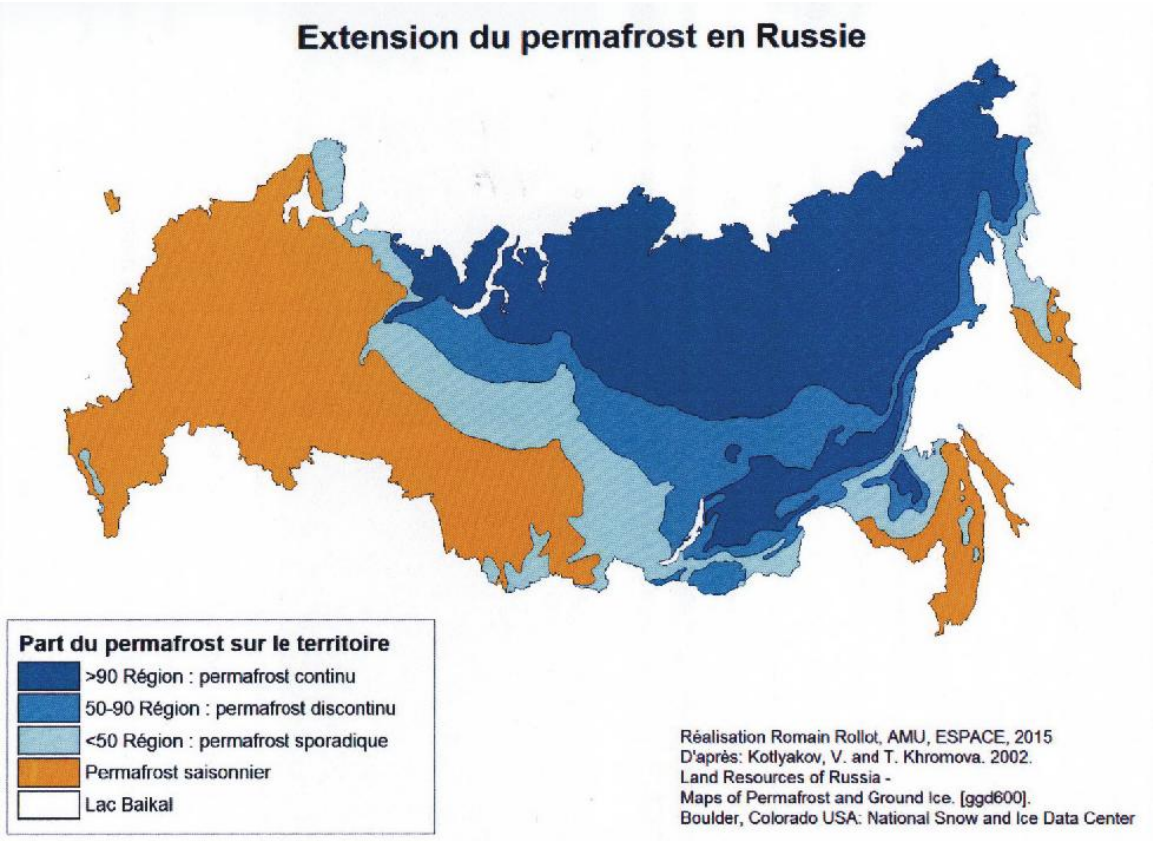

Figure 8 : Extension du pergélisol en Russie (Source : ROLLOT, 2015).

De la même façon, l'épaisseur de la glace sur le fleuve et l'épaisseur de la neige au sol tendent à diminuer au cours du XX^{ème} siècle (figure 9).

