

Hydro-géomorphologie et applications à la restauration des cours d'eau

PASCALE BIRON

Professeure

Département de géographie, urbanisme et environnement

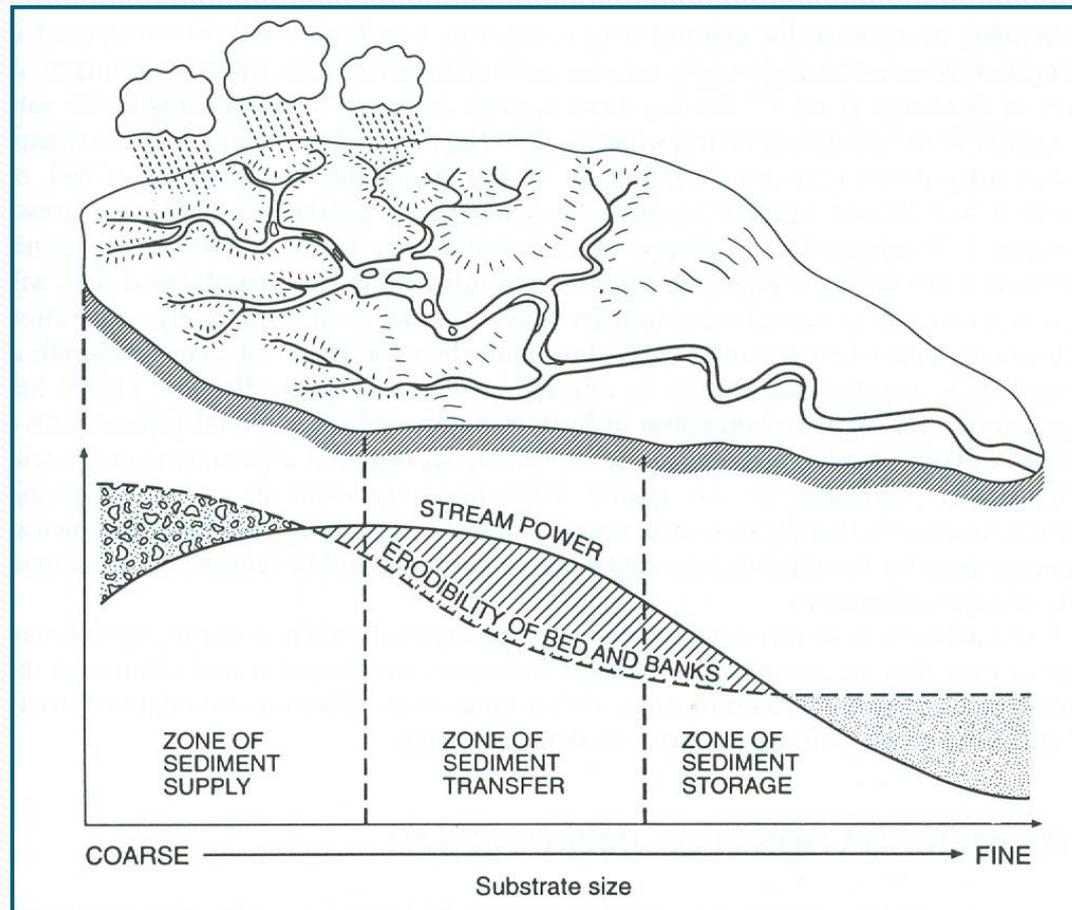
Université Concordia



Plan

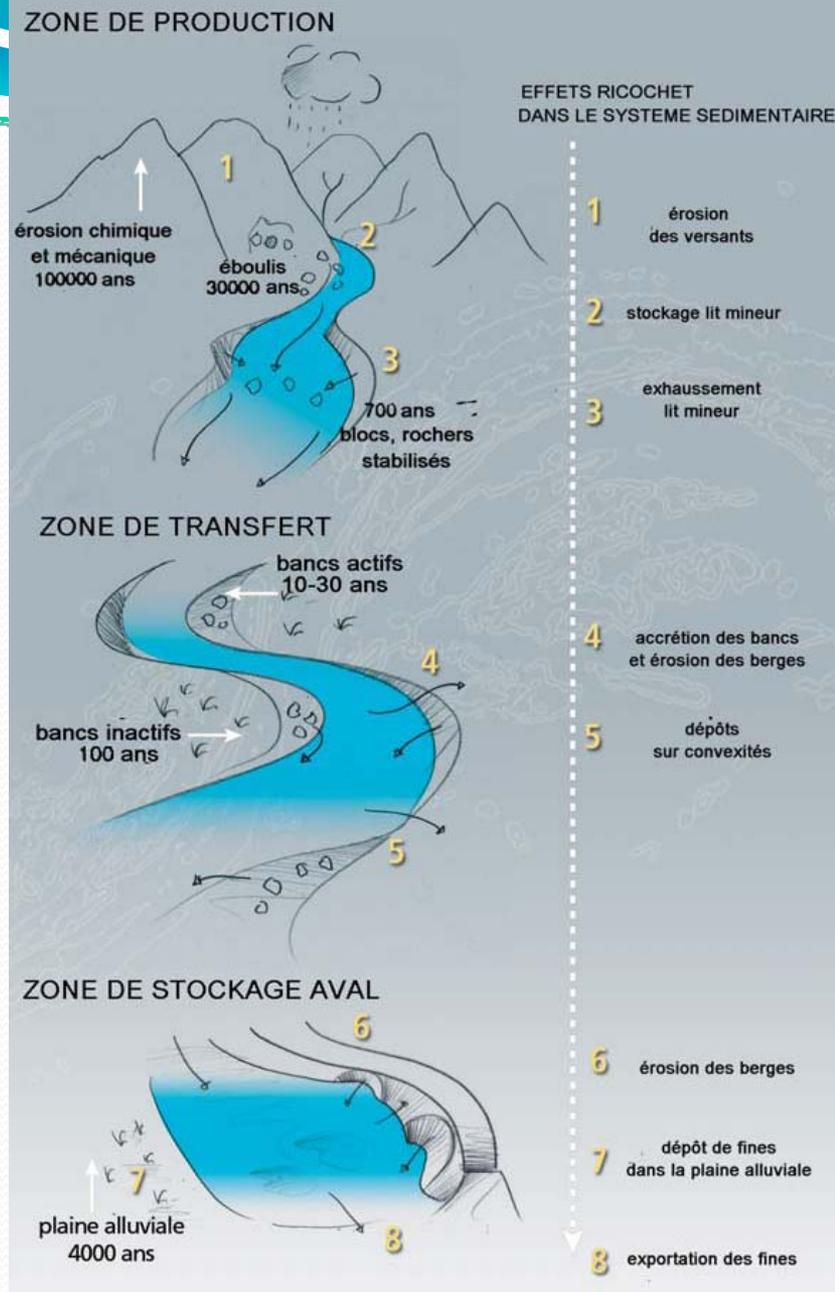
1. Notions de base en hydro-géomorphologie
2. Effets des perturbations anthropiques sur les petits cours d'eau (dragage, linéarisation, drainage souterrain, seuils, prélèvements d'eau stabilisation des rives)
3. L'espace de liberté d'un cours d'eau comme concept de restauration des cours d'eau

1. Notions de base en hydro-géomorphologie



Une classification simple du bassin-versant.

- Bassins-versant: processus de transfert non seulement du débit liquide, mais aussi du débit solide.
- Notion de stockage temporaire importante pour le débit solide
 - Naturel: ex: bancs d'accumulation
 - Artificiel: ex: barrages



Mouvement de sédiments



Zone de production: tronçons avec une érosion nette. Source de sédiments pour les autres tronçons. Lors des crues, ces sédiments seront transportés vers l'aval et seront déposés dans certains tronçons.

Zone de transfert: tronçons avec généralement une quantité égale d'érosion et de dépôt. Lors des crues, des sédiments proviennent de l'amont et les sédiments du tronçon sont déplacés vers l'aval.

Zone de dépôt: tronçons avec un dépôt net. Lors des crues, des sédiments proviennent de l'amont et moins de sédiments du tronçon seront déplacés vers l'aval.

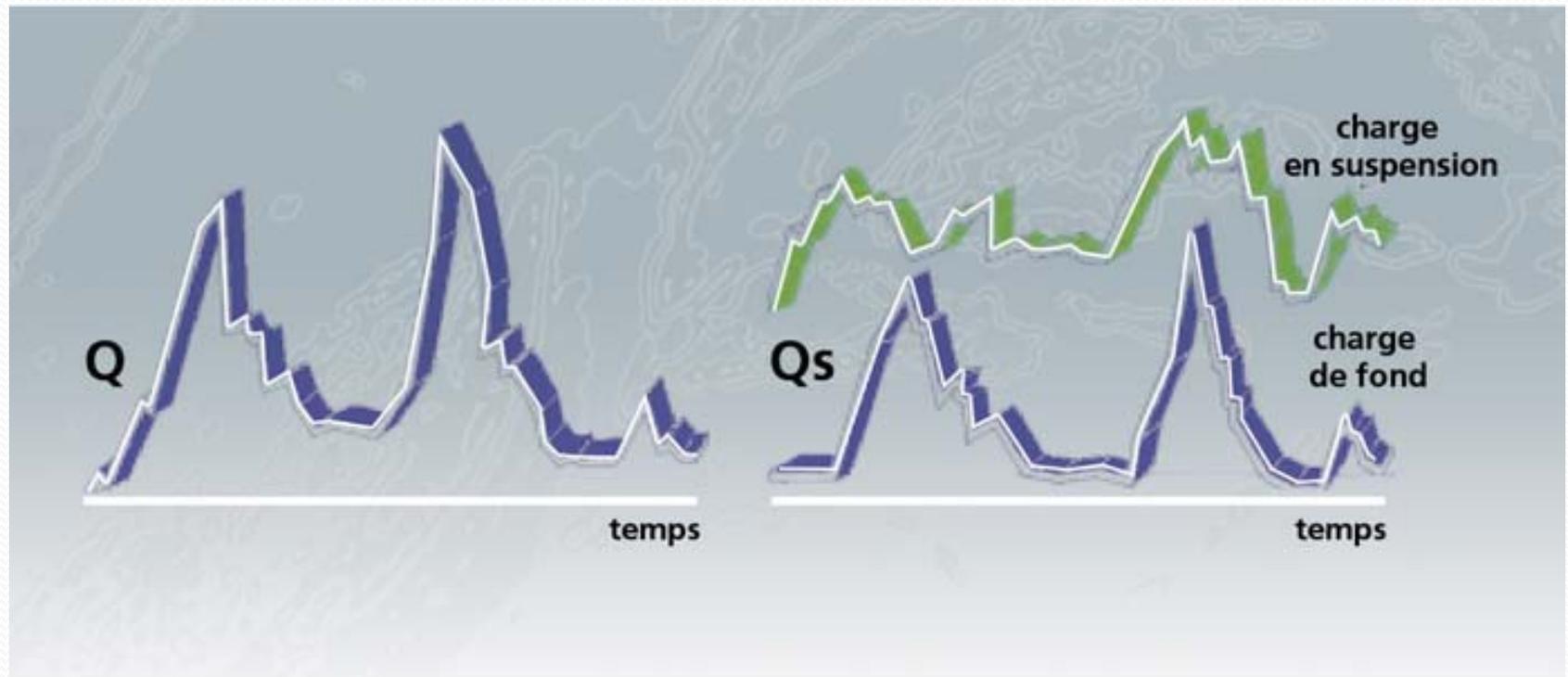


Provenance du débit solide

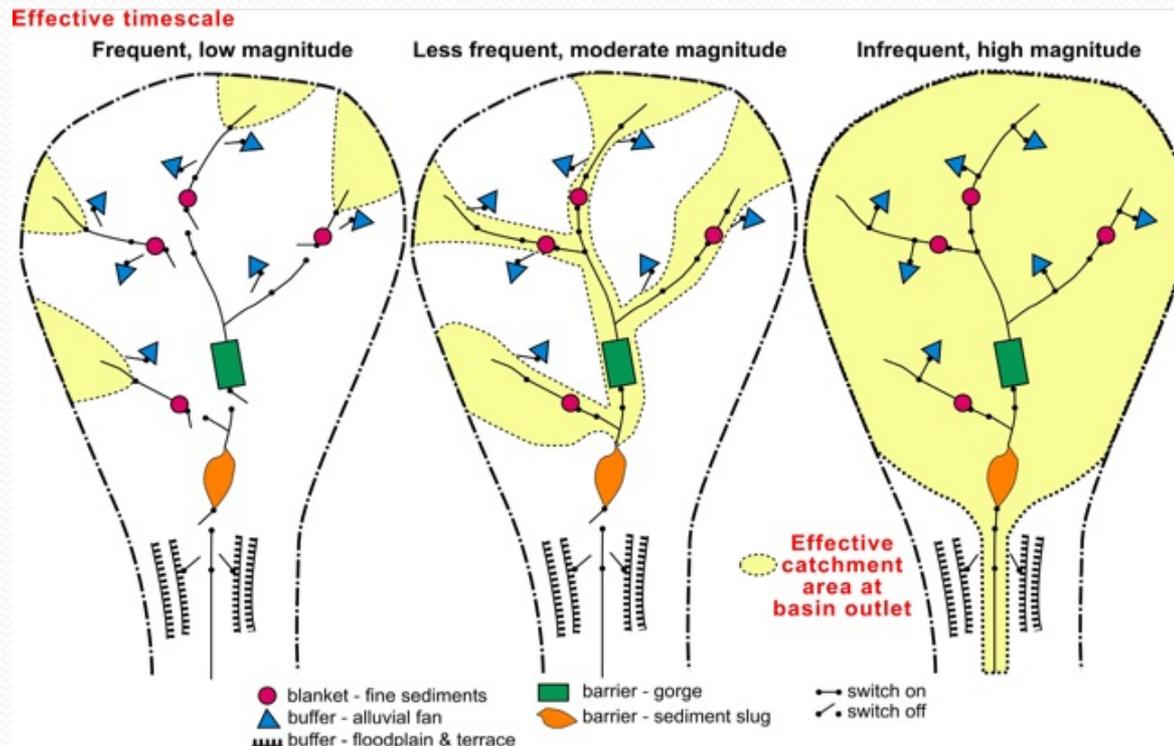
- Apports externes:
 - versants (tête de bassin-versant) érosion, reptation, glissements de terrain
 - Tributaires
- Apports internes
 - Stock de lit mineur (sédiments en provenance de l'amont)
 - Stock de lit majeur et des terrasses (dépôts quaternaires)
 - Berges

Très important en milieu agricole (jusqu'à 80% des apports - Smith et Dragovich, 2008)

- Lien entre le débit liquide (Q) et le débit solide (Q_s)
- Deux types de débit solide: suspension et charge de fond

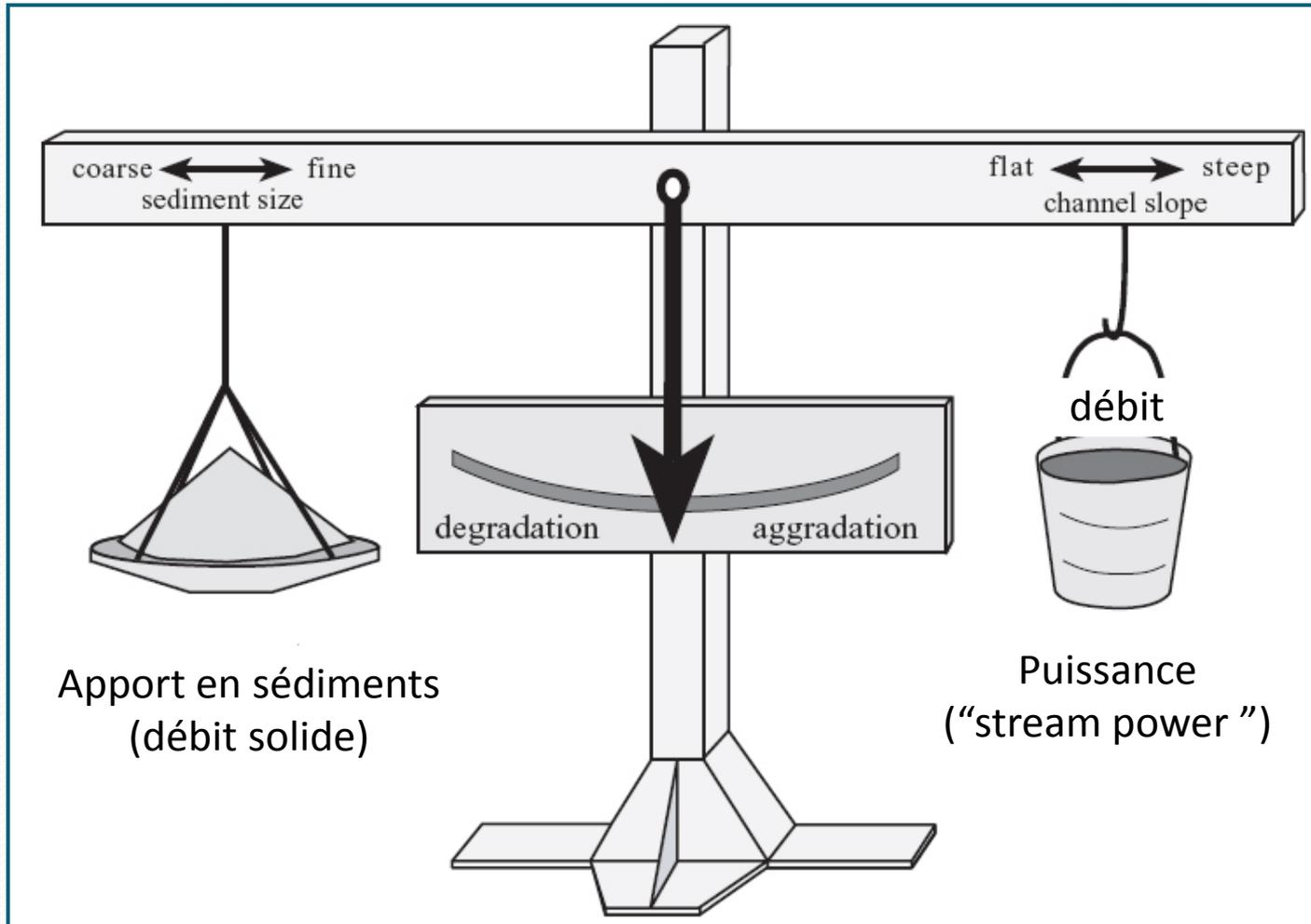


Débit solide: un tapis roulant intermittent (“jerky conveyor belt”)



Les surfaces directement connectées au tapis roulant (“interrupteurs” en marche) varient pour différentes échelles de temps ou selon les conditions d’écoulement

Débits liquide/solide: intrinsèquement liés



Modèle d'équilibre pour l'aggradation (dépôt) et la dégradation (érosion) des chenaux. À partir d'une figure du USA Bureau of Reclamation basée sur l'équation de Lane (1955). Figure tirée de Blum et Tornquist (2000).

