

# L'APPROCHE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE POUR LA CARTOGRAPHIE DES ZONES À RISQUE D'INONDATION DANS LES VALLÉES DE PETITES ET MOYENNES TAILLES : UN EXEMPLE COMMENTÉ POUR LA VALLÉE DE LA RIVIÈRE-AU-RENARD

Marie-Andrée Lelièvre

*Université du Québec à Rimouski, Rimouski, Québec, Canada, marie-andree.lelievre@uqar.qc.ca*

Thomas Buffin-Bélanger

*Université du Québec à Rimouski, Rimouski, Québec, Canada, thomas\_buffin-belanger@uqar.qc.ca*

François Morneau

*Service de l'atténuation des risques, Ministère de la sécurité publique, Québec, Québec, Canada.*

## RÉSUMÉ

Le 8 et 9 août 2007, une inondation majeure survenait dans la vallée de la Rivière-au-Renard, en Gaspésie, provoquant le décès de deux personnes et des dégâts matériels considérables. L'analyse de l'inondation révèle une réponse hydrologique extrêmement rapide mais d'une ampleur disproportionnée quant à la quantité de précipitation tombée. Cet article vise à souligner l'importance de bien comprendre la dynamique fluviale des cours d'eau de petites tailles pour l'évaluation des risques d'inondation. Nous présentons une méthode complémentaire à l'approche hydraulique classique pour la détermination des zones inondables et nous l'illustrons pour la vallée de la Rivière-au-Renard. La méthode de cartographie hydrogéomorphologique s'intéresse aux formes de la plaine alluviale révélant les crues passées mais susceptibles de se reproduire dans le futur. Elle consiste à délimiter trois unités morphologiques de la plaine alluviale : les lits mineur, moyen et majeur, représentent les enveloppes morphologiques contenant les crues fréquentes, rares et exceptionnelles, respectivement. De plus, l'analyse des caractéristiques hydrogéomorphologiques du bassin-versant met en lumière les facteurs multiples ayant pu contribuer à exacerber l'ampleur de l'inondation à Rivière-au-Renard. Une meilleure connaissance des processus propres à l'évolution de la plaine alluviale contribue à une meilleure évaluation des risques d'inondation sur un territoire.

## ABSTRACT

On August 9<sup>th</sup> 2007, a major flood event occurred in Rivière-au-Renard, Gaspe peninsula. As a result, two people died and tens of millions of dollars in infrastructure damage were reported. The flood wave was extremely rapid but the amplitude of the response to the precipitation seemed disproportioned. This paper aims at underlying the importance of a better understanding of the fluvial dynamics of small streams for the determination of flood risk zones. We present a complementary method to the classic hydraulic approach to evaluate the flood risk zones and we illustrate it for the Rivière-au-Renard region. The hydrogeomorphological method is based on the principle that the outer limits of a stream's flood plain represent the outer envelope of past floods. Inside the boundary of the modern flood plain, the intrinsic limits of frequent, rare and exceptional flood envelopes are determined by the use of aerial photographs and field surveys. Furthermore, the hydrogeomorphological method sheds light on the factors that might have exacerbated the hydrological response in the Rivière-au-Renard valley. A better understanding of the fluvial processes on a flood plain leads to a better determination of flood risk.

## 1. INTRODUCTION

De nombreuses inondations ont marqué l'été et l'automne 2007 en Gaspésie. Trois événements de précipitations de plus de 100 mm sont survenus dans les secteurs de Gaspé, Percé et Matane aux mois d'août, octobre et novembre, respectivement. Ces précipitations ont donné naissance à des réponses hydrologiques dont les conséquences sur les habitants et les infrastructures resteront marquées pendant plusieurs années. À Rivière-au-Renard, près de Gaspé, une succession d'événements aggravants (nombreux embâcles de débris, fort alluvionnement du lit, destruction des rives, bris de barrages de castors, etc.) a généré une inondation de grande ampleur dans la vallée provoquant deux décès, des destructions de ponts et des dégâts majeurs à des dizaines de propriétés. Dans la région de Percé, des ponceaux sous dimensionnés combinés à une aggradation du lit des cours d'eau ont

provoqué des débordements et du ruissellement par canalisation routière endommageant des dizaines de maisons. À Matane et Sainte-Anne-des-Monts, les débits élevés ont provoqué de l'érosion fluviale modifiant le tracé des cours d'eau exacerbant alors les risques d'érosion des terrains de propriétaires riverains. Cette série d'événements souligne que les aléas des systèmes fluviaux sont plus que jamais présents dans l'Est du Québec mais surtout que les aléas liés aux systèmes fluviaux sont sources de risques majeurs pour les communautés. La prévention de ces événements passe par une évaluation cartographique des zones à risque guidant la gestion et l'aménagement du territoire.

Au Québec, le paradigme de l'hydrologie statistique domine les processus de cartographie menant à l'identification des zones à risque d'inondation. Le Programme de cartographie, en vigueur de 1976 à 2001, puis le

Programme de détermination des cotes de crues de récurrence de 20 ans et de 100 ans (PDCC), en vigueur de 1998 à 2004, ont permis de documenter et cartographier les zones inondables de plus de 600 secteurs de lacs et de rivières au Québec (Centre expertise hydrique, 2008). Selon ces programmes, la cartographie des zones inondables se base sur deux sources principales de données : la topographie du secteur et les probabilités de récurrence des débits. Dans le cadre du PDCC, les relevés topographiques sont réalisés depuis quelques années à l'aide de la technologie du laser aéroporté ce qui permet d'obtenir des résolutions de l'ordre d'un point par 3 mètres carrés. La magnitude des débits de récurrence 20 et 100 ans est obtenue par l'analyse fréquentielle de séries de débits pour la rivière ou la région. Ces magnitudes sont utilisées dans des modèles hydrodynamiques pour évaluer les niveaux d'eau atteints dans une vallée selon une série de sections transversales. Les hauteurs d'eau obtenues (cotes de crues) sont jointes sur une carte et déterminent les zones d'inondation de récurrence correspondante.