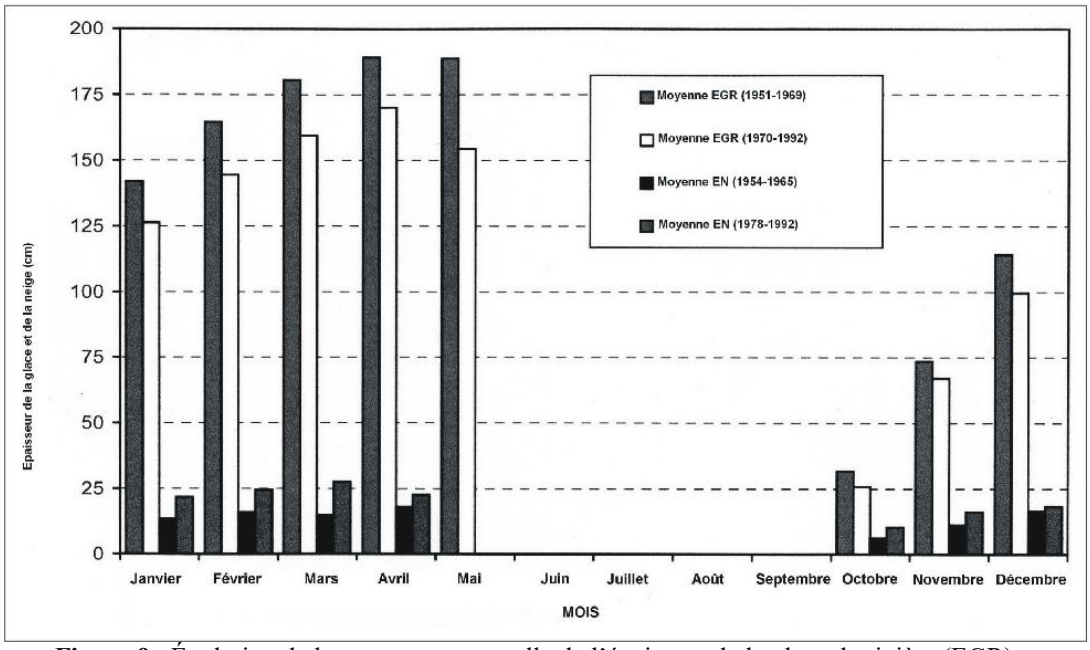

Figure 9 : Évolution de la moyenne mensuelle de l'épaisseur de la glace de rivière (EGR) et de la neige (EN) à Kusur, de 1951 à 1992 (Source : YANG *et al*., 2002).

LES ZONES INONDABLES ET LE RISQUE D'INONDATION

S'il est vrai que les débits moyens mensuels de la période de fusion de la neige et de la glace ont considérablement augmenté, néanmoins, le débit maximum quotidien n'a pas augmenté en juin et a même légèrement diminué (figure 10). C'est plus tard en saison, un peu en juillet, et surtout d'août à octobre, qu'il a légèrement augmenté. En conséquence, l'aléa inondation n'a pas augmenté avec le réchauffement climatique.