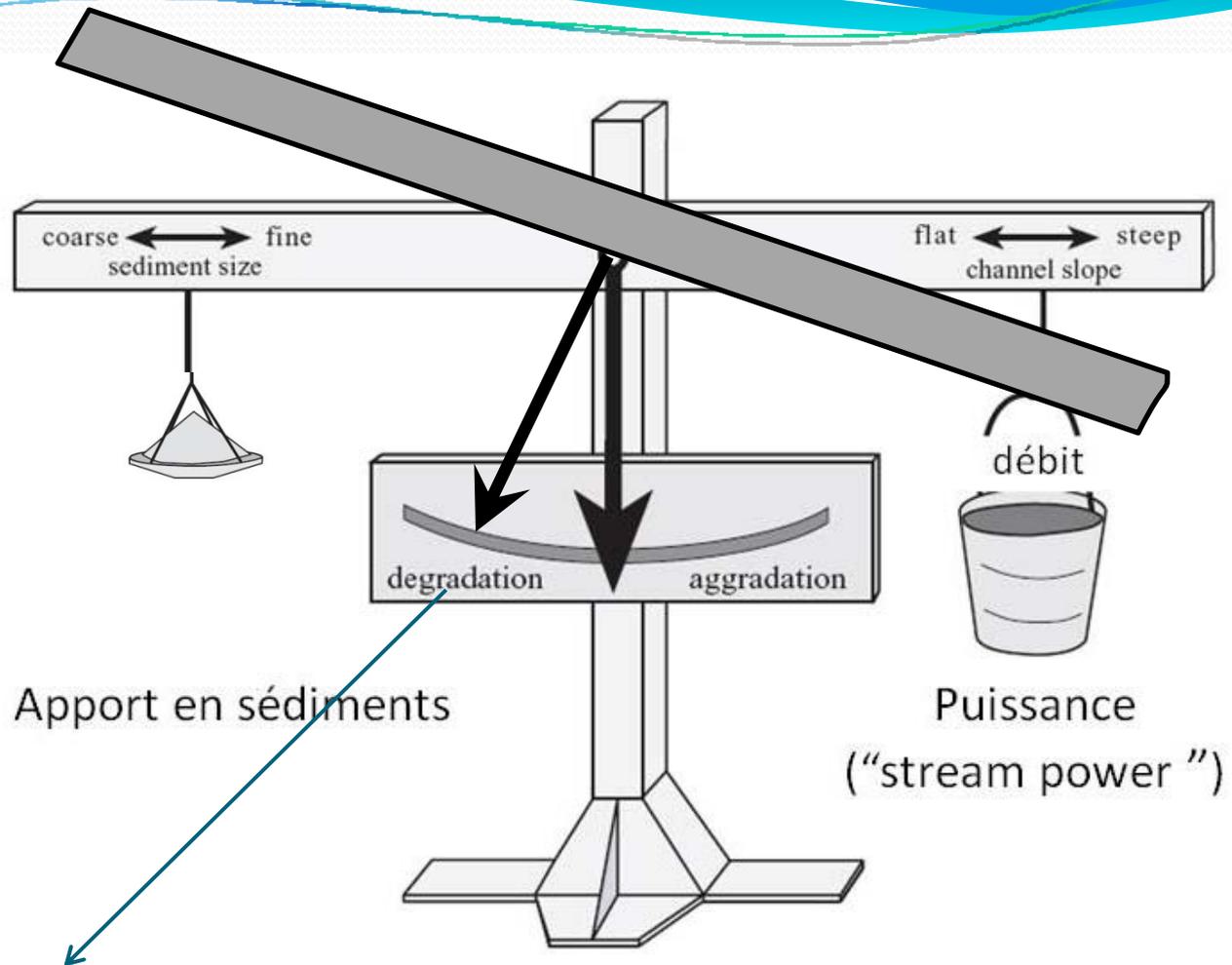
Cours d'eau en équilibre (“graded stream”)

“Un cours d'eau dont, sur une période de plusieurs années, la pente est délicatement ajustée pour procurer, avec le débit disponible et les caractéristiques du chenal, juste la vitesse nécessaire au transport du flux des sédiments du bassin-versant”

Mackin (1948)

Si...

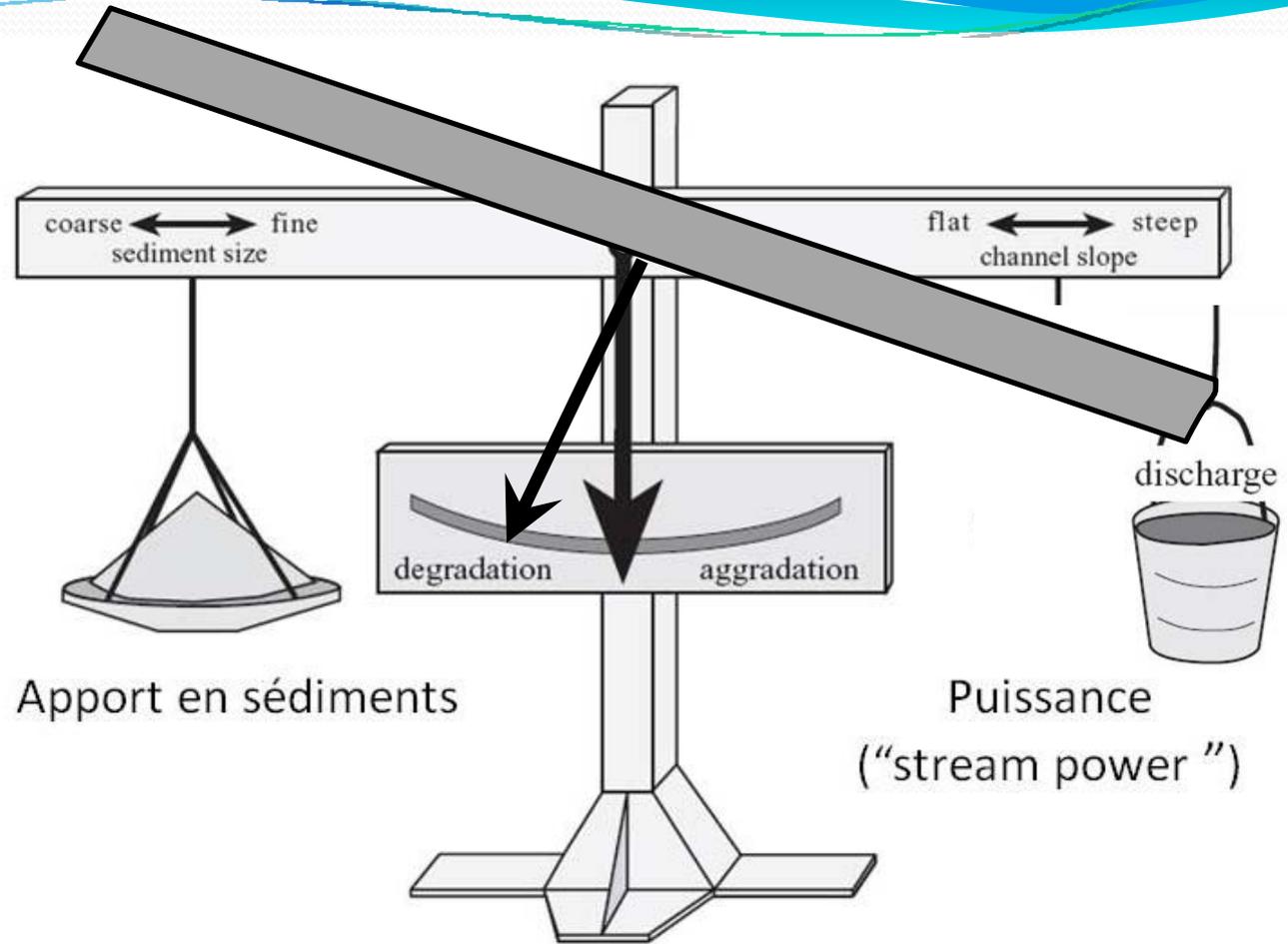
On réduit la charge sédimentaire (construction d'un barrage, de seuils qui trappent les sédiments, protection massive des berges...)



« Degradation » = incision verticale ou régression de fond

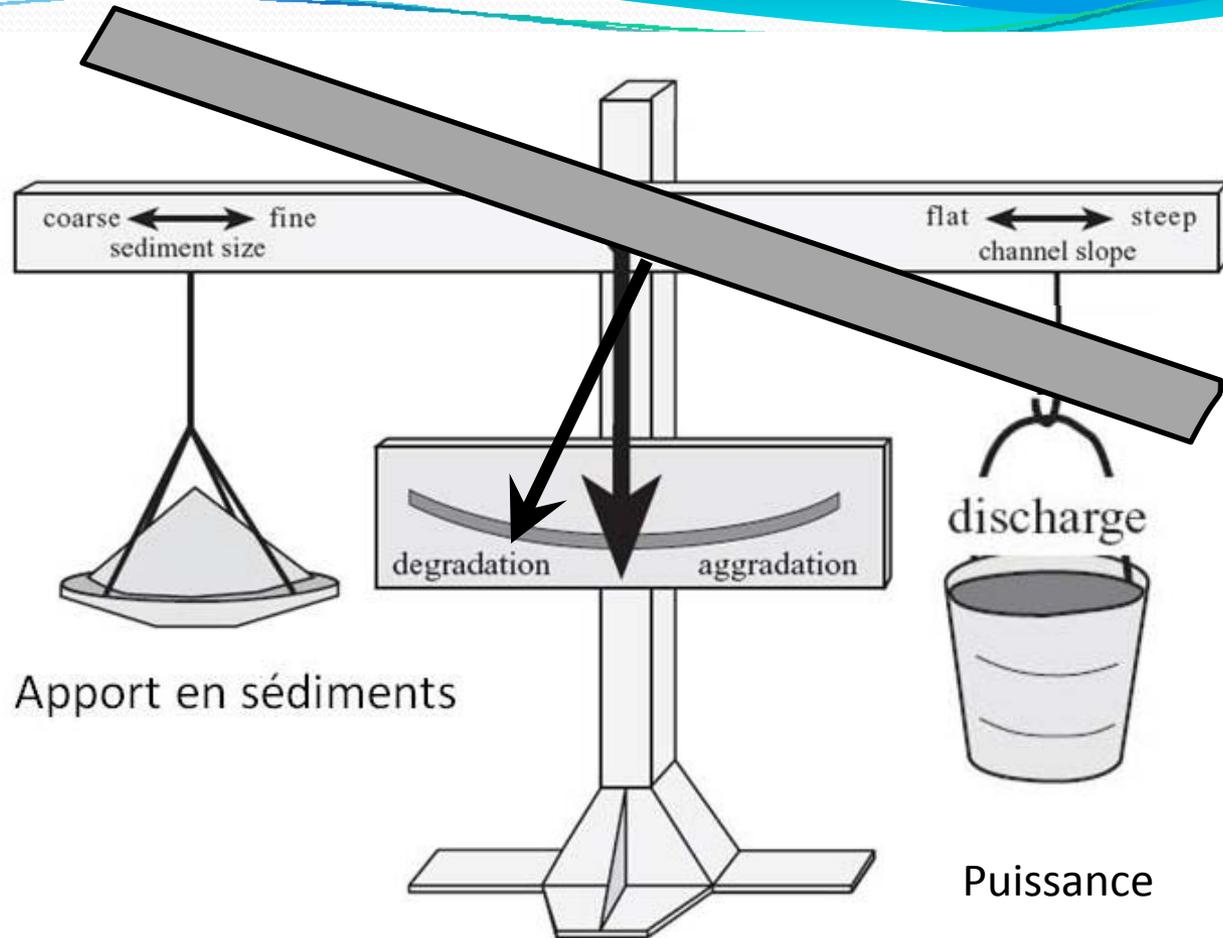
Si...

On augmente la
pente (élimination
des méandres)



Si...

On augmente le débit (changements climatiques)

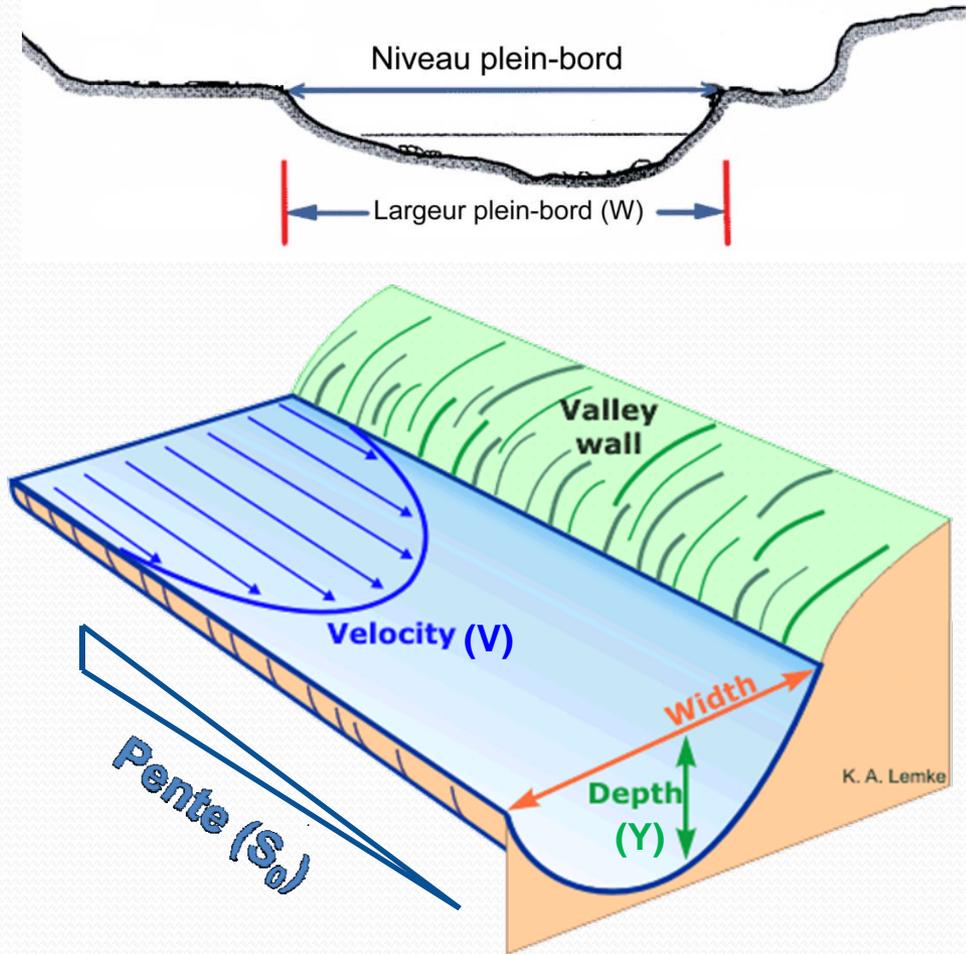


Variables clés:

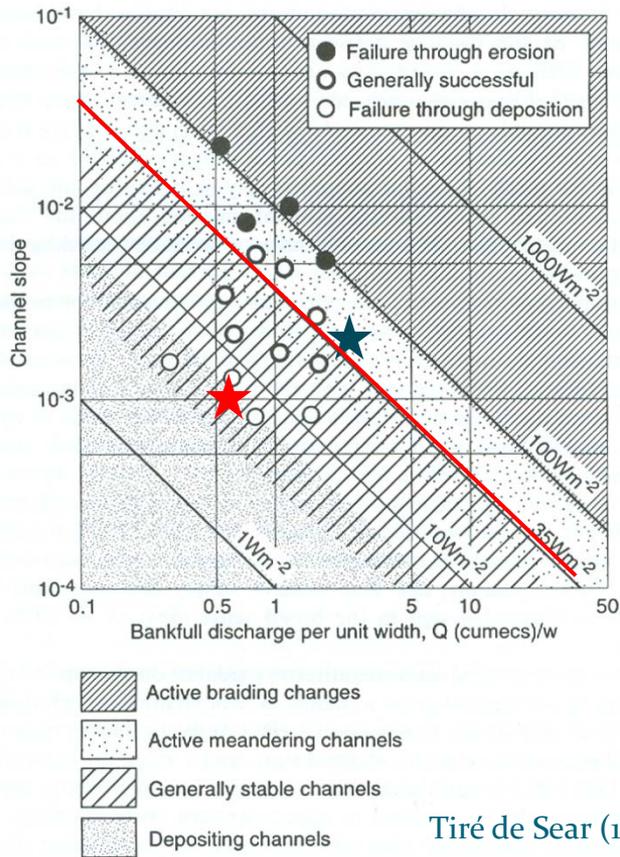
- débit plein-bord: Q (m^3/s)
- Pente du lit: S_o (m / m)
- Puissance: Ω (Watt / m) ($\propto Q S_o$)
- Puissance spécifique (“unit stream power”): $\omega = \Omega / \text{largeur} (W)$ (Watt / m^2)

$$\omega = \rho g Q S_o / W$$

où $\rho = \text{densité} (1000 \text{ kg} / \text{m}^3)$
 $g = 9.8 \text{ m} / \text{s}^2$



$$\text{Débit: } Q = V W Y$$



Tiré de Sear (1996)

Figure 6.6 River channel adjustment in relation to thresholds of stream power. After Brookes (1990), reproduced by permission of John Wiley & Sons Ltd

Valeur seuil de puissance spécifique (ω) pour distinguer les chenaux “actifs” des chenaux “passifs”: 35 Watt / m²

Exemples:

1) Petit cours d'eau des Basses-Terres ★

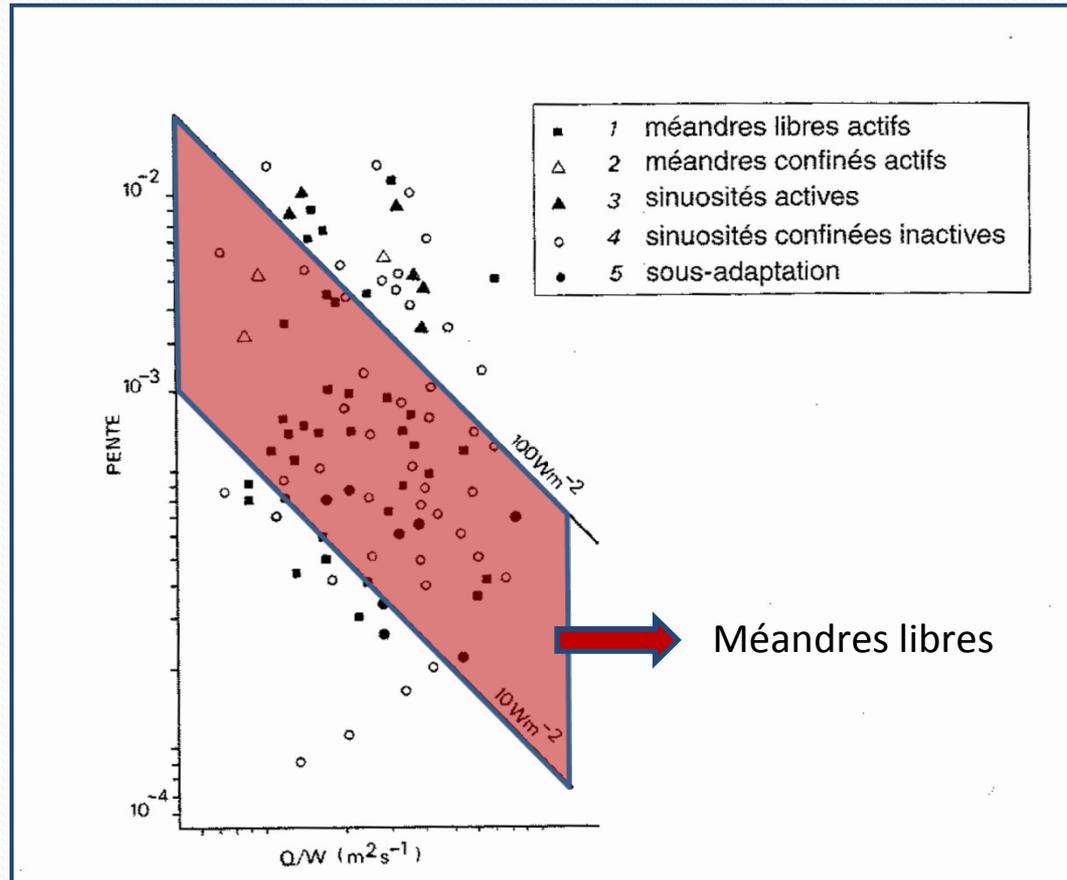
$$\left. \begin{array}{l} Q = 4 \text{ m}^3/\text{s} \\ S_o = 0.0012 \\ W = 7 \text{ m} \end{array} \right\} \omega = 7 \text{ Watt / m}^2$$

2) Cours d'eau moyen plus en amont ★

$$\left. \begin{array}{l} Q = 95 \text{ m}^3/\text{s} \\ S_o = 0.0018 \\ W = 35 \text{ m} \end{array} \right\} \omega = 48 \text{ Watt / m}^2$$

1. Notions de base

Méandres actifs ou inactifs?



Variation de la forme du lit en fonction de la puissance spécifique.

Résumé section 1

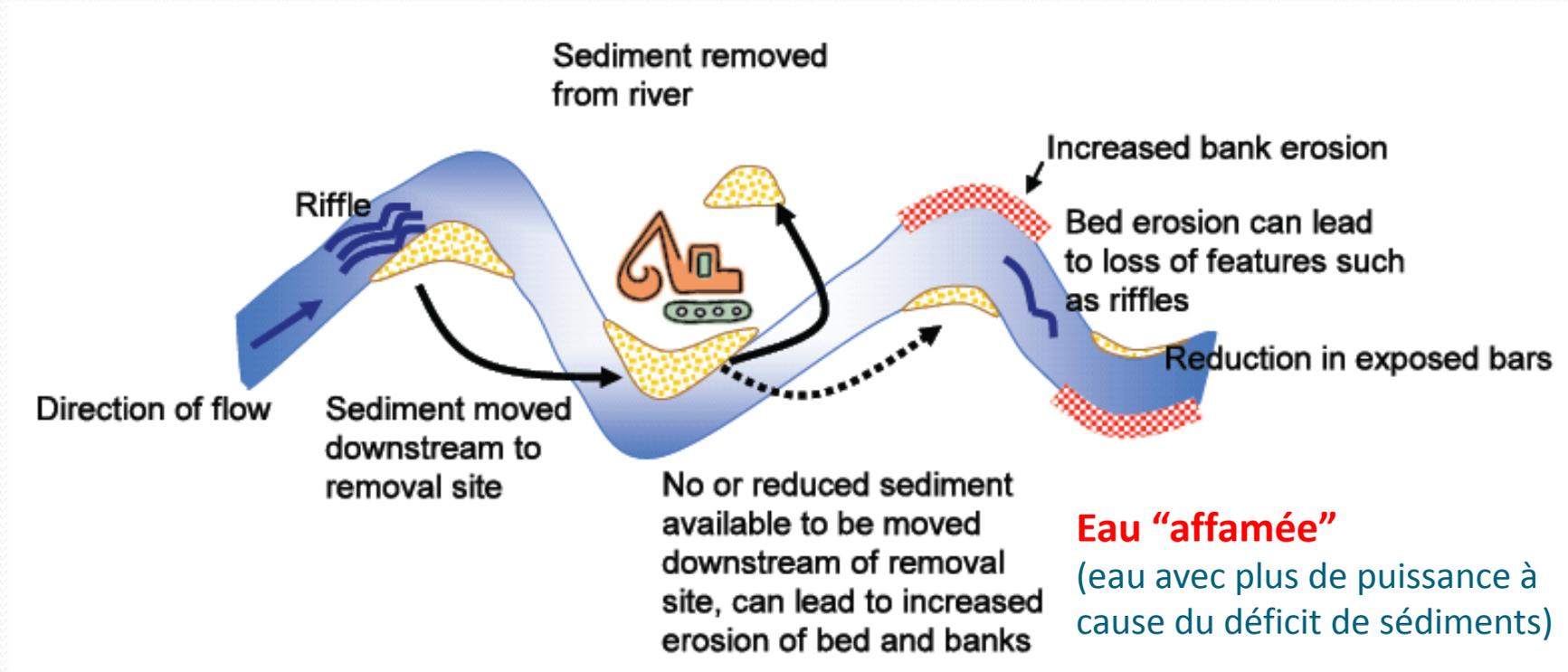
- La bassin-versant est une entité fondamentale qui permet le transfert du débit solide et liquide.
- Les cours d'eau sont ajustés afin de transporter efficacement la charge liquide et solide ➡ une modification de la pente, du débit liquide et/ou solide entraîne des ajustements.
- Les berges constituent la source principale de sédiments des cours d'eau agricole.
- La puissance spécifique des cours d'eau détermine s'ils sont dynamiques (érosion latérale fréquente) ou non.

2. Effets des perturbations anthropiques sur les petits cours d'eau

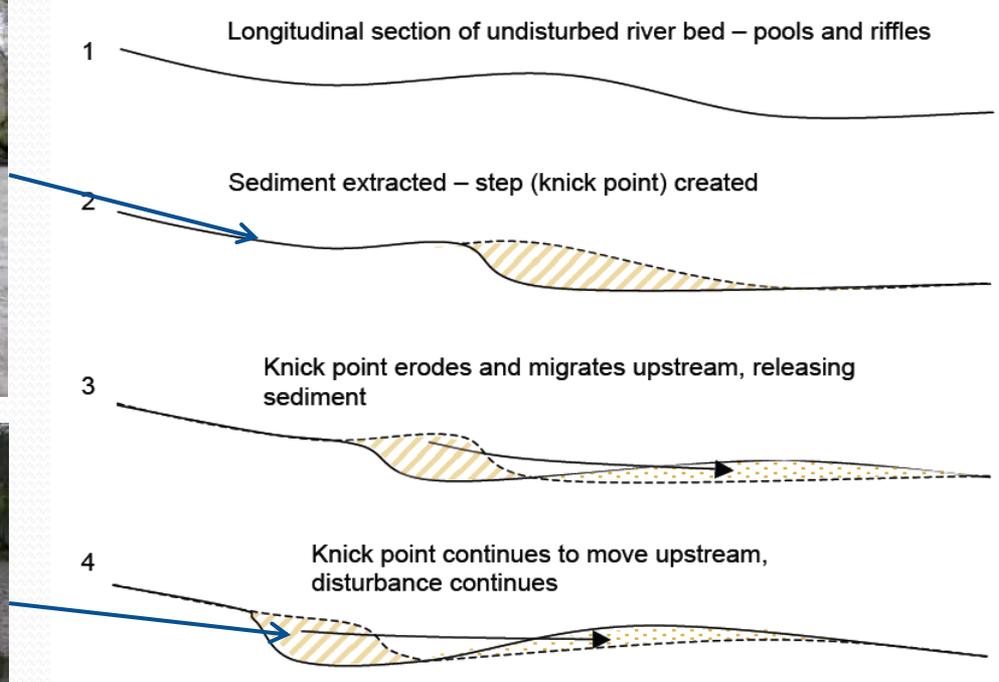
- Dragage et prélèvements de sédiments
- Linéarisation
- Drainage souterrain
- Seuils
- Prélèvements d'eau
- Stabilisation des rives

Dragage et prélèvements de sédiments

- Impacts se font sentir en amont et en aval



Érosion régressive suite à un dragage



Érosion régressive suite à un dragage



Water of Ruchill (Écosse)

Dragage: importance de bien comprendre la dynamique du débit solide



Bowmont Water
(Écosse): dragage le 5
août 2009 1 mètre
sous son niveau



4 septembre
2009: crue
(niveau
plein-bord)



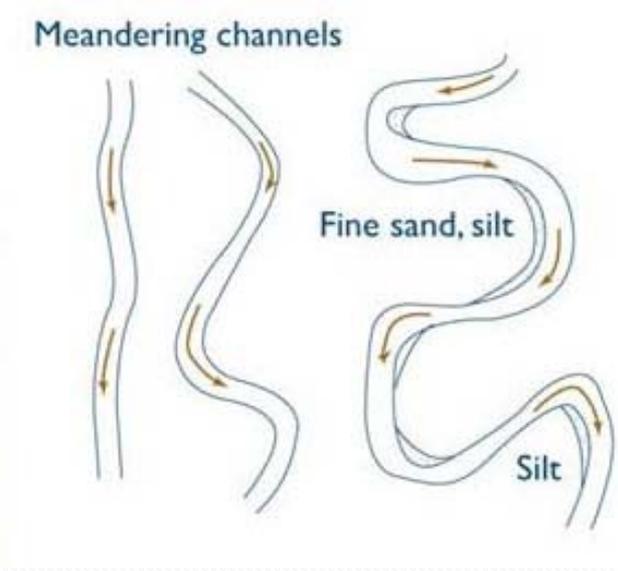
14 septembre 2009: le lit
s'est aggradé d'environ 1
mètre suite à la crue d'une
réurrence d'environ 1 an

Linéarisation: plus de 30,000 km de rivières au Québec



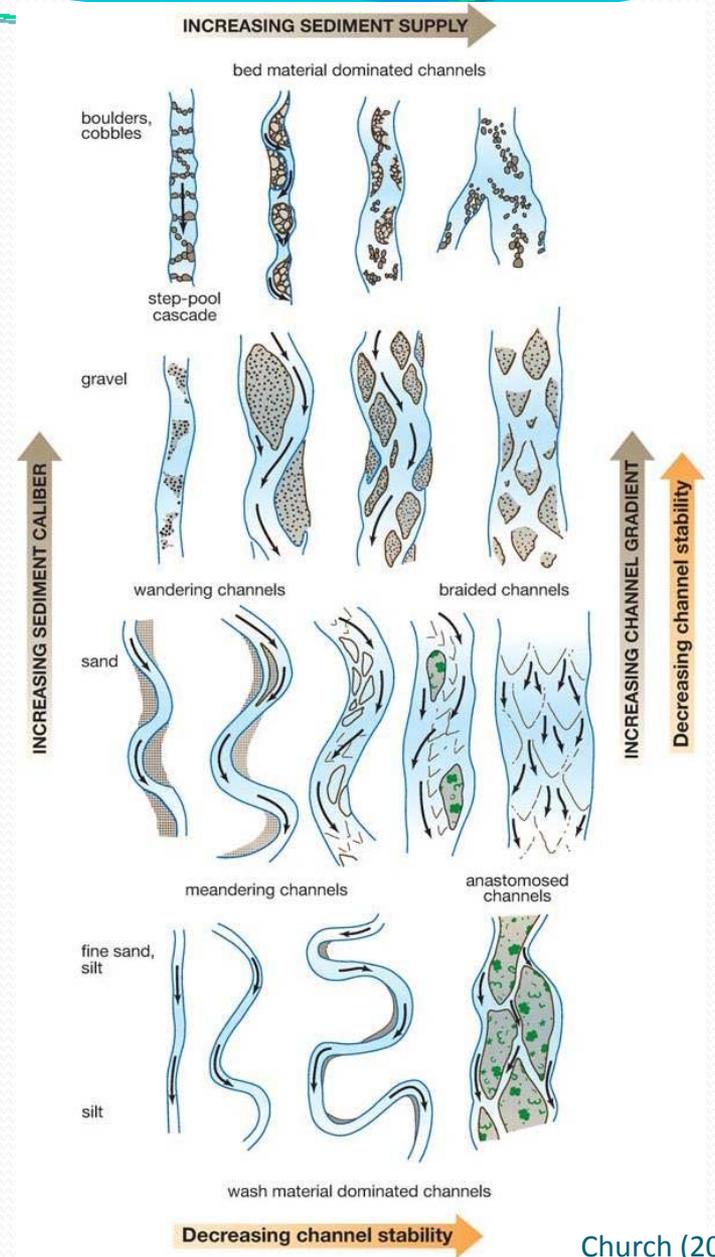
Ruisseau Richer (St-Marc-sur-Richelieu): parcours de 1932
superposé au parcours linéaire de 2006