Cette approche pour la détermination des cotes de crues permet une évaluation systématique des zones à risque d'inondation associées à des excès de débits liquides. Elle possède le défaut, cependant, d'intégrer difficilement la récurrence des inondations provoquées par embâcles-refoulement et ne permet pas d'anticiper la réponse morphologique d'un système fluvial à la présence d'une quantité d'eau importante transitant dans le système. Ces deux contraintes sont particulièrement critiques pour les bassins versants de petites et moyennes tailles (< 1000 km<sup>2</sup>) où les processus géomorphologiques peuvent tempérer ou exacerber la réponse du système fluvial à des précipitations de fortes intensités.

Une approche complémentaire existe à l'évaluation des zones à risque provenant des aléas provoqués par les écoulements de surface, dont font partie les inondations. L'approche hydrogéomorphologique se base sur la reconnaissance des unités géomorphologiques non contestables, façonnées par les écoulements de surface et qui révèlent les limites spatiales ainsi que les mécanismes régulateurs des inondations potentielles (Garry *et al.* 2002; Ballais *et al.* 2005). Cette approche a été largement développée en France dans le cadre des Plans de prévention des risques d'inondation (Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, 1999) et elle trouve une équivalence dans la typologie des types de crues mise de l'avant aux États-Unis (CGER, 1996) et le développement d'un cadre d'analyse pour les rivières australiennes (Brierley et Fryirs, 2005)

L'article jette les bases de la mise en œuvre de l'approche hydrogéomorphologique de la gestion des aléas et des risques liés aux écoulements de surface dans les bassins-versants de petites et moyennes tailles du Québec. L'article décrit dans un premier temps la méthodologie hydrogéomorphologique menant à la réalisation des cartes d'aléas, d'enjeux et de risques naturels liés aux écoulements des eaux de surface dans un système fluvial. Cette méthodologie est ensuite appliquée à la vallée de la Rivière-au-Renard et les cartes produites sont commentées.

## 2. L'APPROCHE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE

### 2.1 Les fondements

La méthode de cartographie hydrogéomorphologique se base sur les unités morphologiques propres à l'évolution d'une plaine alluviale. Les cours d'eau laissent en place des formes et dépôts qui révèlent les dynamiques fluviales (Knighton, 1996; Bravard et Petit, 1997; Robert, 2003). Ces formes et dépôts peuvent appartenir à la plaine alluviale (morphologies fluviales) ou au tracé fluvial (styles fluviaux). Par exemple, les cônes alluviaux appartiennent à la morphologie fluviale et peuvent révéler l'existence d'un régime sédimentaire provoquant l'accumulation de sédiments dans le lit de la rivière. Les rivières à tresse constituent un style fluvial soulignant la surcharge sédimentaire grossière dans un cours d'eau provoquant l'apparition de bancs d'accumulation multiple.

Dans le contexte des inondations, la cartographie hydrogéomorphologique s'intéresse aux événements de crues passés susceptibles de se reproduire dans le futur. La mise en place d'une plaine alluviale résulte du passage à répétition de crues de différents amplitudes contribuant à la formation de la plaine de deux façons : par la migration latérale du cours d'eau et par l'accrétion verticale provoquée par les inondations. La migration latérale laisse en place des dépôts de sédiments relativement grossiers, dont la structure reflète le tri et la morphologie propres au chenal, mais elle façonne aussi la plaine en laissant des terrasses fluviales. Les inondations laissent en place des dépôts de débordements composés de sédiments relativement fins. La combinaison des dépôts et des formes associées constitue des unités morphologiques observables. Ces unités ont été façonnées par l'eau qui s'est écoulé dans le passé et marquent les limites d'une crue prochaine (Ballais *et al.* 2005). Plus spécifiquement, la cartographie hydrogéomorphologique consiste à délimiter trois unités morphologiques de la plaine alluviale : les lits mineur, moyen et majeur. À chacune des unités morphologiques peut être associée une fréquence de l'aléa. Ces unités représentent les enveloppes morphologiques contenant les crues fréquentes, rares et exceptionnelles, respectivement.

La méthode est basée sur l'interprétation stéréoscopique de photographies aériennes et sur des observations de terrain. Les modèles numériques d'élévation sont aussi fortement utiles pour l'interprétation des unités morphologiques, particulièrement lorsque ces derniers sont à haute résolution spatiale. En complément, il importe de prendre en compte l'historique des crues, la sédimentologie de la zone d'étude et l'occupation du sol. Cette approche est valide pour les inondations lentes des plaines alluviales, mais aussi pour les inondations rapides (de torrents et de cônes alluvial). Dans ces derniers, les limites des lits mineur, moyen et majeur sont plus difficiles à identifier, l'approche hydrogéomorphologique se base alors sur la morphologie du cône et sur les indicateurs de mobilité du chenal présents sur le cône (chenaux secondaires, signes d'aggradation, bourrelets de débordement).