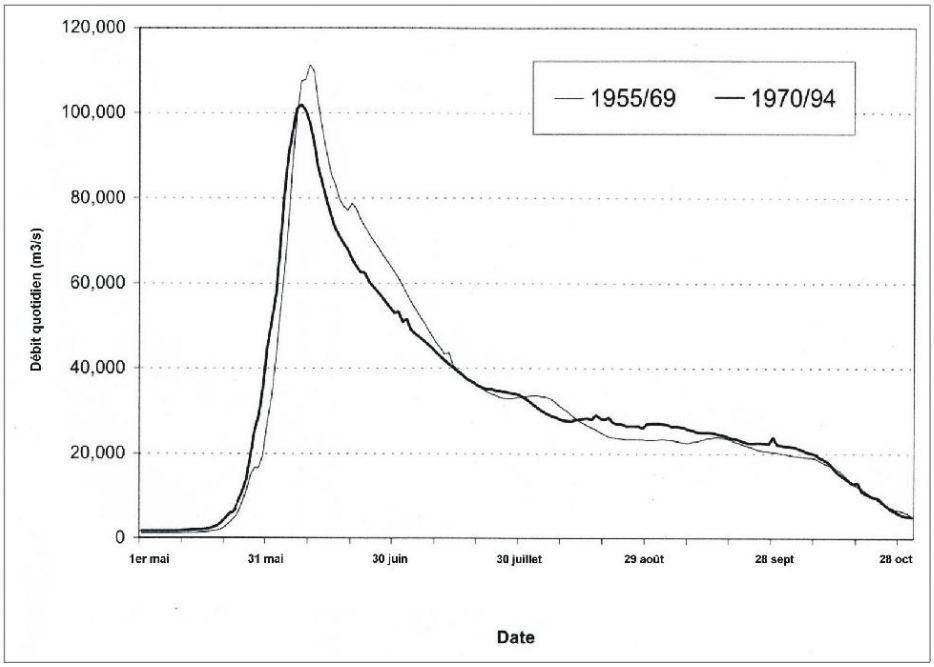

Figure 10 : Comparaison de la moyenne du débit quotidien de la Léna à Kusur entre 1955-1969 et 1970-1994 (Source : YANG *et al*., 2002).

Cette évolution peut, peut-être, expliquer que le risque d'inondation semble parfois oublié des autorités et d'une partie de la population « protégée » derrière la digue qui longe le centre-ville. Or, une partie importante de l'agglomération de Yakoutsk est en zone inondable. C'est ce que montre une cartographie effectuée à partir de la hauteur d'eau maximum mesurée récemment (figure 11), en l'absence d'une cartographie des zones inondables par la méthode hydro-géomorphologique (BALLAIS *et al*., 2011) qui est prévue mais qui dépend de l'évolution des relations entre la France et la Russie.

Le découpage hydro-géomorphologique de la vallée de la Léna proposé par plusieurs chercheurs ne facilite pas la délimitation claire des zones inondables au moment de la débâcle (Atlas cartographique de Yakutsk, NEFU, 2007 *in* ROLLOT, 2015). La comparaison de la carte géomorphologique (figure 12) et de la cartographie ci-dessus (figure 11) montre que, d'une part, les environs de l'aéroport, au nord, et, d'autre part, les faubourgs au sud sont en zone inondable alors même qu'ils se localisent sur la première terrasse alluviale, au nord, et sur la deuxième, au sud. Comme une terrasse alluviale d'un cours d'eau est, par définition, une forme dont le sommet est hors d'eau, quel que soit le débit actuel du cours d'eau, ces cartographies sont incohérentes. Il est probable que, en raison de l'énorme variation du débit de la Léna au cours de l'année, ce fleuve ait façonné ou accumulé plusieurs lits au-dessus de son lit mineur (lit moyen, lit majeur ordinaire, lit majeur exceptionnel), comme un grand nombre d'autres cours d'eau (BALLAIS *et al*., 2012). Au-delà de l'intérêt géomorphologique de la distinction entre plaine alluviale fonctionnelle et terrasse alluviale, c'est bien la détermination de l'aléa et du risque d'inondation qui est en jeu.

Si la dynamique actuelle d'exode rural et de croissance démographique de Yakoutsk se poursuit, et on peut légitimement penser que cela va être le cas, la gestion des inondations dans les quartiers périphériques va devoir être réellement prise en main. Depuis 2002, la capitale sakha a gagné 83 500 habitants, soit une augmentation de sa population de 39,6 % en moins de quinze ans. Une

grande partie de ces nouveaux citadins se sont installés dans les quartiers en périphérie au nord et au sud de la ville, des zones particulièrement inondables (figures 13 et 14).