Baisse de la stabilité du chenal →
 Hausse de l'apport en sédiments →

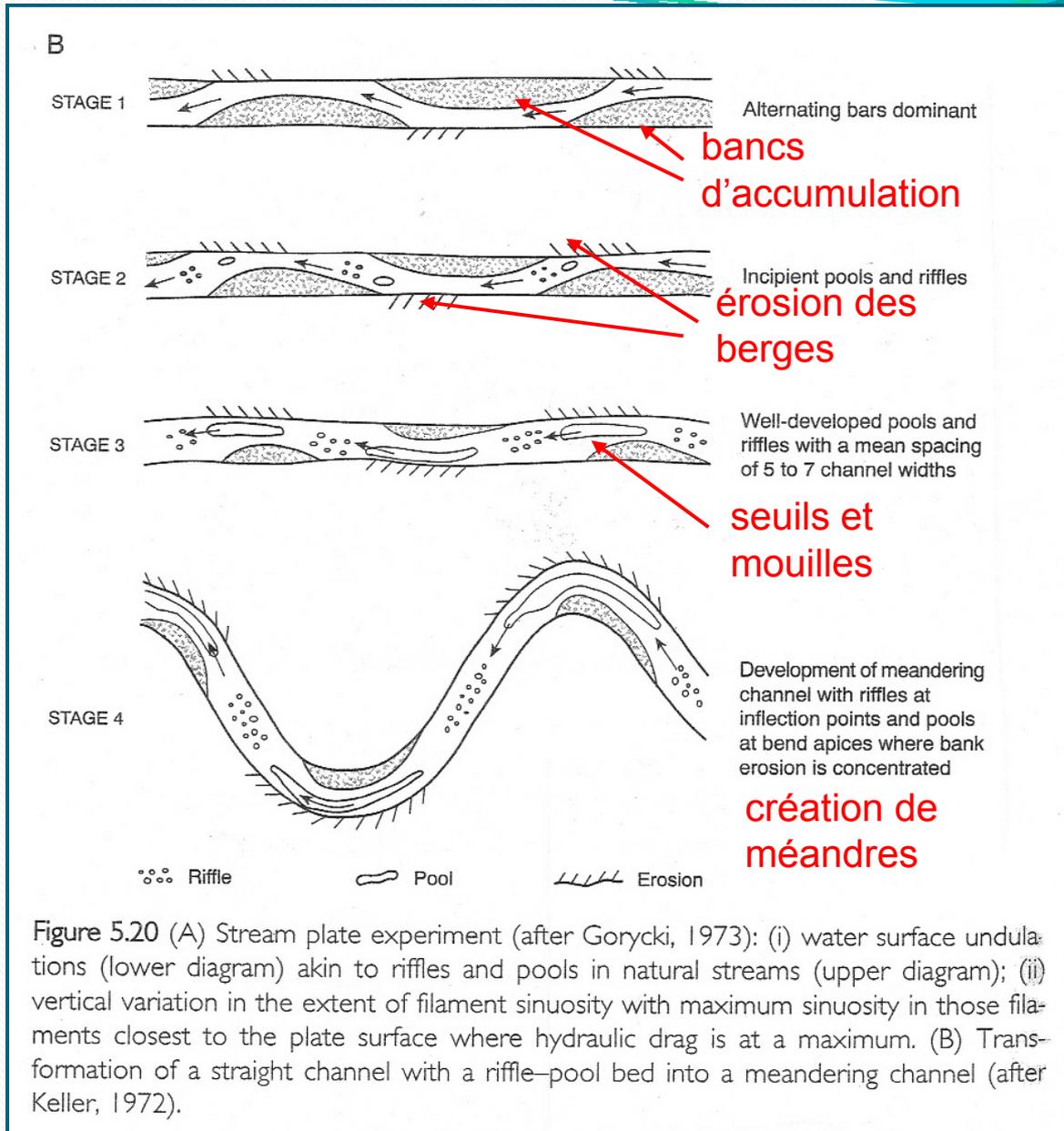


Hausse de la pente du chenal ↑
 Baisse de la stabilité des chenaux ↑
 Hausse de la taille des sédiments ↑

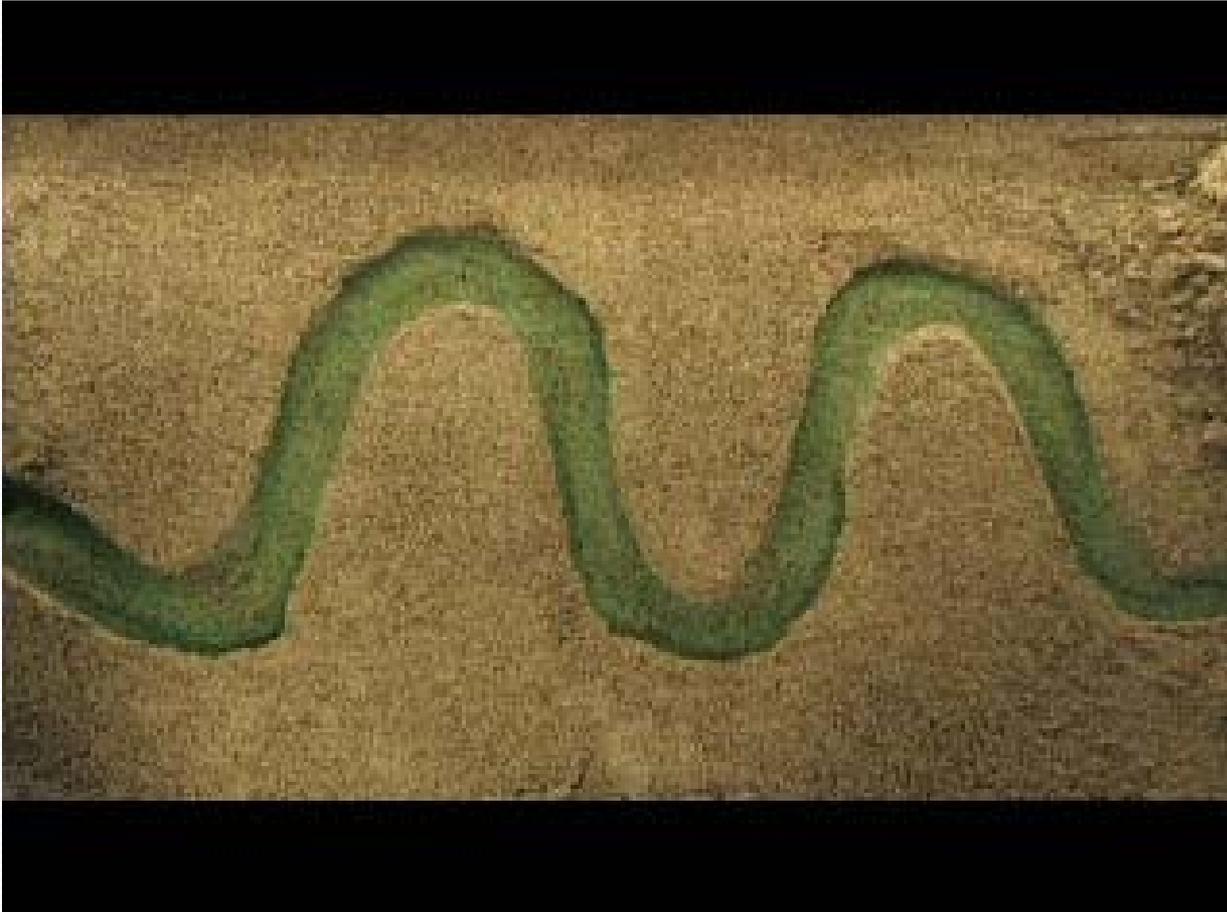
DONC: Les méandres sont une forme stable de cours d'eau lorsque les pentes sont faibles et les sédiments sont fins (milieu agricole)



Tendance naturelle des cours d'eau à suivre un parcours sinueux



Linéarisation et ajustements en laboratoire



Source: River Geomorphology Videos, Little River Research & Design

2. Perturbations anthropiques

Linéarisation et ajustements en nature



Source: River Geomorphology Videos, Little River Research & Design

2. Perturbations anthropiques

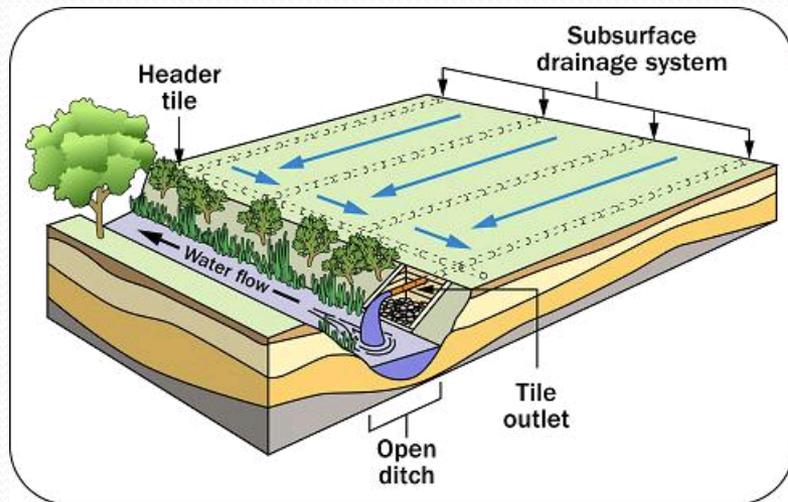
Grand River en 2011



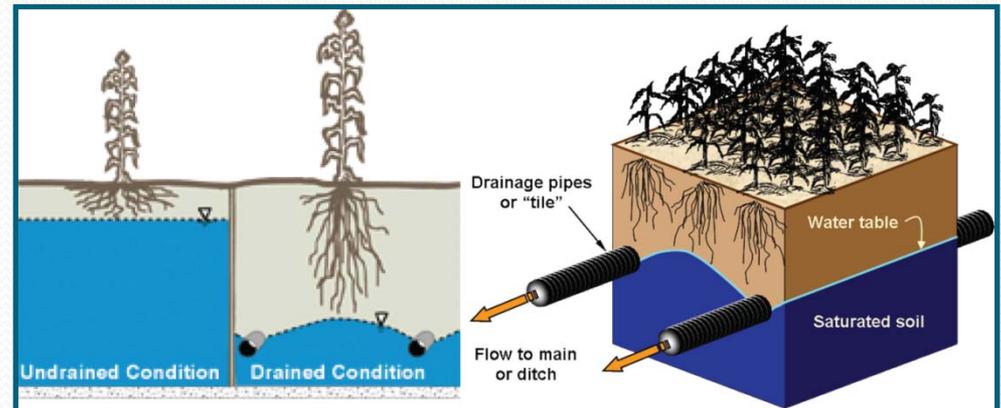
2. Perturbations anthropiques

Drainage souterrain

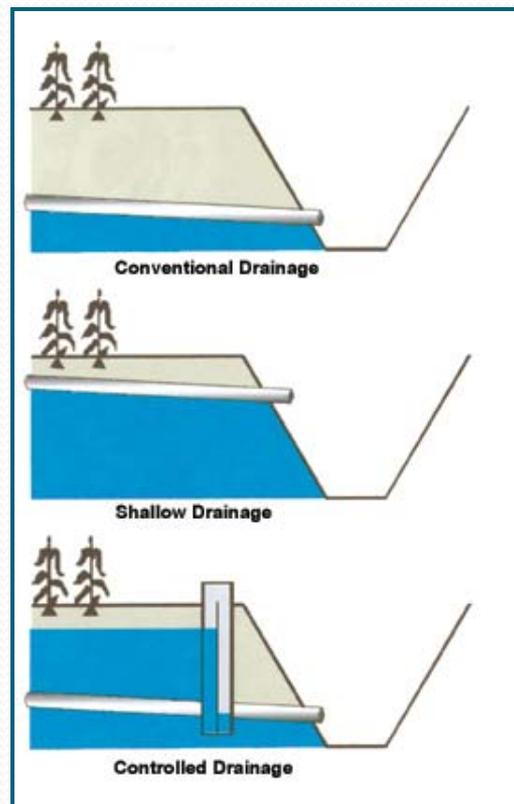
- Baisse du niveau de la nappe phréatique
- Écoulement sous la surface rapide
- Augmente les débits de pointe là où les sédiments sont perméables, diminue les débits de pointe là où les sédiments sont fins et peu perméables



<http://www.omafra.gov.on.ca>



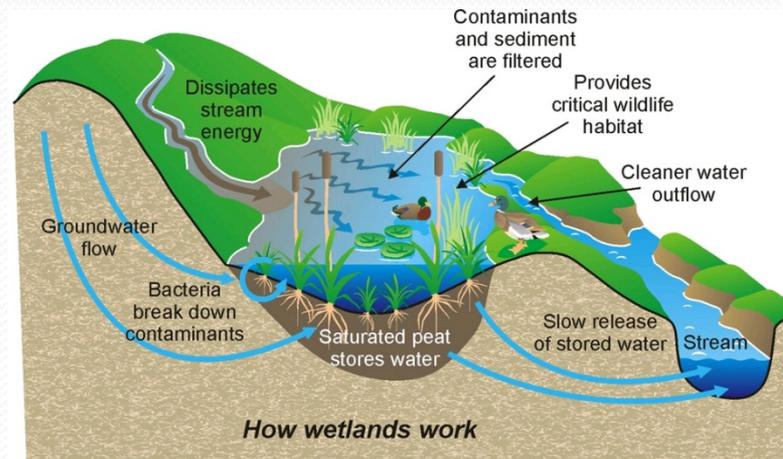
- Solutions pour remonter le niveau de la nappe phréatique: drainage peu profond ou drainage contrôlé



<http://www.extension.umn.edu/distribution/ropystems/dc7740.html>

Drainage souterrain

- Diminution de la qualité de l'eau (nitrates et phosphore). Exemple en Illinois: drainage artificiel contribue 67% du phosphore dissous (Lemke et al., 2011).
- Solution: milieux humides construits: peuvent intercepter entre 46 et 90% du nitrate (Lemke et al. 2011), mais... applicabilité?



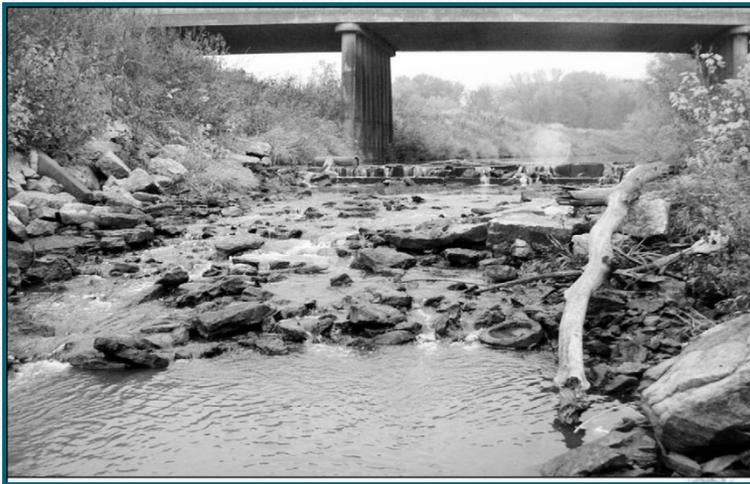
Seuils

- Concept de fragmentation longitudinale



Structure de contrôle (“low-drop grade-control structure”) typique sur le Hotophia Creek, Mississippi.

- Fragmentation longitudinale réduite avec des pentes plus douces



Structures de contrôle au site G3 du Turkey Creek (Iowa) à l'automne 2004 (gauche) avant les modifications (pente 4:1) et à l'automne 2005 (droite) après la modification de la pente (13:1). De 2002 à 2004, aucun poisson n'a passé la structure. Après la modification, les poissons-chats, chabots et vandoises ont réussi à traverser la structure.

Prélèvements d'eau

- Débit liquide réduit: Impacts sur la biodiversité, l'habitat, la connectivité et la qualité de l'eau (Kanno et Vokoun, 2010)
- Diminution de l'écoulement de surface et des pics de crue
- Baisse du niveau de la nappe phréatique



Prélèvements d'eau dans des champs au Michigan



Wyoming: rivière Wind en amont d'une diversion d'eau (Wind River Alliance)

Stabilisation des rives

- Empêche l'approvisionnement en sédiments de la rivière – perturbe l'équilibre entre le débit liquide et solide (balance de Lane) – engendre possiblement une érosion accrue du lit, et presque assurément de l'érosion plus en aval
- Solution dite “curative” (ou “band-aid”)



- Berges: source importante de sédiments dans les rivières en zones de transfert et en zones de dépôt du bassin-versant (donc très importantes en milieu agricole) (e.g. plus de 80%, Smith et Dragovich, 2008)
- Érosion de berge: façon normale pour une rivière de dissiper son énergie lors des crues



Développement d'un "cut-off" dans un méandre sur la rivière Wabash, Illinois (Zinger et al., 2011).

Érosion des berges: un problème?