En France, cette méthode dite « naturaliste » a d'abord été accueilli avec méfiance par les hydrauliciens et les aménagistes car on lui reprochait d'être insuffisamment basée sur les sciences dites exactes (Garry *et al.* 2002). On favorisait alors des approches combinant les probabilités hydrologiques traditionnelles et les modèles hydrodynamiques. Cette combinaison d'approches peut s'avérer conservatrice dans l'évaluation de l'ampleur de l'aléa. Les nombreux diagnostics postérieurs aux inondations, et malheureusement au hasard des catastrophes, remettent en question l'efficacité de l'hydrologie statistique et de la modélisation hydrodynamique en France comme au Québec. C'est à la lumière des diagnostics postérieurs aux inondations que l'efficacité et la pertinence de la cartographie hydrogéomorphologique ont pu être montrées (Garry *et al.* 2002; Chave, 2002; Ballais *et al.* 2005). En France, l'approche hydrogéomorphologique est devenue une méthode indispensable à l'élaboration des plans de préventions des risques d'inondation (PPRI).

L'approche hydrogéomorphologique présente l'intérêt d'être assez simple à mettre en œuvre, induisant une caractérisation plus rapide de la zone d'étude et un faible coût par rapport aux modèles hydrauliques. Ces derniers sont basés sur des calculs mathématiques lourds qui demandent beaucoup de temps d'opération et nécessitent des données de terrain les plus précises possibles. De plus, les modèles hydrauliques présentent souvent plusieurs incongruités en raison du manque de représentativité de la crue centennale, lorsque les échantillons utilisés sont de trop petites tailles (série de précipitations, de débits, etc.) et intègrent mal les paramètres ponctuels qui influencent la dynamique de l'écoulement (Ballais *et al.* 2005). Ces modèles sont conçus pour des écoulements libres et considèrent comme absent les couverts de glaces et autres contraintes physiques (pont, embâcles) pouvant modifier de manière importante l'écoulement.

L'approche hydrogéomorphologique présente des limites. Par exemple, elle ne permet de mettre en évidence que trois unités fonctionnelles pour déterminer les fréquences d'aléa. L'approche hydraulique, quant à elle, peut différencier tout un éventail de fréquences de crues par des périodes de retour de 2, 5, 10, 20, 30 50 et 100 ans, voire 250 ans (Ballais *et al.* 2005). On peut y voir un avantage certain à détenir une interprétation plus fine des récurrences mais cela induit à la fois un faux sentiment de précision étant donné les marges d'erreurs associées aux résultats. Aussi, la délimitation des lits majeurs, moyens et mineurs n'est pas toujours évidente particulièrement lorsque le territoire est fortement aménagé et que les formes fluviales ont été altérées. Dans ce sens, les approches hydrogéomorphologique et hydrologique ne doivent pas être perçues en terme de concurrence mais en terme de complémentarité, surtout lorsque qu'un premier travail de modélisation a été engagé dans un secteur. Dans cette optique, la multidisciplinarité favorise une meilleure évaluation des risques d'inondation sur un territoire.

## 2.2 Cartographie hydrogéomorphologique

La cartographie hydrogéomorphologique est une fin en soi et constitue une étape dans la réalisation d'une étude pour la gestion des risques d'inondation (Garry *et al.* 2002). On peut diviser en quatre étapes une étude menant à la gestion du risque d'inondation qui intègre la cartographie hydrogéomorphologique.

La première étape consiste à analyser la morphologie de la plaine alluviale et les limites des crues historiques. La cartographie hydrogéomorphologique est au centre de cette étape qui se traduit par la présentation d'une carte d'inondabilité (Garry *et al.* 2002). Cette carte représente l'aléa inondation et identifie les zones où l'aléa est fort, modéré ou faible. Pour évaluer l'intensité de l'aléa, les crues du passé, qui ont laissé des traces morphologiques et sédimentologiques, doivent être considérées avec attention. Les premiers repères à identifier sont les talus qui délimitent les différentes unités morphologiques et les éléments matérialisant l'hydrodynamisme général (coupure de méandre, zone de débordement, chenaux de crue, etc). L'analyse stéréoscopique de photographies aériennes et les validations terrain permettent de tracer la limite des lits mineur, moyen et majeur. Les lits se démarquent par des talus d'érosion en pente forte. La limite externe du lit majeur est souvent constituée par une rupture de pente liée à l'érosion. Ce talus, bien distinct, est parfois dissimulé sous des matériaux liés à l'évolution de l'encaissant (apports colluviaux). Combinée à l'analyse des formes, l'évaluation des tailles granulométriques des dépôts superficiels permet de mieux évaluer la dynamique des zones de débordement. Les dépôts sur le lit majeur, recouvrant les alluvions grossières, comportent généralement du matériel plus fin, caractéristique des zones à faibles écoulements. Finalement, les annexes fluviales (bras morts) correspondent souvent aux premières zones de débordement des crues et peuvent traverser le lit moyen et majeur. Les dépressions sont des zones où l'on peut s'attendre à des hauteurs d'eau élevées. Lorsque complétée, la carte d'inondabilité comporte donc les limites des unités hydrogéomorphologiques, la ligne de la crue historique et les éléments morphologiques à incidences hydrauliques (anciens méandres, dépressions, chenaux de crue, bras mort, cône alluvial). Il importe de mentionner que la cartographie d'inondabilité peut être renforcée par l'analyse statistique des crues historiques, i.e. c'est à cette étape que l'hydrologie statistique complète la cartographie hydrogéomorphologique.