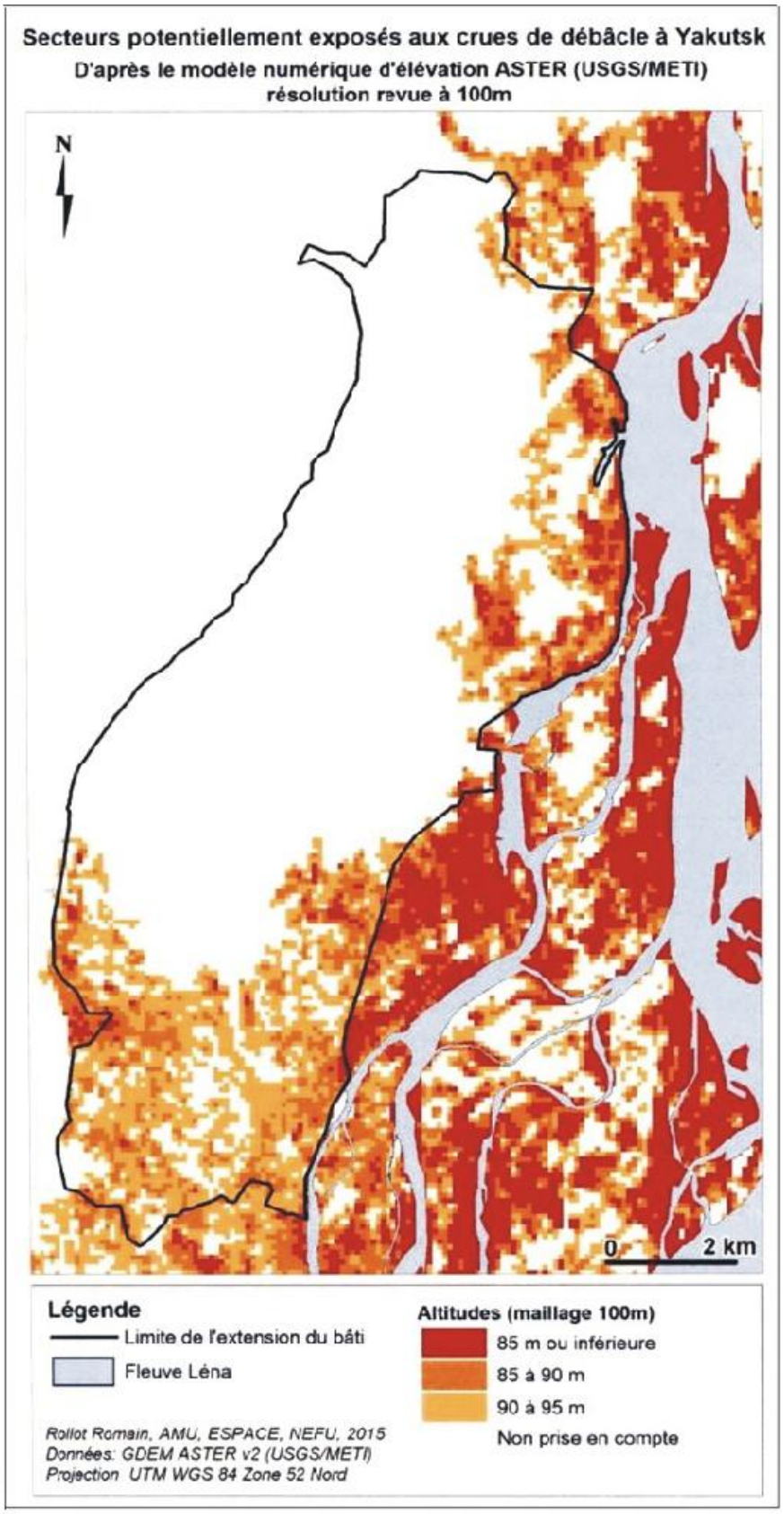

Figure 11 : Carte des secteurs de Yakoutsk exposés aux crues de débâcle (Source : ROLLOT, 2015).