Articles

Bank Erosion as a Desirable Attribute of Rivers

JOAN L. FLORSHEIM, JEFFREY F. MOUNT, AND ANNE CHIN

Bank erosion is integral to the functioning of river ecosystems. It is a geomorphic process that promotes riparian vegetation succession and creates dynamic habitats crucial for aquatic and riparian plants and animals. River managers and policymakers, however, generally regard bank erosion as a process to be halted or minimized in order to create landscape and economic stability. Here, we recognize bank erosion as a desirable attribute of rivers. Recent advances in our understanding of bank erosion processes and of associated ecological functions, as well as of the effects and failure of channel bank infrastructure for erosion control, suggest that alternatives to current management approaches are greatly needed. In this article, we develop a conceptual framework for alternatives that address bank erosion issues. The alternatives conserve riparian linkages at appropriate temporal and spatial scales, consider integral relationships between physical bank processes and ecological functions, and avoid secondary and cumulative effects that lead to the progressive channelization of rivers. By linking geomorphologic processes with ecological functions, we address the significance of channel bank erosion in sustainable river and watershed management.

Keywords: bank erosion, riparian ecology, fluvial geomorphology, sediment, aquatic ecology

Bioscience, Juin 2008, vol. 58, no. 6, p. 519-529

Tout n'est pas noir ou blanc...

- Berges = source naturelle de sédiments pour les rivières, mais modifications anthropiques peuvent accentuer l'érosion de berges et créer un surplus de sédiments.
- Distinction à faire entre les “bons sédiments” (dynamique naturelle) et les “mauvais sédiments” (ruissellement excessif en provenance des champs) qui ont un impact négatif sur la qualité de l'eau.

- Clef pour les “mauvais sédiments”: Briser la connectivité entre les champs et les cours d’eau, particulièrement au printemps.



Agriculture et Agro-Alimentaire Canada



Rodale Institute

Résumé section 2

- Parcours sinueux est la forme stable de la plupart des cours d'eau agricole.
- La sinuosité permet au cours d'eau d'ajuster sa pente, qui elle-même gouverne le taux de transfert de l'énergie potentielle (fonction de l'élévation au-dessus du niveau de base) en énergie cinétique (puissance). La sinuosité permet donc au cours d'eau de dissiper efficacement son énergie sur toute sa longueur.
- La plupart des interventions anthropiques modifient la dynamique sédimentaire des cours d'eau, ce qui engendre des ajustements.

Résumé section 3 (suite)

- Très complexe d'intervenir dans un cours d'eau sans qu'il n'y ait de conséquences en amont et/ou en aval
- Les interventions qui ne tiennent pas compte de la source du problème risquent d'échouer à moyen et à long terme.

Constat:

Beaucoup d'échecs en restauration



Vue vers l'aval du pont de Uvas Creek (Californie) en janvier 1996 (avant restauration) à gauche et en juillet 1997 (à droite) quand le chenal a été complètement démoli par une crue d'un intervalle de récurrence de 6 ans (Kondolf et Yang, 2008)



Gauche: échec d'une structure de protection de berge en raison de la pression d'eau dans les pores ("pore-water pressure") de la berge;

Droite: le processus d'érosion continue en arrière des roches censées protéger la berge (Florsheim et al. 2008)

Solutions:

Perspectives de développement durable

« La pratique traditionnelle de gestion des sédiments dans les cours d'eau est de traiter les symptômes plutôt que de s'attaquer aux causes. Une approche plus durable tend à gérer le problème à la source, mais ceci requiert une identification correcte de la cause et de ses effets » Sear (1996), p. 171

- Restaurer les processus plutôt que les formes

Process-based Principles for Restoring River Ecosystems

Bioscience, vol. 60, no. 3, p. 209-222, 2010

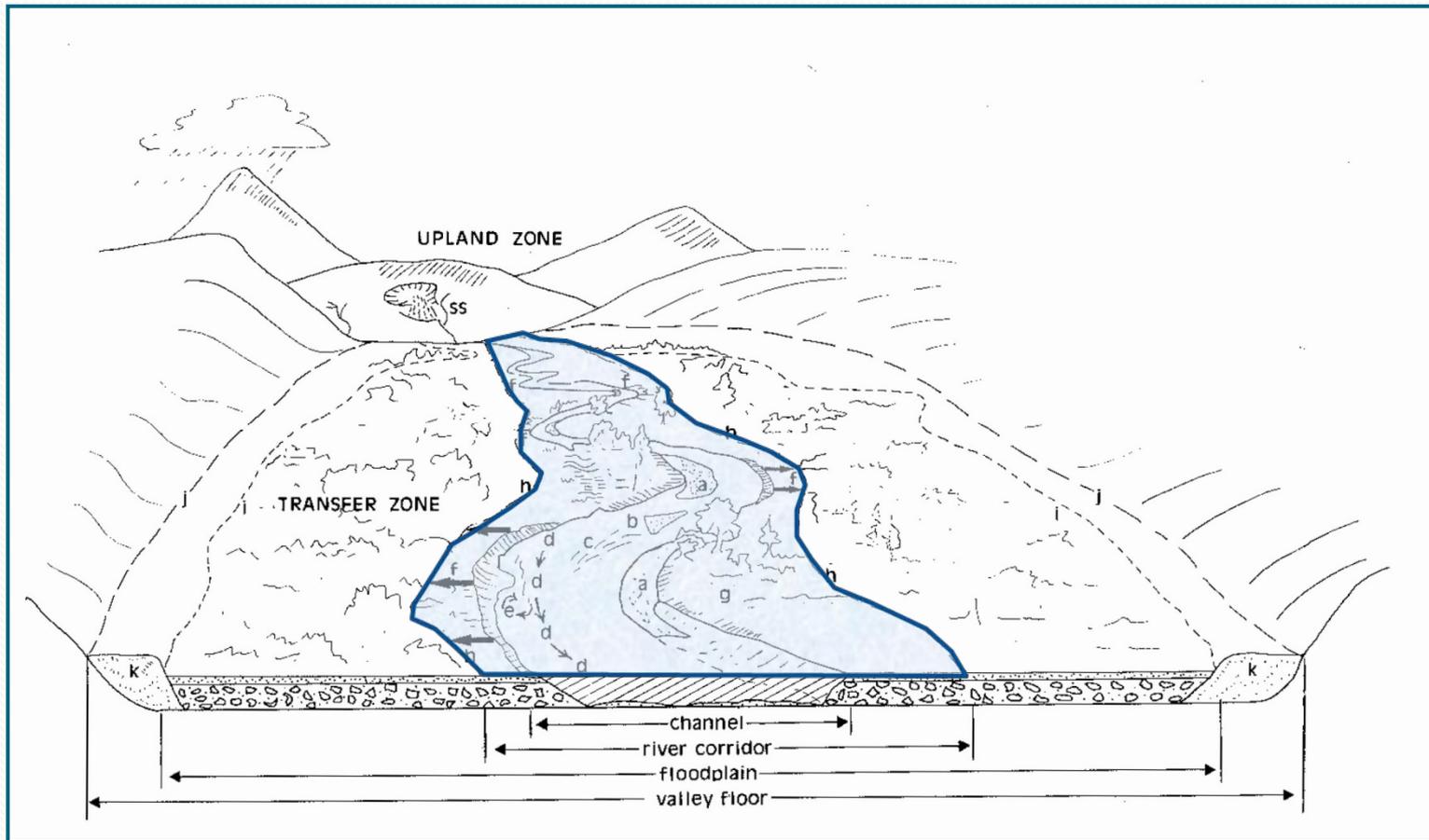
TIMOTHY J. BEECHIE, DAVID A. SEAR, JULIAN D. OLDEN, GEORGE R. PESS, JOHN M. BUFFINGTON, HAMISH MOIR, PHILIP RONI, AND MICHAEL M. POLLOCK

Approche hydro-géomorphologique:

- L'érosion de berges est un processus naturel, donc ce ne sont pas toutes les berges qui s'érodent qui sont problématiques et qui doivent être contrôlées.
- En général, l'érosion de berges devient un problème lorsque le développement urbain ou agricole a limité la tendance naturelle des cours d'eau à méandrer.
- Consensus dans la science hydro-géomorphologique: intervenir le moins possible dans les cours d'eau (i.e. laisser le cours d'eau revenir à un équilibre dynamique) est en général la meilleure solution (et la moins coûteuse) à long terme.

3. L'espace de liberté d'un cours d'eau

- un cadre de gestion des cours d'eau basé sur une approche hydro-géomorphologique



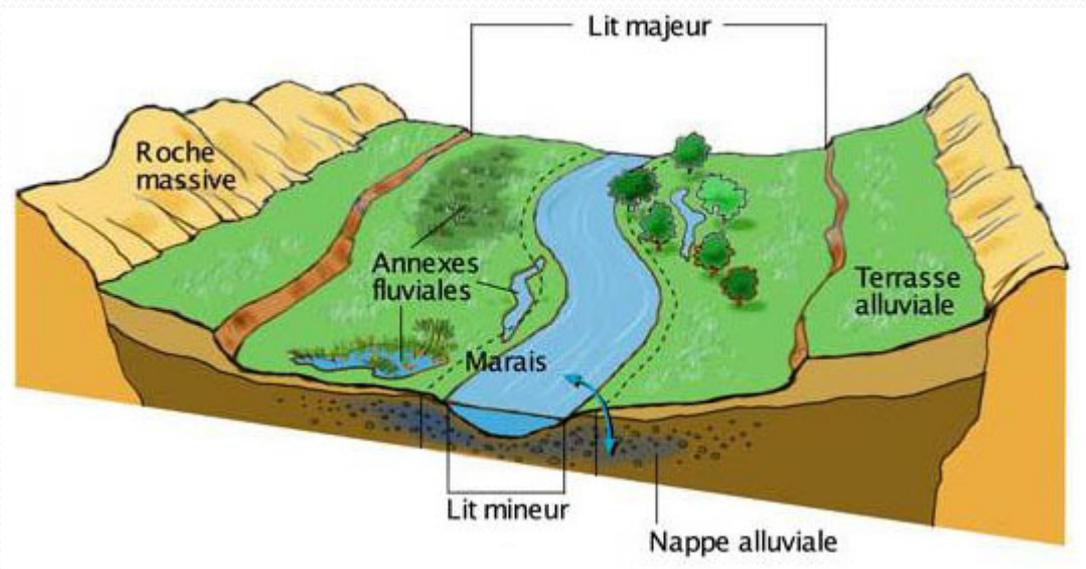
Le bassin-versant dans une perspective de restauration: a) banc d'accumulation (point bar), b) banc (mid-bar), c) écoulement peu profond, d) écoulement profond, e) écoulements secondaires, f) érosion de berges, g) végétation dans le corridor qui accroît la rugosité, h) limite du corridor de rivière, i) limite de la plaine d'inondation, j) limite de la vallée, k) terrasse, ss) zones d'apport et de stockage de sédiments. Source: Brookes et al. (1996)

Avantages de l'espace de liberté

- Méandres pouvant migrer latéralement à l'intérieur d'un corridor défini;
- Bandes riveraines plus large limitant les problèmes d'érosion et de pollution due à l'écoulement en provenance des champs;
- Présence d'une plaine d'inondation qui accroît la connectivité latérale (avantage pour la biodiversité).
- Permet d'accroître la résilience des cours d'eau face à l'augmentation de la variabilité et de l'amplitude des débits liquides et solides liée aux changements climatiques.

Espace de liberté =

- Espace de mobilité +
- Espace d'inondabilité +
- Milieux humides



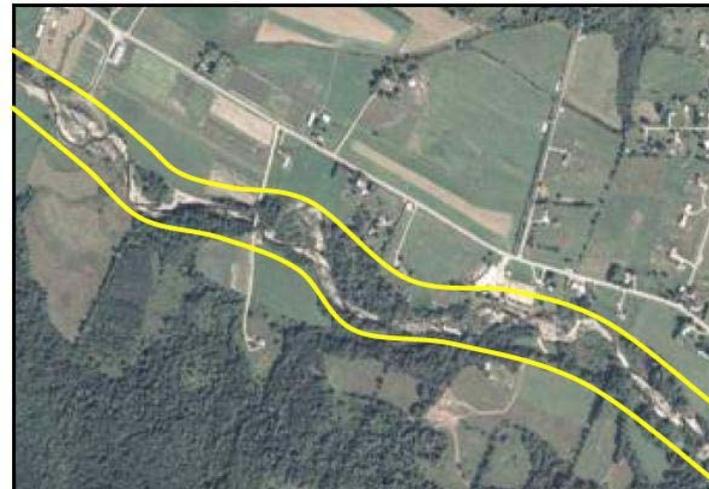
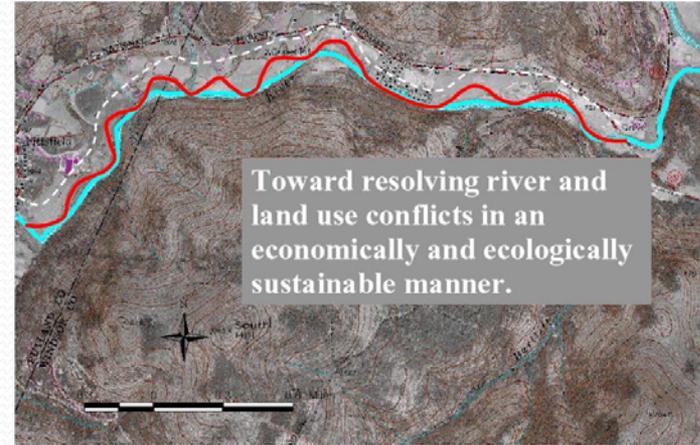
http://www.eau-loire-bretagne.fr/espace_documentaire/documents_en_ligne/guides_milieux_aquatiques/Leau_LB_77.pdf

Alternatives for River Corridor Management Vermont DEC River Management Program

Quelques exemples



Rivière Veyle (nord de Lyon, France)
Photo: Hervé Piégay



Defining and protecting the meander belt width corridor that will accommodate equilibrium conditions may be the most important objective in any river restoration project.

Espace de liberté au Vermont
Vermont Agency of Natural Resources

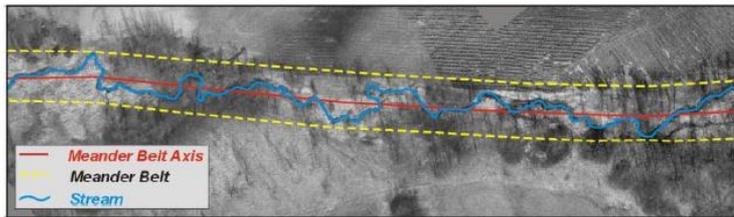
Exemple au Danemark



La rivière Brede près de Løgumkloster, Danemark. A) Chenal linéarisé; B) même cours d'eau 3 ans après des travaux de restauration.