Il importe aussi de souligner que lors du passage d'une crue, deux types d'aléas peuvent être distingués: l'aléa inondation et l'aléa migration latérale. Un fort aléa d'inondation fait référence à des zones propices à recevoir des hauts niveaux d'eau et des vitesses d'écoulement élevées lors de crues débordantes. Un fort aléa de migration latérale fait référence à des secteurs à forte mobilité, où il y a érosion significative des berges. Les secteurs à forte mobilité sont généralement des secteurs à forte pente (plus de 2%) et où les matériaux constituant les berges sont peu cohésifs. Certains secteurs, comme les cônes alluviaux, présentent à la fois un aléa inondation fort

et un aléa migration latérale fort. Dans une cartographie hydrogéomorphologique, la représentation des deux types d'aléa renforce l'analyse des risques liés aux inondations.

La deuxième étape consiste à localiser les aménagements qui peuvent modifier le fonctionnement hydraulique du chenal d'écoulement et de la plaine d'inondation. Les activités anthropiques modifient de manière considérable la nature et l'intensité des réponses des systèmes fluviaux (Thorne *et al.* 1998; Gregory, 2006). Les digues latérales, les remblais de fondation, les remblais routiers et les culées et amenées de ponts diminuent les surfaces de débordement ce qui peut provoquer des surélévations du niveau d'eau. Les protections de berges (enrochements et murets), les barrages, les ponts et les ponceaux sous-dimensionnés, les zones d'extractions et de décantation de sédiments peuvent modifier la nature de l'écoulement dans le chenal et par conséquent provoquer du refoulement et des débordements. Il est également important de relever toute intervention majeure dans le tracé du cours d'eau. La linéarisation et le recoupement de méandres, par exemple, engendrent une réponse hydraulique qui peut jouer un rôle significatif dans l'interprétation des crues passées et futures. Dans l'approche hydrogéomorphologique, l'évaluation des effets de ces modifications reste qualitative, mais elle permet de prévoir la réaction du système suite à des événements de crue. Cette deuxième étape mène à une cartographie des facteurs aggravants pour bonifier la carte d'inondabilité en intégrant les effets des aménagements.

La troisième étape consiste à identifier les vulnérabilités soumises aux inondations, étape primordiale dans la démarche menant à l'évaluation des risques d'inondations. Parmi les vulnérabilités à identifier, la plus importante correspond aux espaces urbanisés. Dans certains cas, l'espace urbanisé doit être déterminé en fonction de la réalité physique et non en fonction d'un zonage réglementaire. Autrement dit, il doit représenter la zone urbanisée et non urbanisable. Cet espace inclut toutes les zones résidentielles, industrielles, commerciales et de services. L'identification des autres espaces de vulnérabilité dépendra de l'utilisation du territoire. On peut penser à identifier les espaces à zones humides, les espaces boisés et les espaces agricoles. Ces trois espaces de vulnérabilité représentent des enjeux menant à une détermination d'un risque plus faible au niveau de la sécurité des personnes. L'analyse des vulnérabilités peut se faire à une échelle plus fine en identifiant spécifiquement les infrastructures dans les milieux urbanisés. Par exemple, un secteur urbanisé comportant un hôpital ou un poste de pompier aura un niveau d'importance plus élevé qu'un autre secteur n'en possédant pas. Cette étape mène à une cartographie des vulnérabilités.

La quatrième et dernière étape consiste en l'analyse du risque d'inondation. Le risque est le résultat du croisement des cartes d'aléas et de vulnérabilité et de leur pondération respective. Puisque c'est sur la zonation du risque que les règlements de zonages seront basés, la méthode de croisement entre les deux cartes est particulièrement cruciale. Elle demeure cependant fortement dépendante de la qualité avec laquelle la cartographie des aléas a été

réalisée. La pondération des aléas et des enjeux présents dans la définition du risque demeure complexe et nécessite une réflexion qui n'est que partiellement abordée dans cet article. Entre autres éléments de réflexion, l'évaluation de l'intensité du risque au regard des vulnérabilités et des enjeux des environnements considérés est primordiale (Gilard et Gendreau, 1998).

### 3. EXEMPLE COMMENTÉ DE LA RIVIÈRE AU RENARD

#### 3.1 Les événements

Les inondations du mois d'août 2007 à Rivière-au-Renard ont marqué les habitants de la ville de Gaspé pour de nombreuses années (figure 1). L'inondation a pris une tournure dramatique alors que deux personnes sont décédées lorsque leur maison a été emportée par la crue. Des dégâts matériels considérables ont été causés par le débordement de la rivière. Les infrastructures routières ont été durement touchées et des dizaines de bâtiments résidentiels et commerciaux ont subi des dommages majeurs. Les gestionnaires et la population ont souhaité comprendre ce qui a provoqué une crue dévastatrice de si grande ampleur pour prendre les actions nécessaires à une meilleure gestion à long terme du territoire et pour protéger les résidents d'une nouvelle catastrophe. Un comité d'experts a été mandaté par la sécurité civile du Québec et nous énumérons ici les grandes conclusions présentées par ce comité lors des consultations publiques pour expliquer et décrire le sinistre.



Figure 1. Carte de localisation de la vallée de la Rivière-au-Renard.