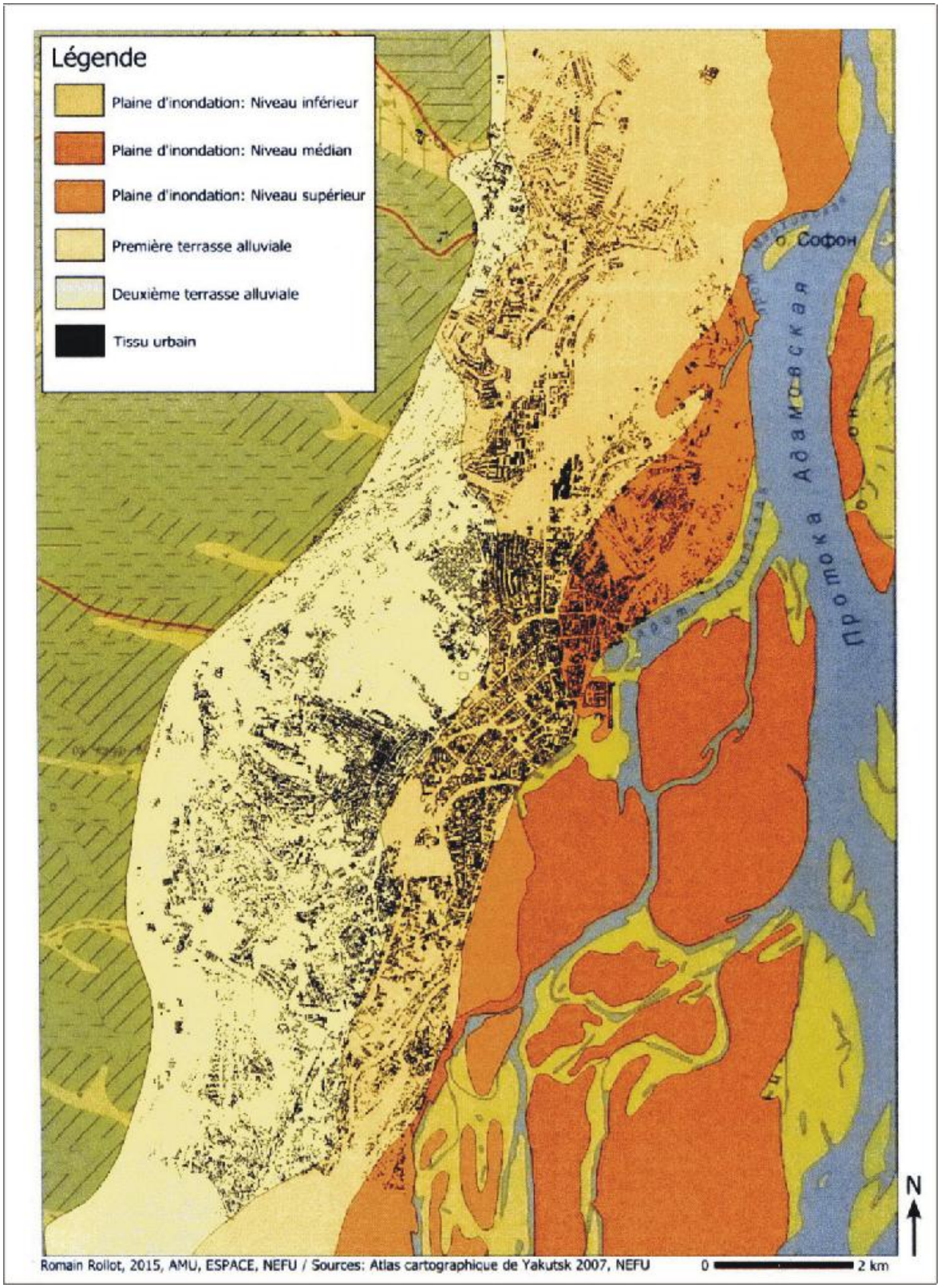

Figure 12 : Les grands ensembles géomorphologiques à Yakoutsk (Source : ROLLOT, 2015).