Délimitation de l'espace de mobilité en Ontario

Belt Width Delineation Procedures



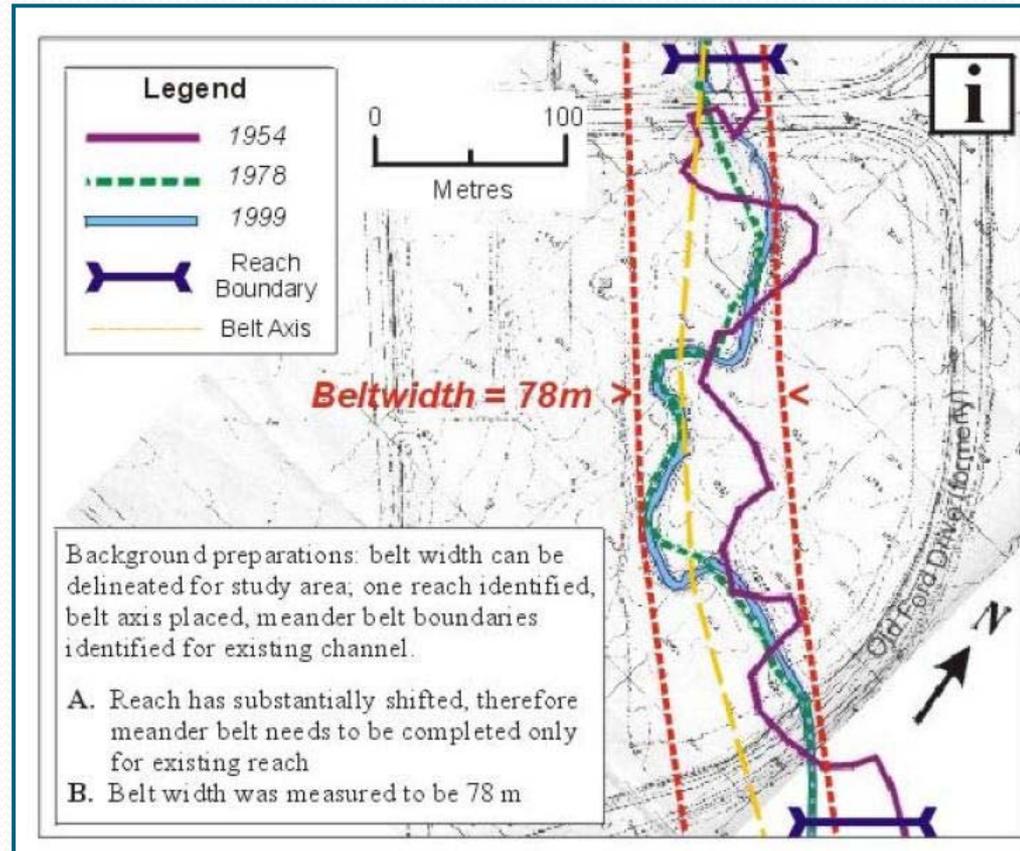
Report to: Toronto and Region Conservation Authority
5 Shoreham Drive,
Downsview, Ontario
M3N 1S4

Attention: Mr. Ryan Ness

Report No: 98-023 – Final Report

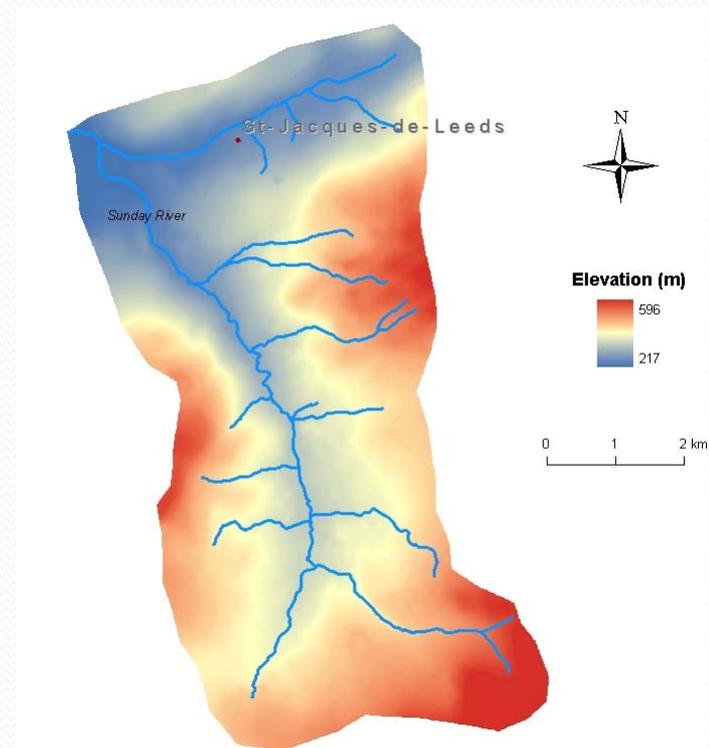
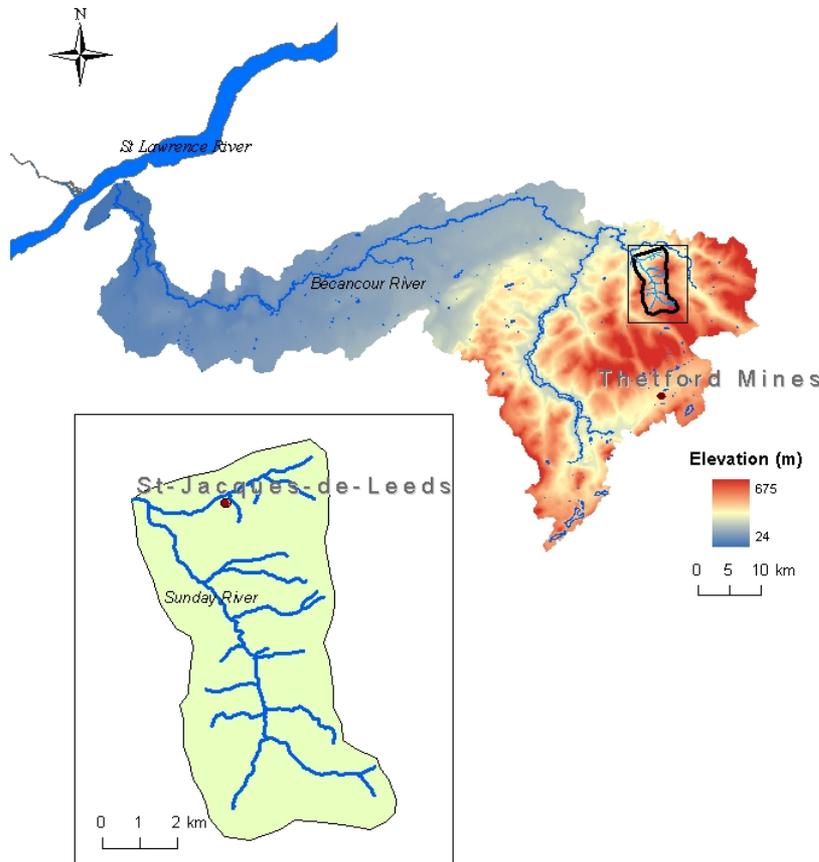
Date: Sept 27, 2001 (Revised January 30, 2004)

Submitted by:

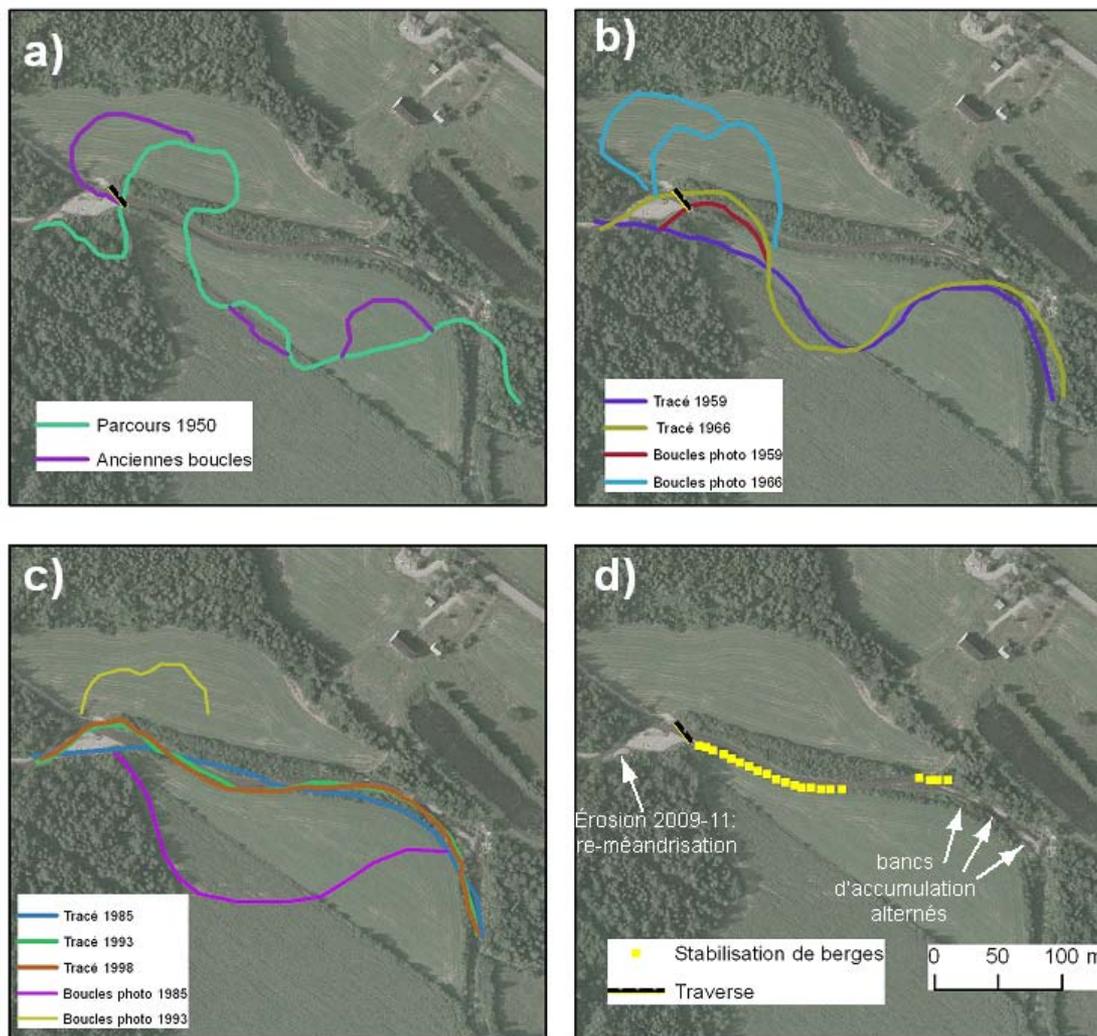


Rivière Sunday (bassin-versant de la Bécancour)

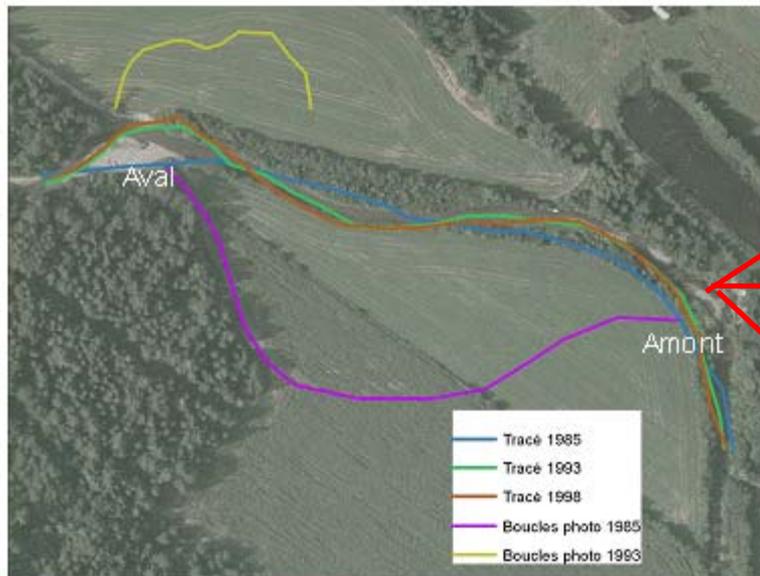
- Impact des interventions répétées de linéarisation, dragage et stabilisation de berges dans l'espace de liberté d'une rivière à truites.



Rivière en ajustement perpétuel depuis les années 50 (première série de linéarisation)



- Ajustements suite à la linéarisation: érosion de berge marquée



2009

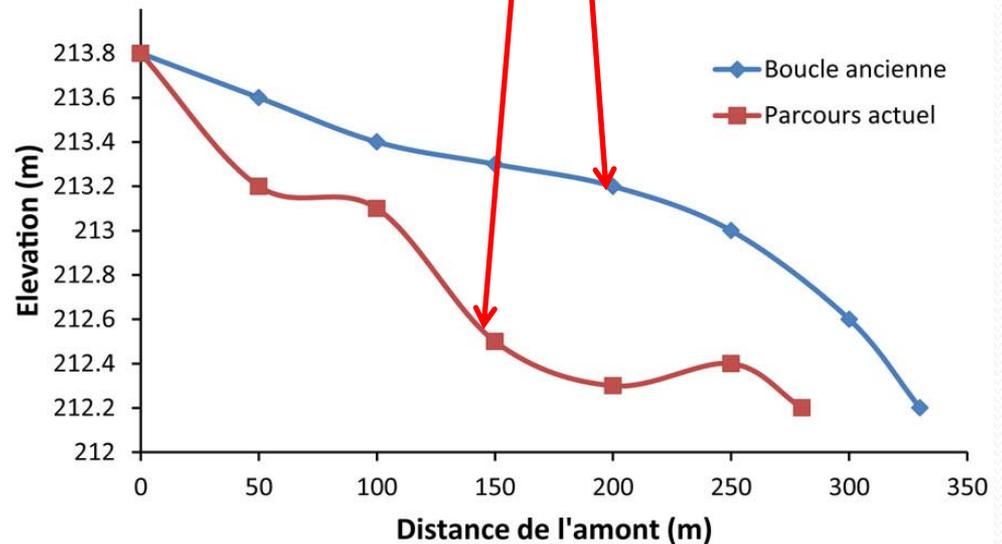
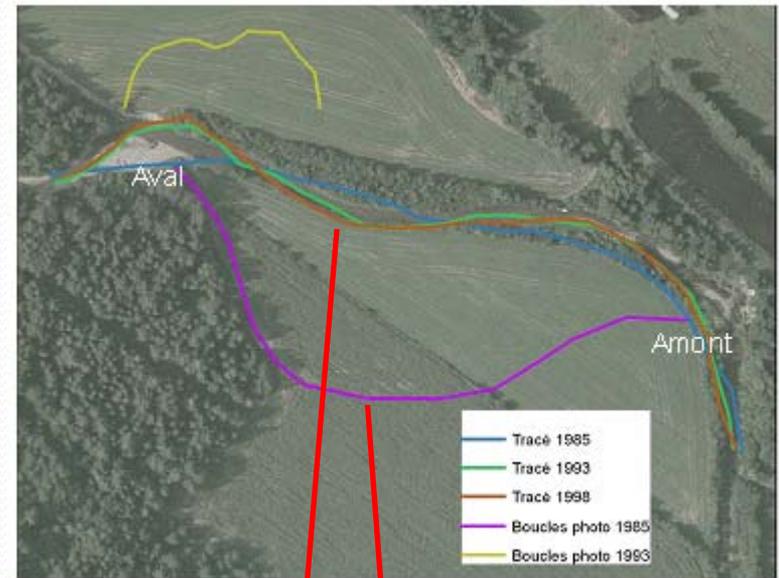


2010



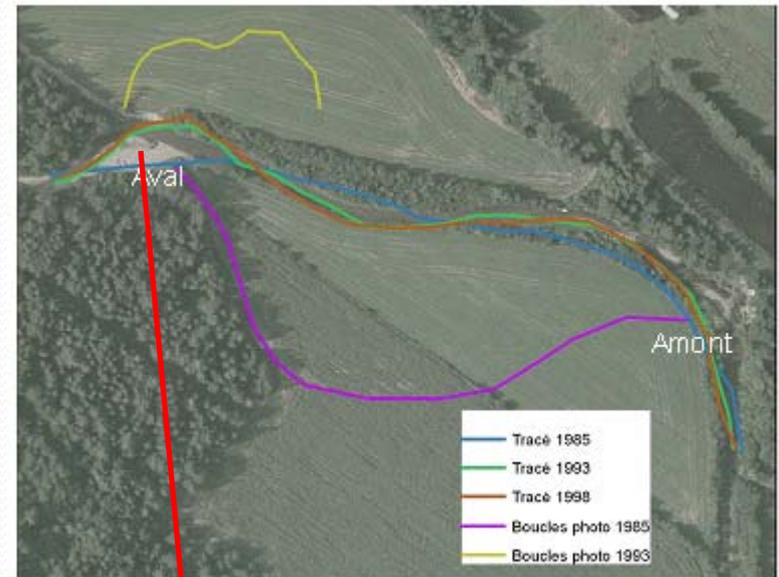
2011

- La pente du cours d'eau modifié ne permet pas une dissipation uniforme de l'énergie (grande variabilité de la puissance spécifique)



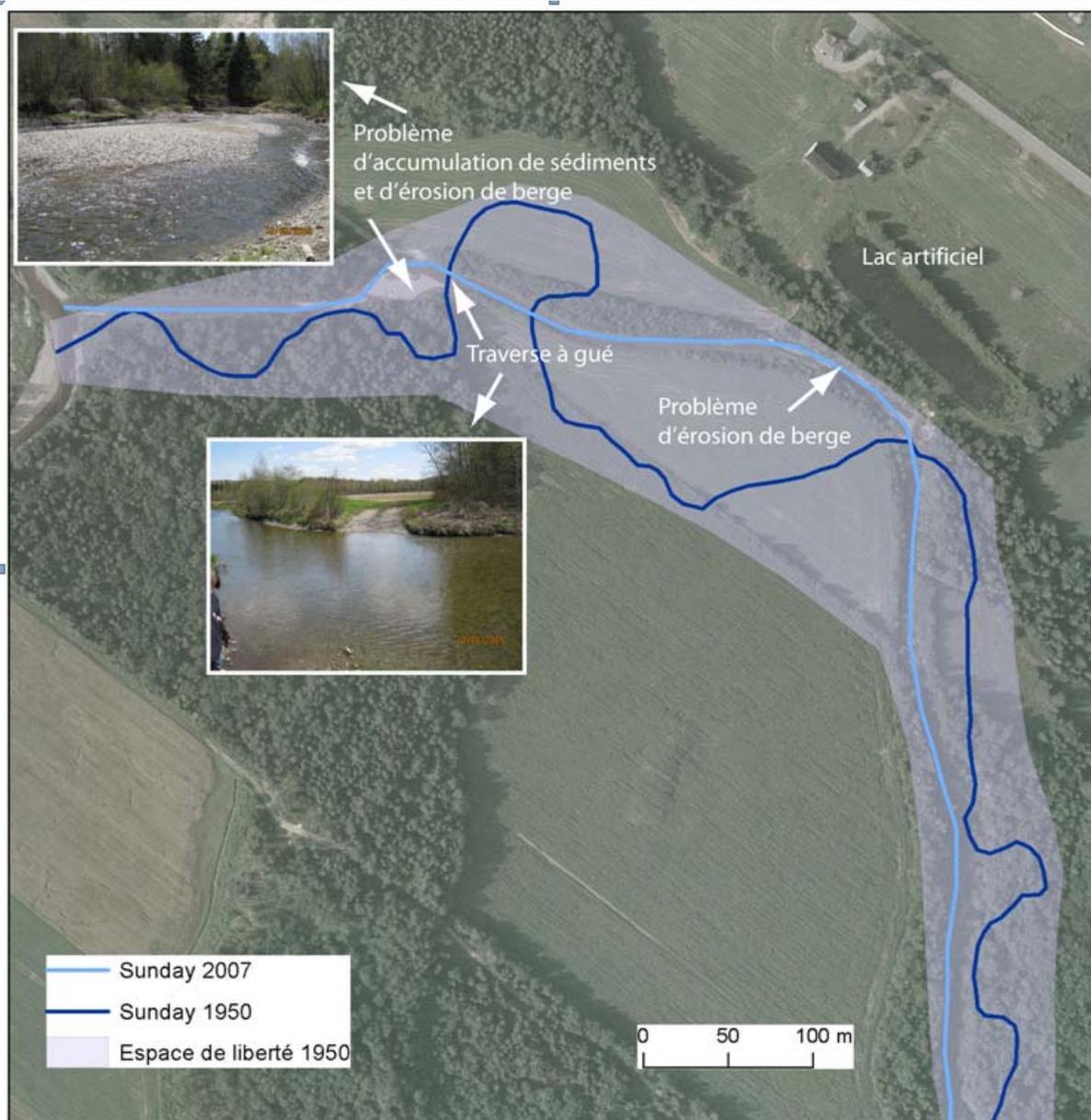
- Résultat: dépôt de sédiments dans un banc d'accumulation en aval

- Engendre une érosion accélérée des berges
- Solution préconisée dans les dernières années? Prélèvement des sédiments du banc...