Dans la nuit du 8 au 9 août 2007, près de 115 mm de pluie sont tombées sur le bassin-versant de la Rivière-au-Renard en moins de 24 heures, dont plus de 36 mm en moins de 2 heures. Ces précipitations combinées à un bassin-versant en grande partie en région montagneuse ont donné naissance à une réponse hydrologique très rapide. Bien que la réponse aie été très rapide, il était difficile de relier la récurrence de ces précipitations à l'ampleur des dégâts occasionnés. Dans les jours qui ont suivi, une analyse du territoire a permis d'identifier des facteurs ayant pu exacerber l'ampleur de la crue. D'abord, dans la portion

amont du système, des barrages de castors ont retenu des quantités importantes d'eau pendant quelques heures. Ces derniers ont cédé lorsque que la pression accumulée est devenue trop grande, créant ainsi une onde de crue dévastatrice, emportant sur son passage de grandes quantités de sédiments et débris ligneux. Ensuite, lorsque l'onde de crue a dévalé la portion urbanisée, la force de l'écoulement était telle que des maisons et des débris résidentiels se sont fait emporter et ont provoqué des embâcles dans les portions étroites de la rivière et sur les ponts. Les ponts ont ainsi contribué à contraindre l'écoulement et le cumul des obstructions ont mené à des débordements rapides. Plusieurs témoignages rapportent une augmentation très rapide du niveau d'eau dans la nuit. Finalement, à l'embouchure, la marée haute a nui à l'évacuation de la crue vers la mer et a engendré une immense zone de refoulement.

La prévision de tels événements sur un territoire est toujours délicate. L'approche combinant l'hydrologie statistique et l'hydraulique fluviale des sections transversales peine à prédire une extension de crue de cette ampleur compte tenu de sa difficulté à intégrer les facteurs aggravants pouvant modifier la dynamique du cours d'eau (Ballais *et al.*, 2005). Il a été montré, par des sinistres passés, que la modélisation hydraulique sous estime dans la plupart des cas la zone à risque d'inondation et failli dans son rôle de prédiction de crues rares ou exceptionnelles. Ils présentent souvent plusieurs incongruités en raison du manque de représentativité de la crue centennale, lorsque les échantillons utilisés sont de trop petites tailles (série de précipitations, de débits, etc.), ce qui est souvent le cas pour les petits bassins-versants. Dans le cas de la Rivière-au-Renard, cela se traduirait par une délimitation très conservatrice des limites d'inondation tracées par les cotes de crues.

### 3.2 La cartographie hydrogéomorphologique

Avant de présenter la cartographie hydrogéomorphologique de segments de la vallée de la Rivière-au-Renard, nous décrivons sommairement l'histoire des aménagements le long du tronçon fluvial ainsi que la succession des styles fluviaux de l'amont vers l'aval. D'abord, la Rivière-au-Renard a subi de nombreux aménagements au cours des 60 dernières années. Des travaux de linéarisation pour favoriser le drainage ont été réalisés au milieu du siècle

dernier et plus récemment des travaux de linéarisation et d'enrochement ont eu lieu pour protéger et pour faciliter la gestion des infrastructures routières. Ces travaux ont modifié de manière significative la sinuosité du tracé de la Rivière-au-Renard (figure 2). La diminution de la longueur du tracé provoque une augmentation de la pente du lit et, par conséquent, une augmentation de la vitesse avec laquelle l'eau peut être évacuée de la plaine d'inondation.

En ce qui à trait aux styles fluviaux, le corridor fluvial de la vallée de la Rivière-au-Renard peut être divisé en trois sections distinctes (figure 3a). Dans la portion amont, un style divagant domine. Les rivières divagantes sont des rivières dont le style fluvial hésite entre les rivières à méandres et les rivières à tresse (figure 3b) (Desloges et Church, 1989). Ces sont des rivières sinueuses caractérisées par un transport en charge de fond significatif. Ce transport donne naissance à des bancs alternes-internes et des bancs de convexité qui sont facilement disséqués pendant les crues importantes. Il en résulte à l'occasion l'apparition de chenaux multiples. Ce style fluvial apparaît généralement lorsque les berges sont peu cohésives et permettent l'élargissement de la section transversale lors de crues. Dans cette section de la Rivière-au-Renard, les berges sont composées d'alluvions grossières appartenant aux anciens lits de la rivière qui s'est déplacé dans la vallée. Dans la portion aval, un style linéaire avec sinuosité de faible amplitude et de grande longueur d'onde domine. Dans cette section, les berges sont beaucoup plus cohésives. Elles sont composées de sédiments fins (limons et argiles) et elles sont fortement végétalisées. La rivière y est plus étroite et plus profonde que dans la section amont (figure 3c). Entre ces deux segments se trouve une section en transition comportant des bancs d'accumulation provenant de la migration lente des sédiments émergeant de la zone divagante. À l'aval, un segment estuarien est identifié correspondant à une zone d'alluvionnement qui favorise la formation d'un marais intertidal protégé anciennement des assauts de la mer par une flèche littorale.

La figure 4 présente la cartographie hydrogéomorphologique d'un segment de la Rivière-au-Renard. L'analyse des photographies aériennes et les reconnaissances sur le terrain permettent d'identifier l'extension des lits mineur, moyen et majeur. Ce segment se situe dans la portion rectiligne avec méandres de grandes longueurs d'onde. L'extension latérale du lit mineur y est

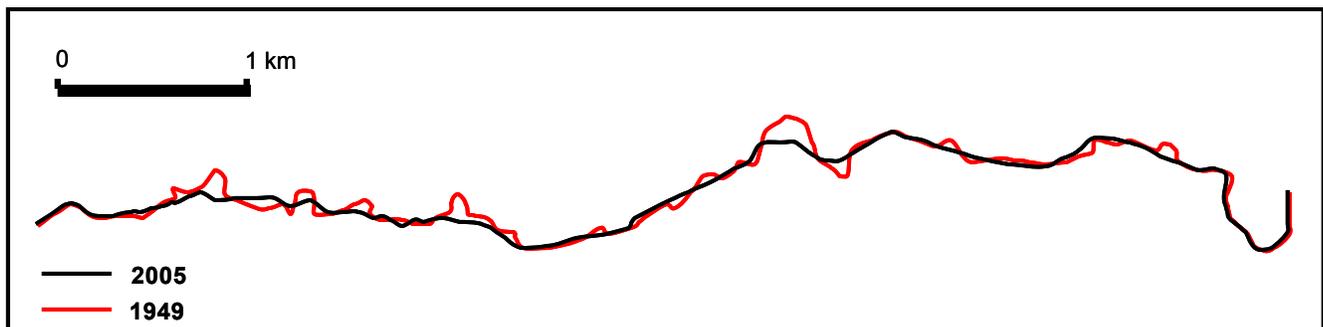


Figure 2. Comparaison des tracés de la rivière au Renard en 1949 et en 2005.