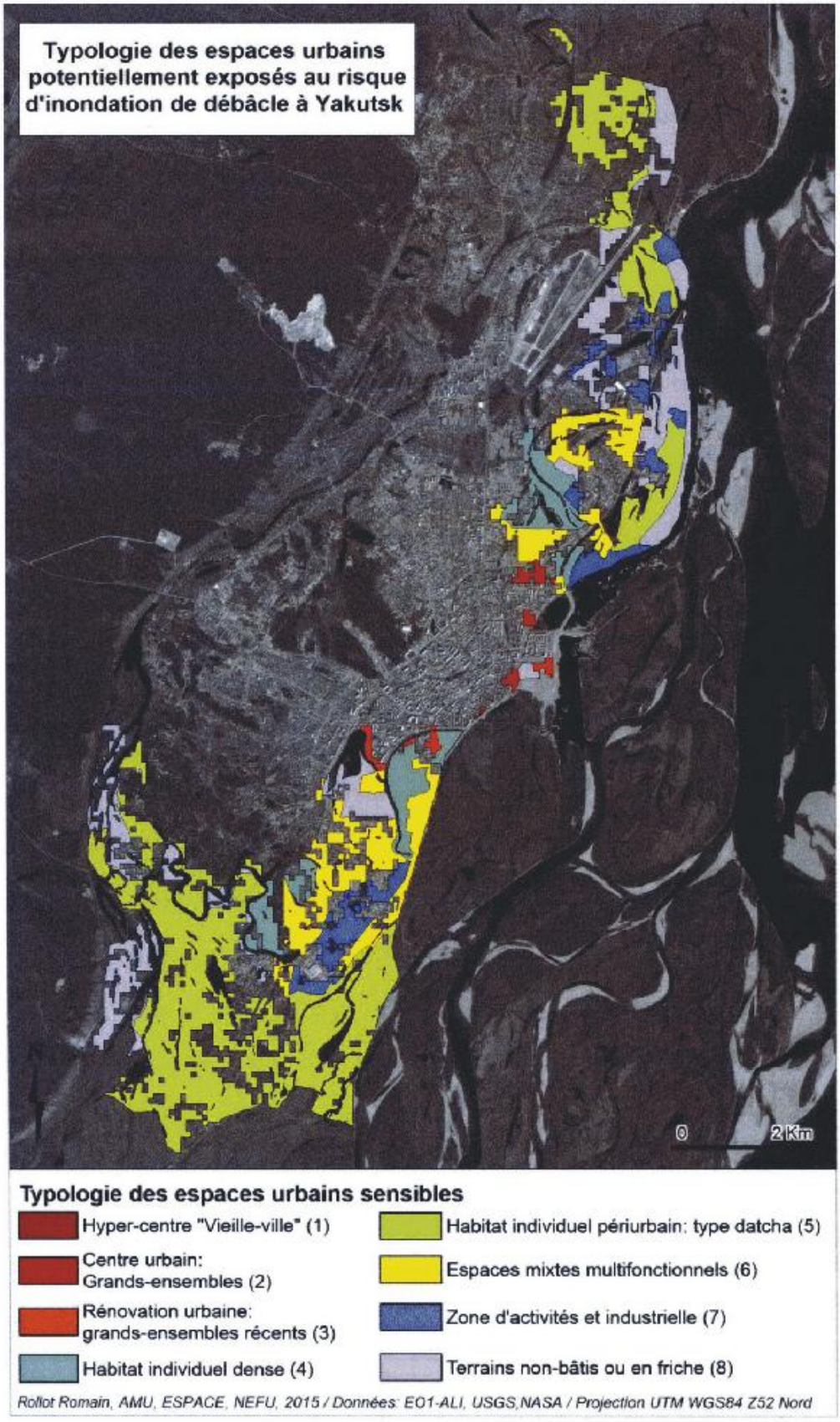

Figure 13 : Typologie des espaces urbains potentiellement exposés au risque d'inondation de débâcle à Yakoutsk (Source : ROLLOT, 2015).