- Clairement pas une approche durable dans la rivière Sunday de ne pas tenir compte de l'espace de liberté

Note: espace de liberté approximatif sur cette figure

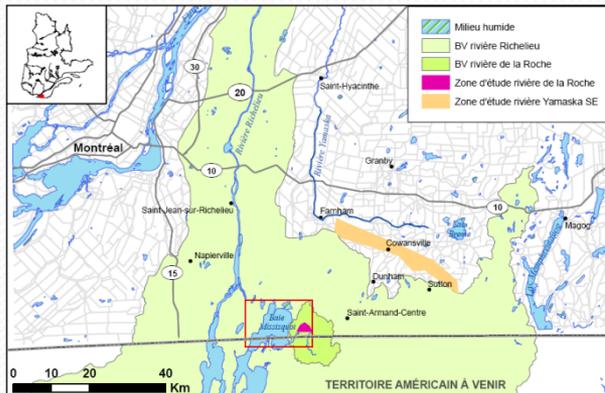


3. Espace de liberté

Projet Ouranos (PACC-26)

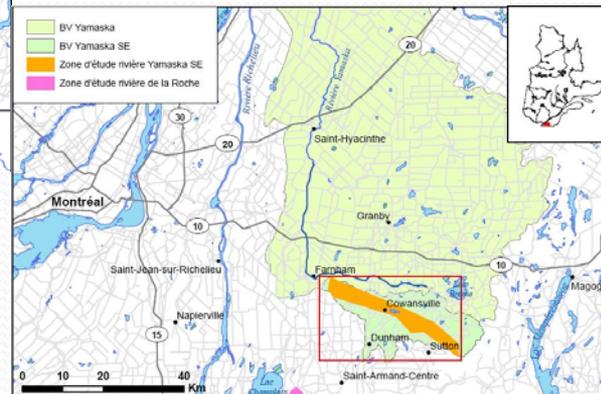
En collaboration avec Thomas Buffin-Bélanger (UQAR) et Marie Larocque (UQAM)

- Déterminer l'espace de liberté pour 3 cours d'eau du Québec : de la Roche, Yamaska Sud-Est et Matane

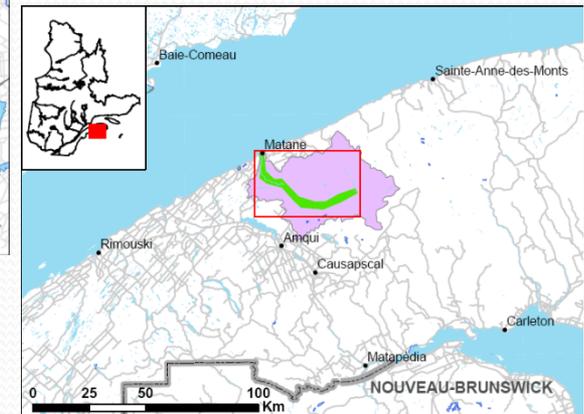


Rivière de la Roche

Rivière Yamaska Sud-Est

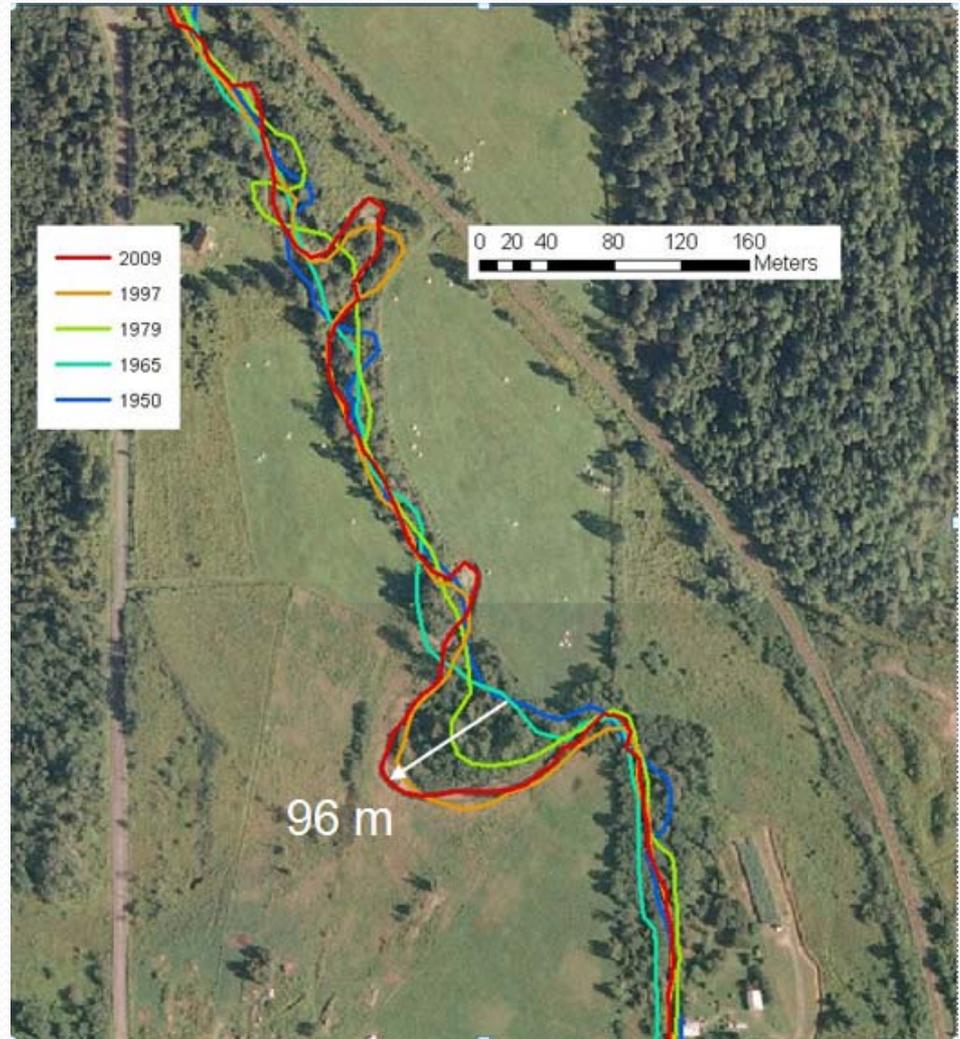


Rivière Matane



Désignation de l'espace de mobilité

- Analyse de photographies aériennes historiques géoréférencées
- Analyse de terrain (évidence d'érosion active)



Espace de mobilité: Rivière Matane

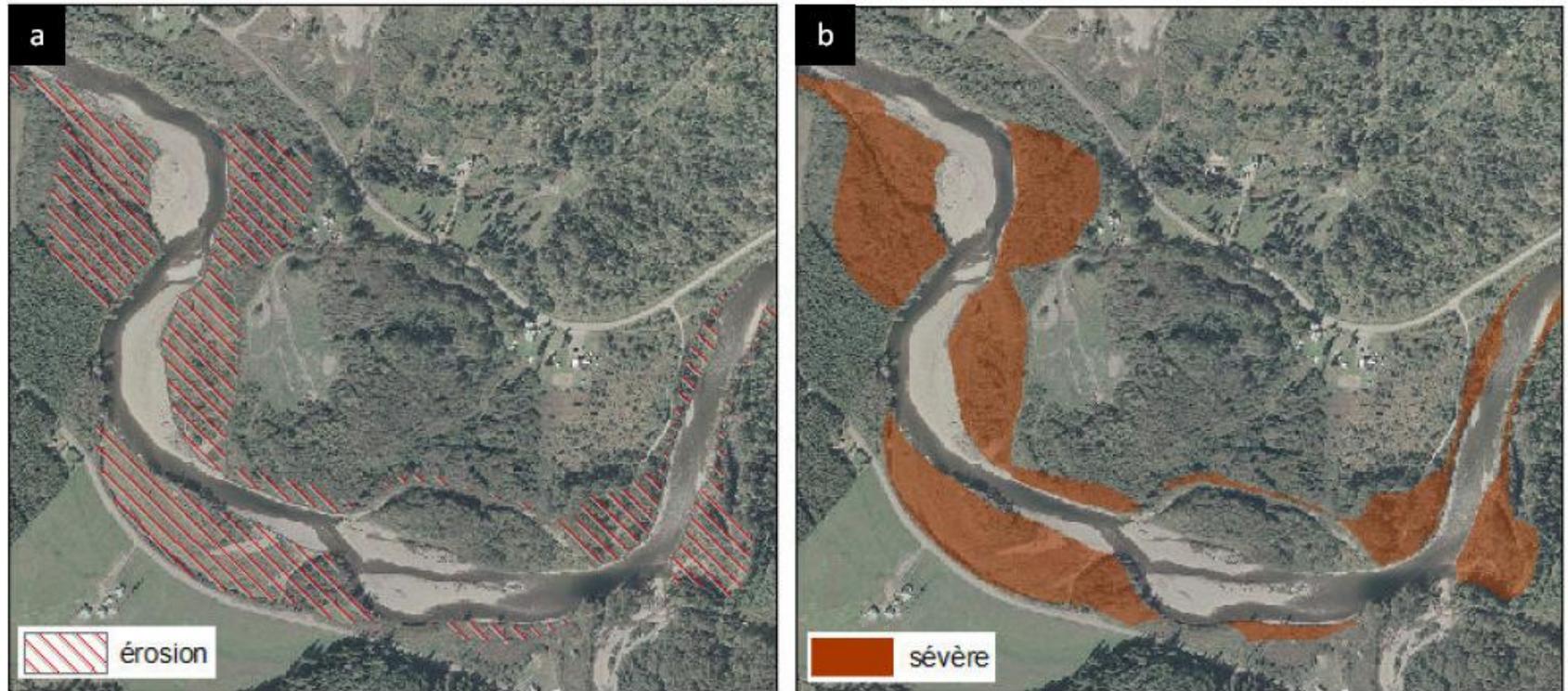
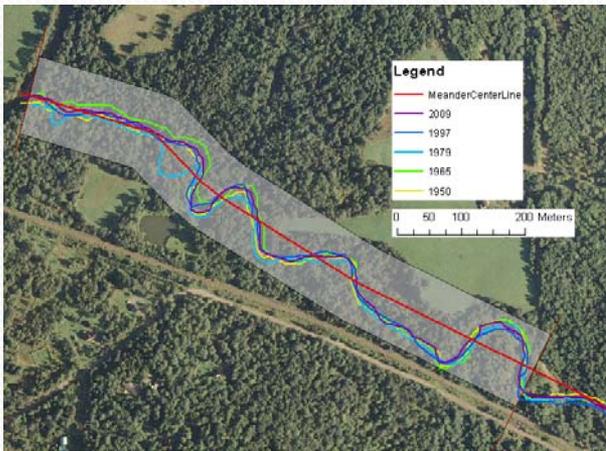


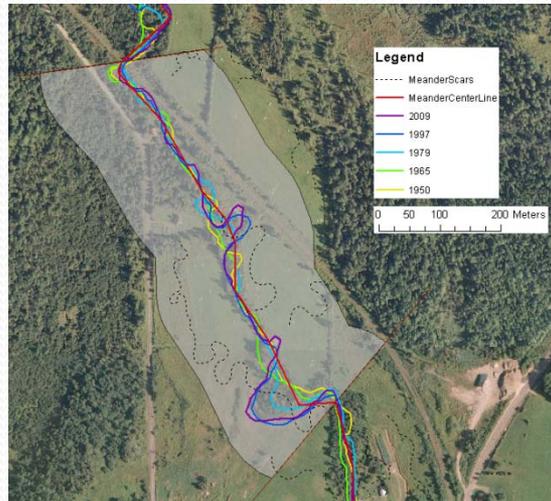
Figure 3 : a) Exemple de la cartographie de l'érosion projetée dans un horizon de 50 ans et b) le niveau de risque qui y est associée.

Espace de mobilité: Rivière Yamaska Sud-Est

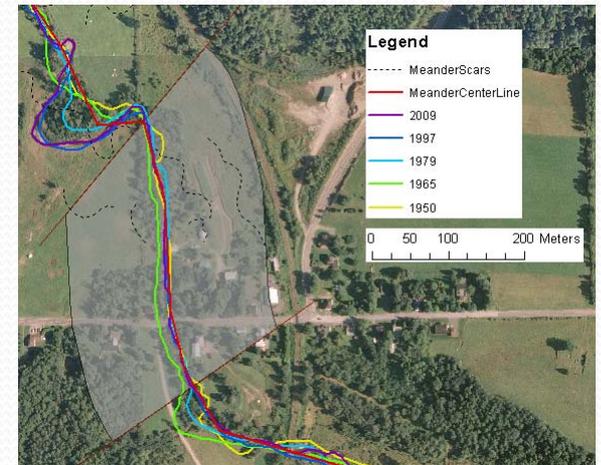
- Analyse par tronçon...