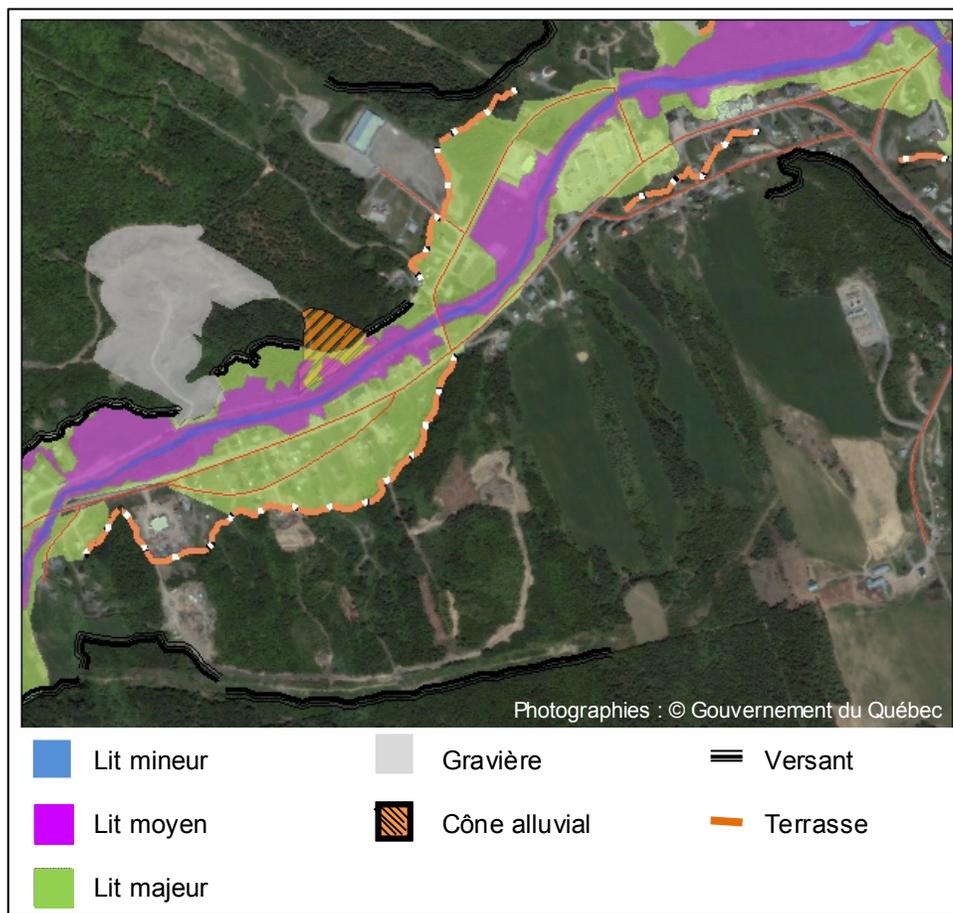
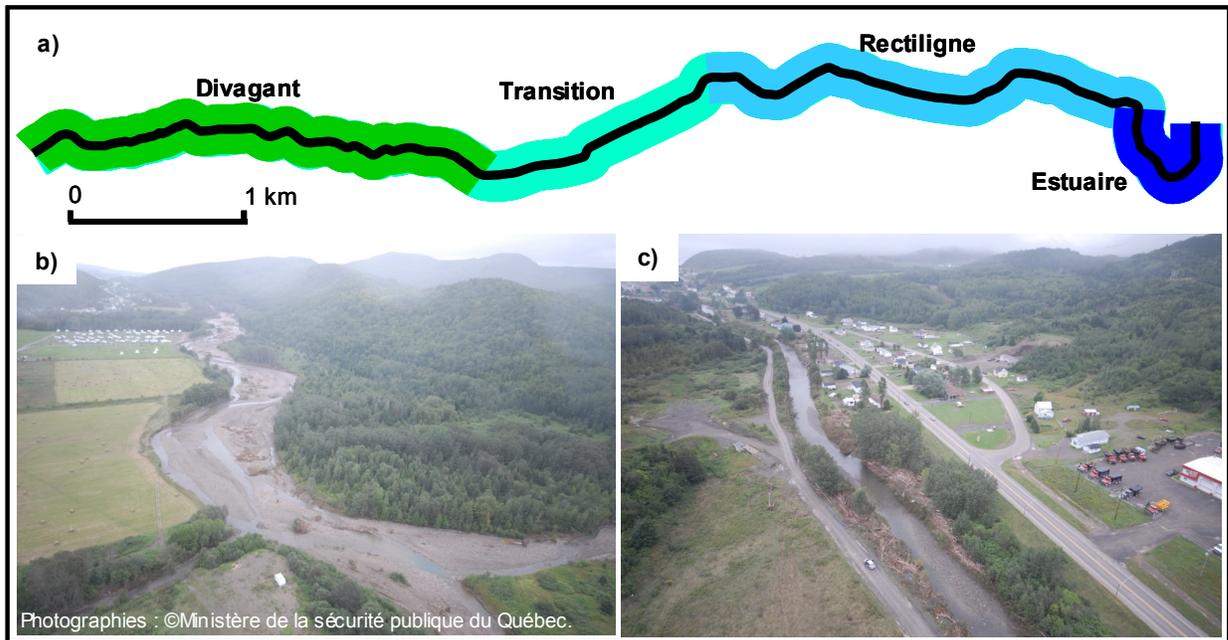