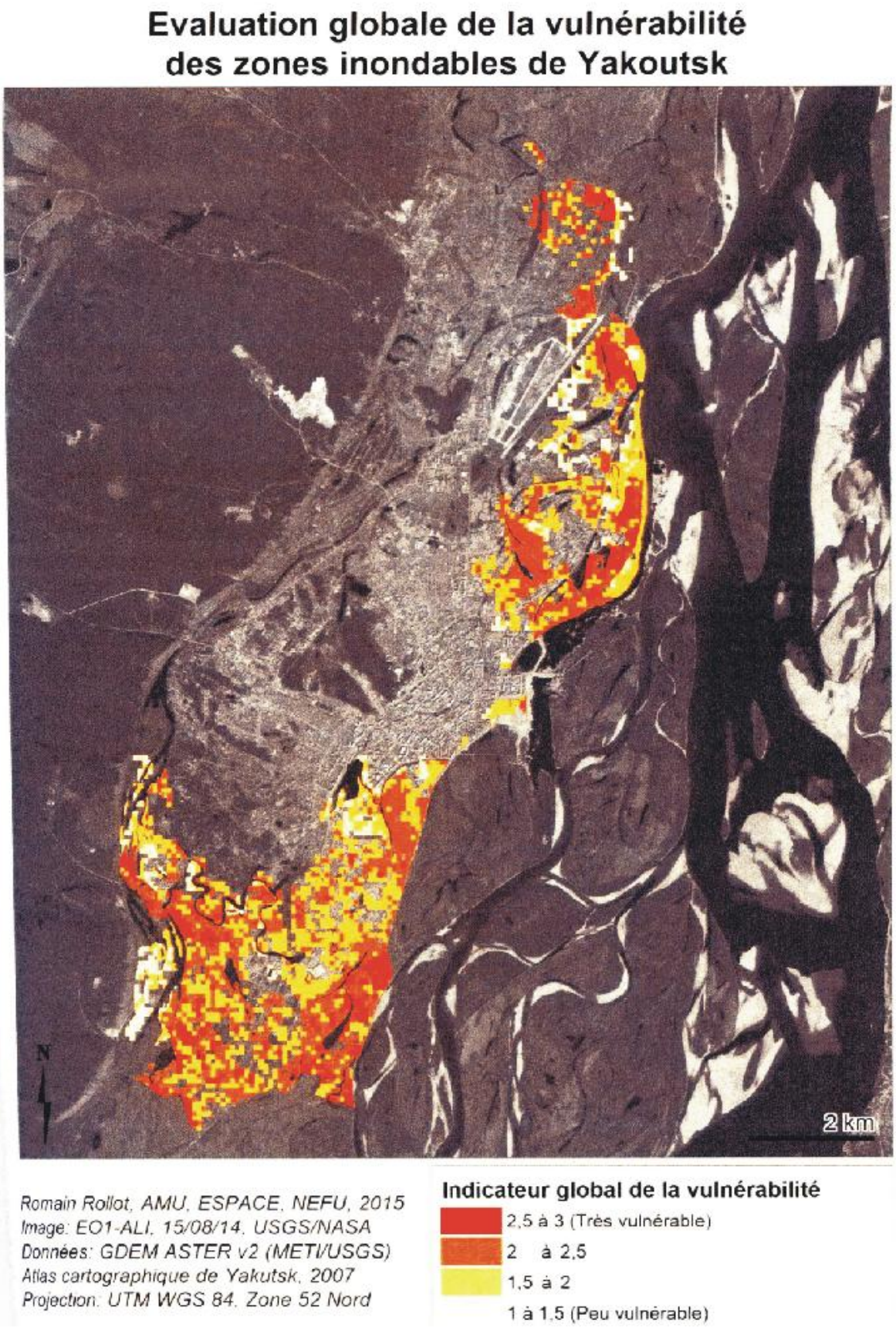

Figure 14 : Évaluation globale de la vulnérabilité des zones inondables de Yakoutsk (Source : ROLLOT, 2015).

CONCLUSION

Les embâcles qui découlent inévitablement de la débâcle contribuent fortement à l'augmentation subite du niveau d'eau. Il en résulte des crues rapides qui recouvrent la plaine d'inondation et parfois même ce qui est nommé par certains chercheurs la première terrasse de la vallée de la Léna où vivent de nombreuses communautés et où se situe une partie de la ville de Yakoutsk (COSTARD & GAUTIER, 2008). Face à ces gigantesques inondations qui menacent les implantations humaines, les autorités compétentes ont recours certaines années aux explosifs pour détruire les embâcles et libérer les flots du fleuve (DESHAIES, 2007). Ainsi, la débâcle de la Léna n'est pas qu'un simple aléa qui revient perturber les activités fluviales chaque printemps : de par le rôle majeur du fleuve dans l'organisation du territoire de la Yakoutie et la présence de centres de peuplement comme Yakoutsk sur ses rives, les conséquences de la débâcle, telles que les inondations parfois catastrophiques, constituent un risque réel pour les sociétés.