en équilibre



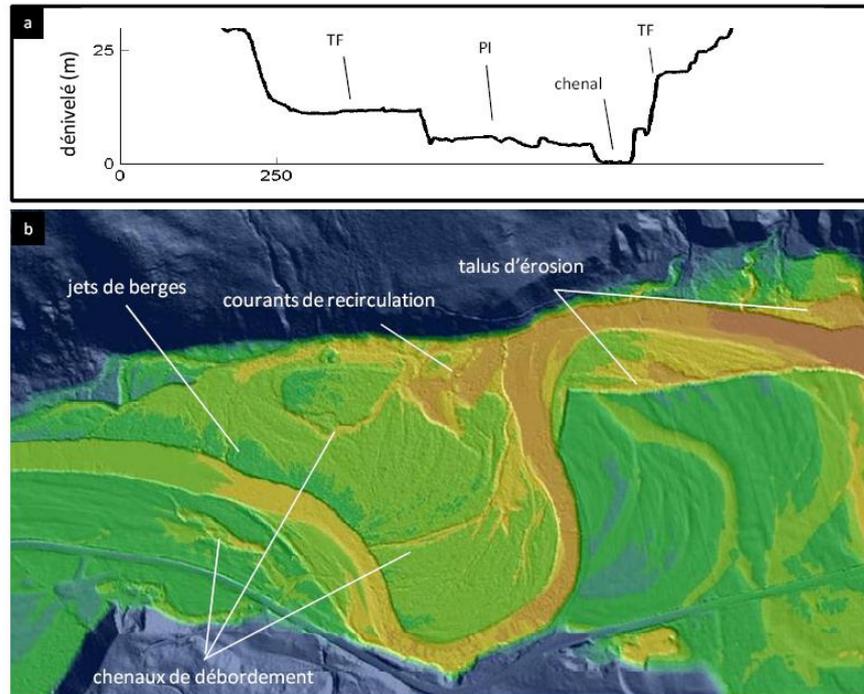
en ajustement



artificialisé

Désignation de l'espace d'inondabilité

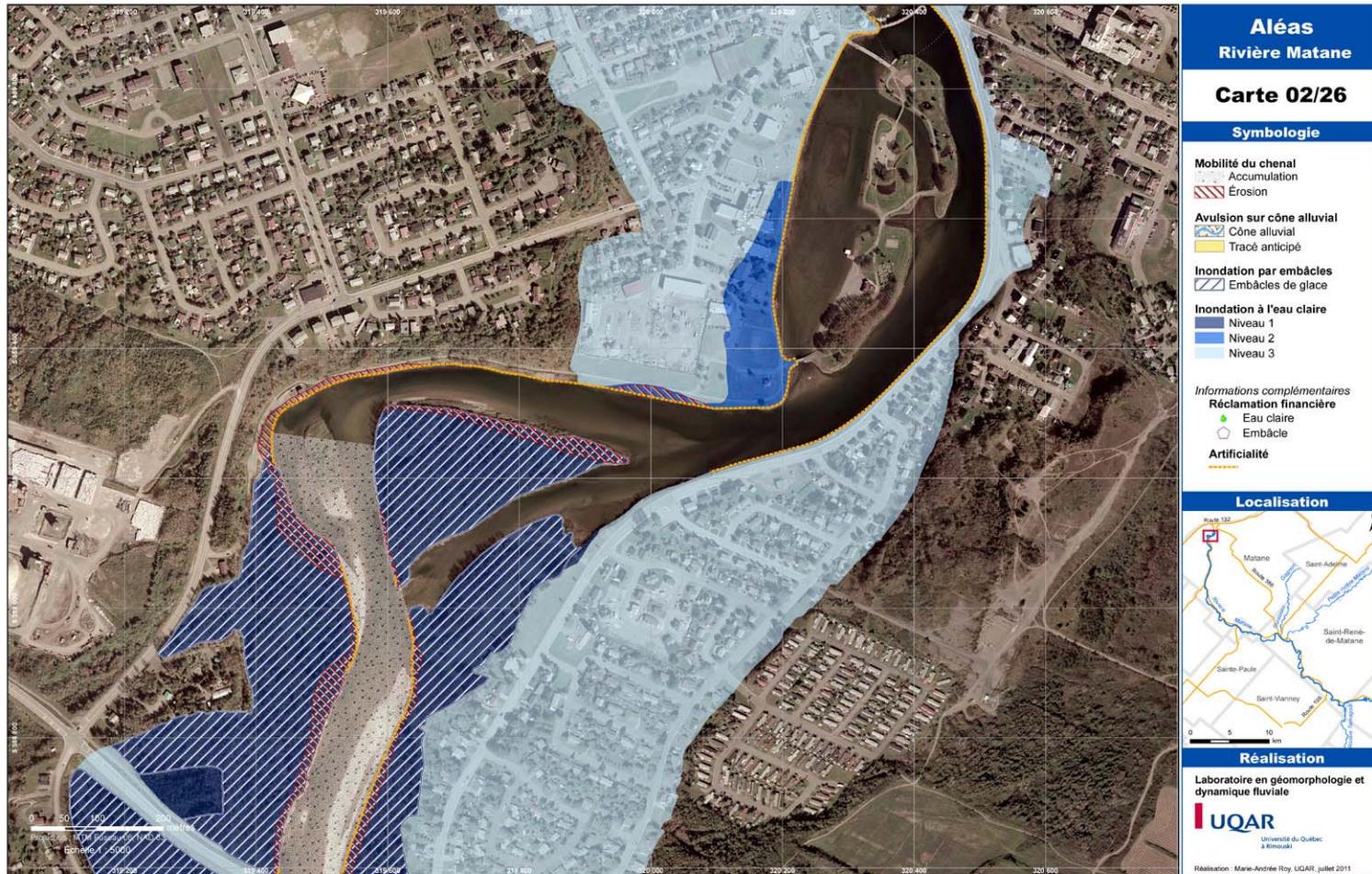
- Analyse des terrasses marquant des niveau d'inondation par photographies aériennes et Modèles Numériques d'Élévation (MNE) à haute résolution (LIDAR)
- Analyse de terrain (marques d'inondation sur la morphologie de la plaine inondable)



Rivière Matane: analyse LIDAR

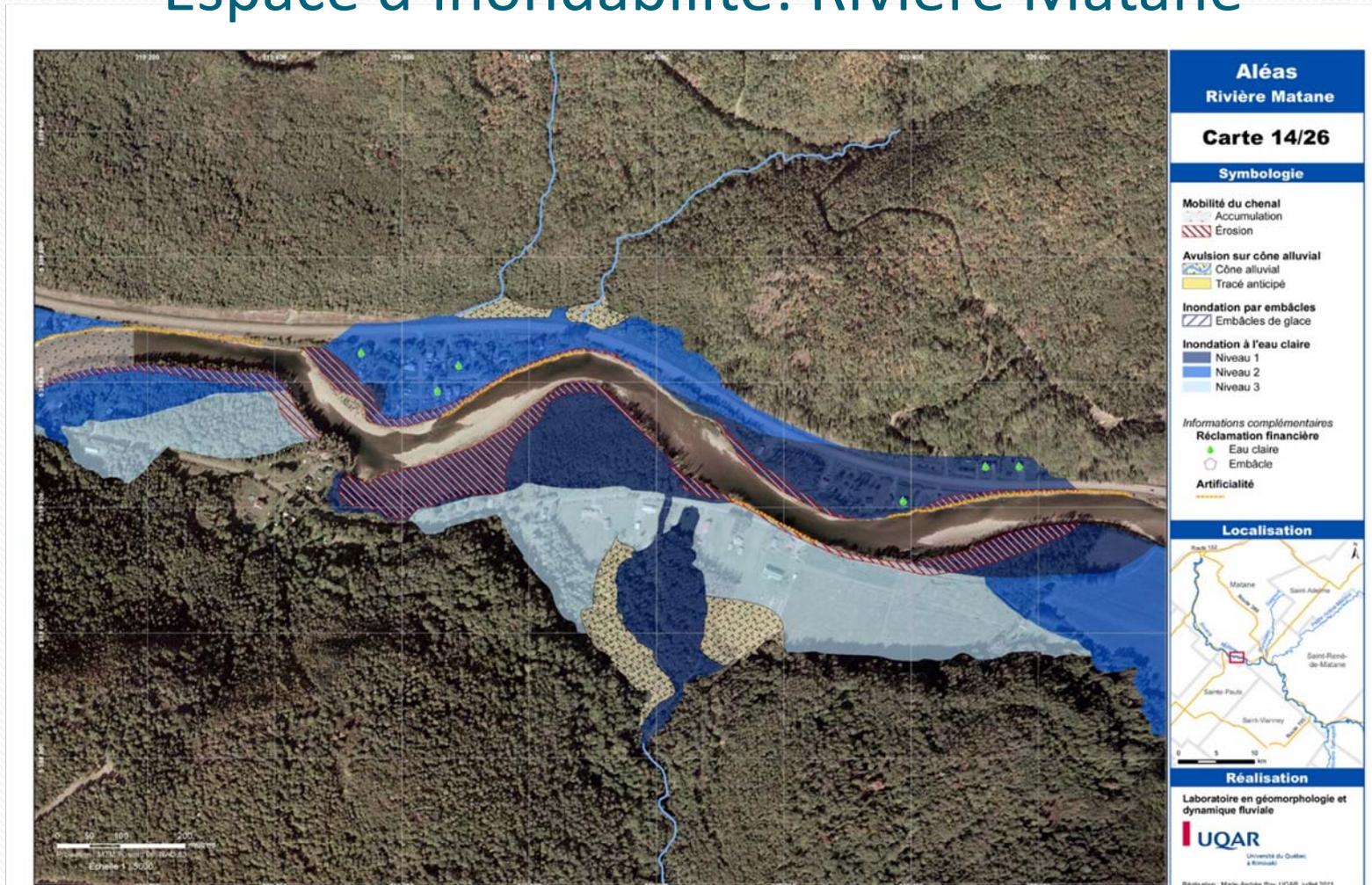
Source: Buffin-Bélanger (2011)
Données LIDAR: MSP

Espace d'inondabilité: Rivière Matane



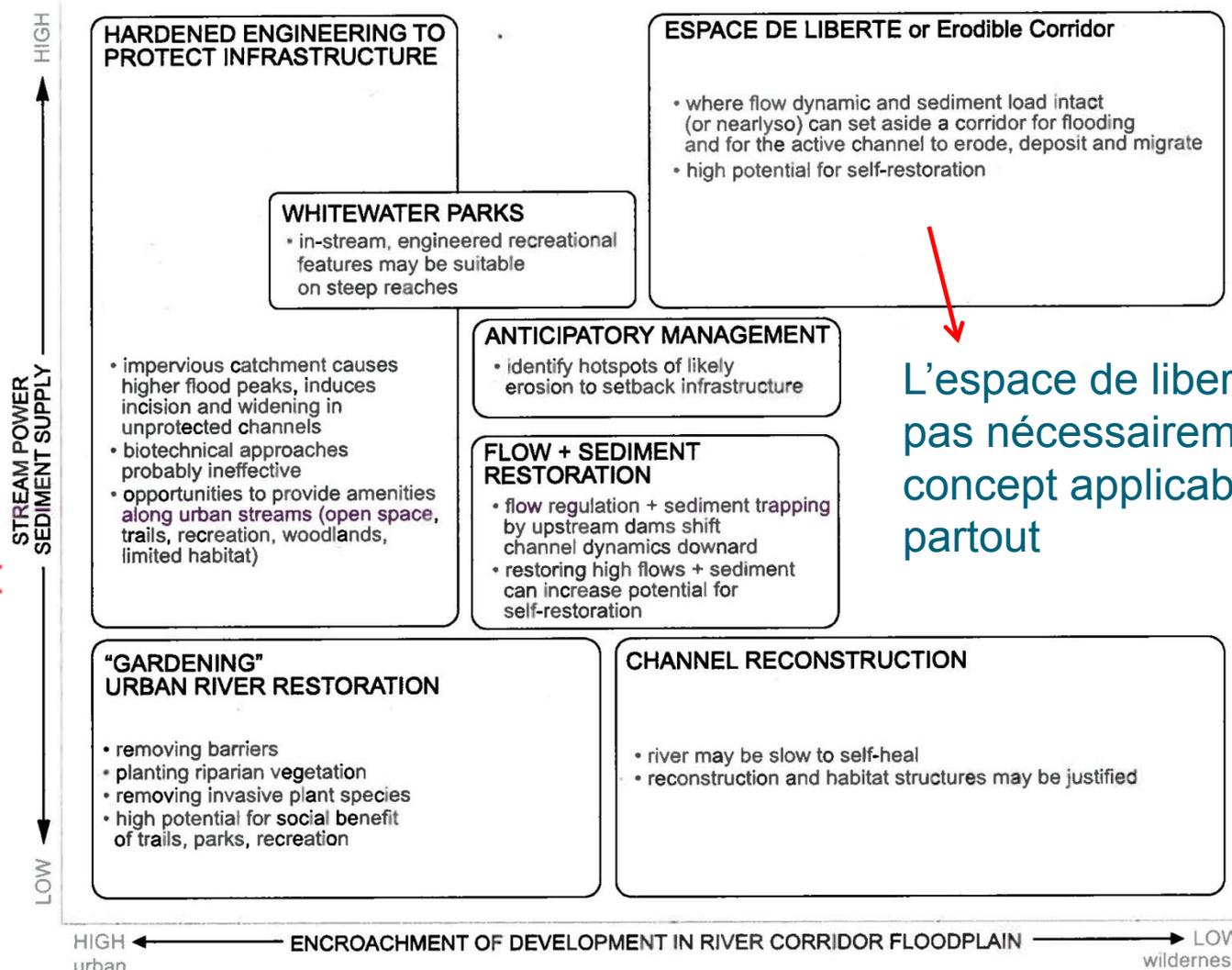
- N1: inondations très fréquentes et/ou de forts courants
- N2: inondations fréquentes de faibles courants
- N3: inondations peu fréquentes de faibles courants

Espace d'inondabilité: Rivière Matane



- N1: inondations très fréquentes et/ou de forts courants
- N2: inondations fréquentes de faibles courants
- N3: inondations peu fréquentes de faibles courants

Puissance
Apport de sédiments



Empiètement du développement

Source: Kondolf (2011)

Résumé section 3

- L'espace de liberté implique un changement profond dans notre conception des cours d'eau non plus comme des "chenaux évacuateurs d'eau", mais comme des systèmes dynamiques conçus pour s'accommoder d'apports liquides et solides variables, du moment qu'on leur laisse l'espace nécessaire pour le faire.
- Leçons du Vermont sur le concept d'espace de liberté:
"Le Vermont s'est retrouvé dans un cycle sans fin et sans cesse croissant de dépenses de plusieurs millions de dollars pour maintenir des rivières, pour réparer et reconstruire des routes et des ponts endommagés par des crues, et pour protéger les terres près des cours d'eau contre l'érosion et les inondations, seulement pour voir ces investissements dans la gestion des cours d'eau: a) échouer durant la prochaine crue ou b) résulter en des dégâts plus importants ailleurs" (Cahoon et Kline, 2006).

Conclusions

- Une approche hydro-géomorphologique permet d'identifier les causes des problèmes observés dans les cours d'eau, plutôt que de simplement traiter les symptômes.
- On a trop souvent fait fi dans les interventions passées de la dynamique naturelle des cours d'eau, notamment de la dynamique sédimentaire, ce qui explique plusieurs problèmes récurrents dans les bassins-versants. Les interventions répétées dans les cours d'eau sont souvent la cause (involontaire) des instabilités.
- Laisser plus d'espace aux cours d'eau engendre évidemment des coûts, mais les bénéfices à long termes sont presque assurément plus grands, surtout dans un contexte de changements climatiques.

Références

- Blum, M.D. et Tornquist, T.E. (2000) Fluvial response to climate and sea-level change: a review and look forward, *Sedimentology*, 47, 2-48.
- Bravard, J.-P. et Petit, F. (1997) *Les Cours d'Eau: Dynamique du Système Fluvial*. Armand Colin, 222 pp.
- Brookes, A. et Sear, D.A. (1996) Geomorphological principles for restoring channels. Dans: Brookes, A. et Shields, F.D. Jr. (Eds) *River Channel Restoration: Guiding Principles for Sustainable Projects*, John Wiley & Sons, 75-101
- Buffin-Bélanger, T. (2011) Cartographie des risques fluviaux dans la vallée de la rivière Matane par l'approche hydrogéomorphologique. Volume 1: Guide d'Interprétation. *Présenté au Ministère de la Sécurité Publique du Québec*, Juillet 2011.
- Cahoon, B. et Kline, M. (2006) Alternatives for River Corridor Management. Vermont DEC River Management Program, 13 p. <http://www.friendsofthemadriverriver.org/documents/ManagementAlternatives.pdf>
- Church (2006) Bed material transport and the morphology of alluvial river channels. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34: 325-354
- Fryirs, K., Brierley, G. J., Preston, N. J. et Kasai, M. (2007) Buffers, barriers and blankets: The (dis)connectivity of catchment-scale sediment cascades. *Catena*, 70, 49-67.
- Kanno, Y. et Vokoun, J.C. (2010) Evaluating effects of water withdrawals and impoundments on fish assemblage in southern New England streams, USA. *Fisheries Management and Ecology*, 17, 272-283.
- Knighton, D. (1998) *Fluvial Forms and Processes*. Arnold, New York
- Kondolf, G.M. (2011) Setting goals in river restoration: When and where can the river “heal itself”? Dans: *Stream Restoration in Dynamic Fluvial Systems: Scientific Approaches, Analyses, and Tools*, Simon, A., Bennett, S.J. et Castro, J.M. (Eds). Geophysical Monograph Series, Vol. 194, AGU, Washington, D.C., 29-43.
- Lane, E.W. (1955) The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. *American Society of Civil Engineering*, 81, 745, 1-17.
- Lemke, A.M., Kirkham, K.G., Lindenbaum, T.T., Herbert, M.E., Tear, T.H., Perry, W.L., Herkert, J.R. (2011) Evaluating Agricultural Best Management Practices in Tile-Drained Subwatersheds of the Mackinaw River, Illinois. *Journal of Environmental Quality*, 40, 4, 1215-1228.

Références (suite)

- Mackin, J.H. (1948) The concept of the graded stream. *Geological Society of America Bulletin*, 59, 463-511.
- Rousseau, Y. (2010) Assessment of management strategies for a lowland straightened agricultural stream. Mémoire de maîtrise, Université Concordia, 167 p.
- Sear, D.A. (1996) The sediment system and channel stability. Dans: Brookes, A. et Shields, F.D. Jr. (Eds) *River Channel Restoration: Guiding Principles for Sustainable Projects*, John Wiley & Sons, 149-177.
- SEPA (2010) Scottish Environment Protection Agency: Engineering in the water environment: good practice guide. *Sediment Management*, 55 pp.
- Simon, A. et Darby, S.E. (2002) Effectiveness of grade-control structures in reducing erosion along incised river channels: the case of Hotophia Creek, Mississippi, *Geomorphology* 42, 229-224.
- Smith, H.G. et Dragovich, D. (2008) Sediment budget analysis in slope-channel coupling and in-channel sediment storage in an upland catchment, Southeastern Australia. *Geomorphology*, 101, 643-654.
- Zinger, J.A., Rhoads, B.L., Best, J.L. (2011) Extreme sediment pulses generated by bend cutoffs along a large meandering river. *Nature Geoscience*, 4, 10, 675-678.