Figure 4. Cartographie hydrogéomorphologique pour un secteur de la vallée de la rivière au Renard.

fortement limitée. La délimitation du lit moyen est plus délicate. L'aménagement significatif de ce secteur a modifié les formes naturelles. Par conséquent, en plusieurs endroits, l'extension spatiale du lit moyen se borne aux remblais de fondation et aux remblais routiers, ce qui explique ses frontières plutôt rugueuses. Pour ce qui est l'extension du lit majeur, sa limite se retrouve soit sur le pied de talus de terrasses bien définies, soit aux pieds des versants qui bornent la vallée.

La figure 5 combine la cartographie hydrogéomorphologique à la cartographie de l'utilisation du sol pour produire une cartographie du risque d'inondation. Les classes d'utilisation du sol sont ici obtenues par une photointerprétation et non pas par le schéma d'aménagement. Nous avons identifié quatre classes pour simplifier l'analyse de la vulnérabilité soit les zones boisées, les zones agroforestières, les zones humides et les zones urbanisées. L'évaluation des

différentes vulnérabilités mène à une analyse du risque acceptable qui tient compte de l'espace à protéger, en fonction de son utilisation. Une analyse plus fine considérant les utilités propres aux différents édifices est possible. Les triangles identifient les zones où les risques d'inondation sont significatifs. Les zones avec les risques les plus élevés se trouvent dans l'enveloppe du lit moyen et le lit majeur. Le lit moyen comporte peu de résidences et est occupé principalement par des parcs et des bâtiments récréatifs. Le lit majeur, cependant, comporte une quantité significative de résidences et de voies de circulation.

L'approche hydrogéomorphologique implique une analyse rigoureuse du terrain et une connaissance de la dynamique fluviale à long terme. L'analyse de photoariennes et des reconnaissances sur le terrain de la vallée de la Rivière-au-Renard renseignent rapidement sur les dynamiques fluviales qui caractérisent cette vallée ainsi que sur les