De plus, l'autre grande inconnue est celle qui est liée au changement climatique. Il est très difficile d'évaluer précisément les répercussions de ces changements sur des phénomènes naturels complexes comme la débâcle. Quoi qu'il en soit, il n'est pas à exclure que le changement climatique facilite l'exploitation des richesses de la Yakoutie et donc participe au développement de Yakoutsk. On peut aussi supposer qu'il pourrait entrainer une disparition accélérée des activités traditionnelles des peuples nomades de la région, ce qui provoquerait une nouvelle vague d'exode rural. Pour toutes ces raisons, la question de la gestion des inondations de débâcle se pose, plus que jamais, à Yakoutsk et dans les régions du Grand Nord russe en général (GORCHOV *et al*., 2011 ; GORSHOV *et al*., 2013).

REMERCIEMENTS

Grand merci à Georges Jop pour son aide efficace pour la réalisation de l'iconographie.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BALLAIS, J.-L., CHAVE, S., DUPONT, N., MASSON, E. & PENVEN M.-J., 2011. La méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables, *Physio-Géo Ouvrages*, 173 p. (en ligne).

BALLAIS, J.-L., CHAVE, S., DELORME, V. & ESPOSITO, C., 2012. Le lit majeur exceptionnel : premier bilan. *Revue Géographique de l'Est*, 51, 3-4, 11 p.

BELTAOS, S., 1997. Onset of river ice break up. *Cold Regions Science and Technology*, 25, 183-196.

BELTAOS, S., 2008. Progress in the study and the management of river ice jams. *Cold Regions Sciences and Technology,* 51 : 2-19

COSTARD, F. & GAUTIER, E., 2008. The Lena River: Hydromorphodynamic Features in a Deep Permafrost Zone. *in* GUPTA A. (dir.) Large Rivers: Geomorphology and Management, Wiley & Sons, Chichester, doi:1002/9780470723722.ch11.

DESHAIES, M., 2007. De multiples problèmes environnementaux. *In* Wackermann G. (dir.) *La Russie, approche géographique*, Ellipses, Paris, 109-130.

DMITRY, A., BURAKOV, L., YULIYA, V., AVDEEVA, S. & KOSMAKOVA, V.F., 2005. Floods in Siberian river basins. In Vassiliev O.F. *et al*. (Eds). Extreme Hydrological Events: New Concepts for Security, 111-124.

ETTAMA, R., 2005. Information needs when estimating ice jam floods and ice runs. *In* Vassiliev O.F. (Ed). Extreme Hydrological Events: New Concepts for Security, 285-298.

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, 327-334.

GORCHOV, S., MOTCHOLOVA, O., OZERSKI, S., EVSEEVA, L., BALLAIS, J.-L. & SIMONE, Y., 2011. Le réchauffement climatique dans la partie centralo-sibérienne du géosystème du bassin du fleuve Ienisseï et ses conséquences. *In* : TABEAUD M. & KISLOV A. (Eds) Le changement climatique, Eurcasia, Allonzier-la-Caille, 61-64.

GORSHKOV, S., EVSEEVA, L., MOCHALOVA, O., TOUCHART, L., BALLAIS, J.-L. & SIMONE, Y., 2013. Environment, economy and community of the upper Angara and middle Yenisei regions: impact of climate change and water reservoir cascades built on the Angara and Yenisei rivers, *Polar Record*, Cambridge University Press, 1-7.

PROWSE, T.D., BONSAL, B., DUGUAY, C.R., HESSEN, D.O. & ANDVUGLINSKY, V.S., 2007. River and lake ice. *in* : UNEP (Ed.) Global Outlook for Ice and Snow, 201-214.
ROLLOT, R., 2015. Évaluer la vulnérabilité au risque d'inondation de débâcle. Le cas de Yakoutsk, capitale de la République de Sakha, en Russie. Mémoire de recherche de Master 2, Université d'Aix-Marseille, 131 p., 4 annexes.
YANG, D., KANE, D.L., HINZMAN, L.D., ZHANG, X., ZHANG, T. & YE, H., 2002. Siberian Lena River hydrologic regime and recent change. *Journal of Geophysical Research*, 107, D 23, 4694, doi:10.1029/2002JD002542.

https://fr.wikipedia.org/wiki/Léna
Pogoda.ru.net