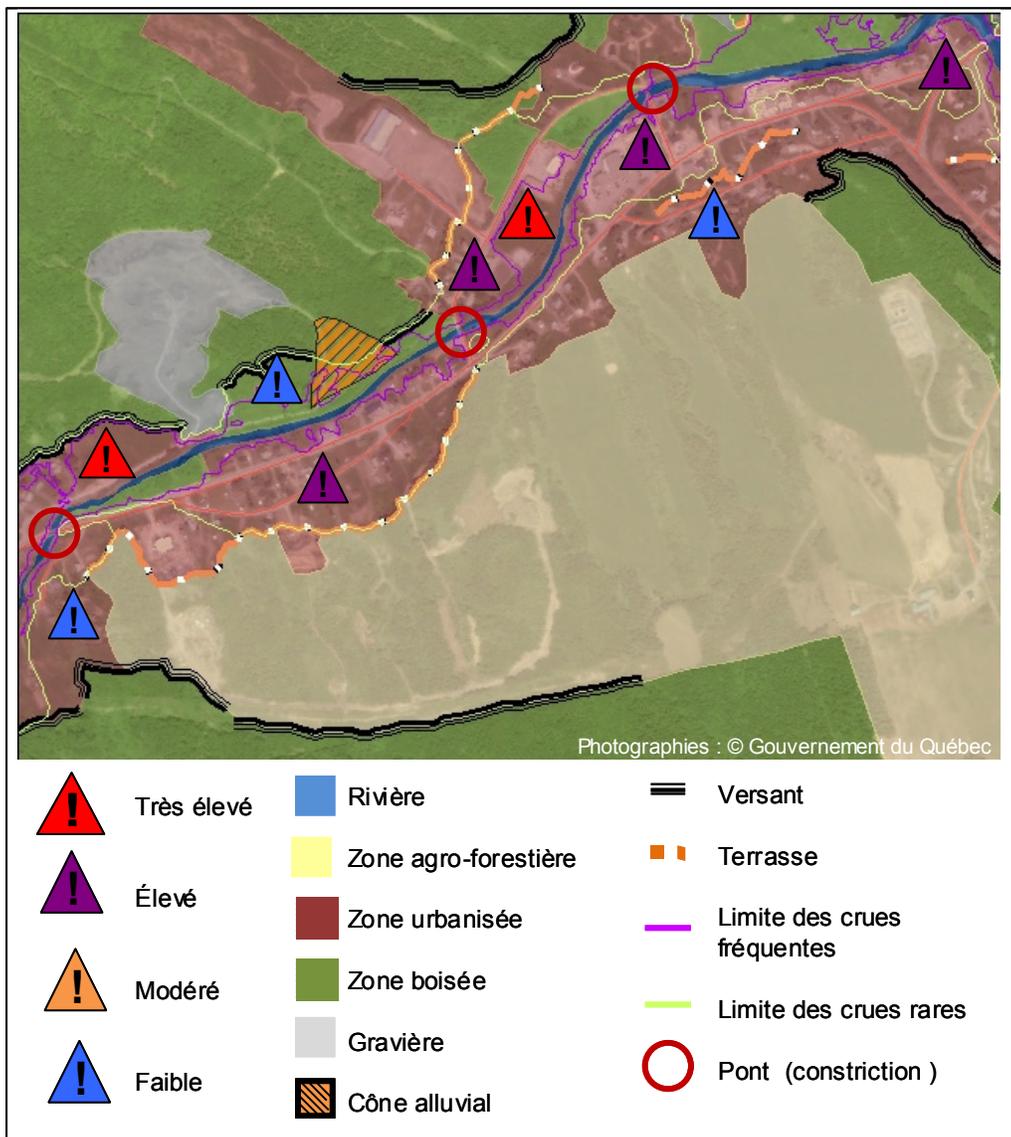


Figure 5. Cartographie des zones à risque d'inondation dans un secteur de la vallée de la rivière au Renard.

formes et les dépôts révélateurs des crues passées. L'approche hydrogéomorphologique appliquée à la vallée de la Rivière-au-Renard permet de délimiter des zones d'inondabilité où les risques sont élevés. En comparant ces zones à la délimitation de l'inondation du mois d'août, on constate qu'elles corroborent bien la zone inondée. Cette approche souligne également la présence de zones problématiques, génératrices de débris et/ou d'obstruction à l'écoulement, où des actions préventives pourraient être mises de l'avant.

L'application de l'approche hydrogéomorphologique dans la vallée de la Rivière-au-Renard comporte cependant quelques difficultés susceptibles de se reproduire dans d'autres vallées de la Gaspésie et du Bas-St-Laurent. D'abord, les marques sur le terrain nous renseignent sur les possibles délimitations de zones inondées dans le passé, mais la réponse du cours d'eau peut varier pour deux événements d'ampleur similaire. La rupture de barrages de castors dans le cas de la Rivière-au-Renard en est un exemple concret : on ne peut assumer que les barrages céderont à nouveau si un événement similaire se produit. Ensuite, l'identification des terrasses peut être difficile en milieu urbanisé étant donné les modifications du terrain (i.e. remblais). Il devient par exemple délicat d'identifier le lit moyen. Aussi, et cela est particulièrement important pour les vallées de la Gaspésie, il faut savoir distinguer les terrasses provenant d'un héritage glaciaire, mise en place lorsque le niveau de base était plus élevé, de celles associées à la dynamique contemporaine de la rivière. Les terrasses héritées ne représentent pas un indicateur d'une crue moderne. Finalement, l'analyse hydrogéomorphologique permet assez simplement de délimiter l'enveloppe maximale des crues mais définir le risque acceptable à l'intérieur de cette zone est plus ardu. L'approche hydrostatistique permet de rapidement tracer une ligne où des crues fréquentes se produisent, pouvant être intégré dans la délimitation de la zone à risque. La complémentarité des deux méthodes mène à une meilleure gestion des risques d'inondation sur territoire.

#### 4. CONCLUSION

La cartographie hydrogéomorphologique représente une approche complémentaire à l'hydrologie statistique pour l'évaluation des zones à risque d'inondation. L'approche hydrogéomorphologique se base sur les marques que laissent les crues dans le paysage fluvial. L'enveloppe maximale des crues rares à exceptionnelles doit être intégrée de façon réfléchie dans les schémas d'aménagement. Pour cela, l'adoption d'une vision multidisciplinaire dans l'évaluation de la récurrence des crues et dans la détermination des zones inondables au Québec est nécessaire. Les événements extrêmes ont été nombreux dans les dernières années et on peut penser que dans le contexte des changements climatiques, ces événements sont amenés à se produire beaucoup plus souvent. De plus, les systèmes fluviaux répondent fortement à l'anthropisation du territoire et l'évaluation de leur réponse d'un point de vue uniquement statistique peut s'avérer inadéquate. L'analyse de la vallée de la Rivière-au-Renard

à l'aide de la cartographie hydrogéomorphologique permet de mieux comprendre l'inondation survenue au mois d'août 2008 et peut guider le développement de la municipalité dans une perspective de gestion du risque d'inondation.

#### 5. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Normand Bergeron et Ali Assani pour l'évaluation du manuscrit ainsi que les réflexions suscitées par leur évaluation.

#### 6. RÉFÉRENCES

- Ballais, J.L. et Garry, G., 2005. Contribution de l'hydrogéomorphologie à l'évaluation du risque d'inondation : le cas du midi méditerranéen français. *Comptes Rendus Geoscience*, vol. 337, 1120-1130.
- Bravard, J.-P. et Petit, F., 1997. Les cours d'eau : dynamique du système fluvial. Armand Colin, Paris, 222 pages.
- Brierley, G. et Fryirs, K., 2005. *Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework*. Blackwell Publishing, Malden, 398 pages.
- Centre d'expertise hydrique, 2008. [www.cehq.gouv.qc.ca](http://www.cehq.gouv.qc.ca). Site du Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs consulté le 1 février 2008.
- Chave S., 2002. Pertinence de la cartographie hydrogéomorphologique dans l'approche des inondations rares à exceptionnelles : exemple de sept bassins fluviaux dans les Corbières et le Minervois. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, no. 4, 5-16.
- Commission on Geosciences, Environment, and Resources, National Research Council, 1996. *Alluvial fan flooding*. National Academy Press, Washington, 182 p.
- Desloges, J.R. et Church, M.A. (1989) Wandering gravel-bed rivers. *Le Géographe canadien*, vol. 33, 360-364.
- Garry G., Ballais, J.L. et Masson, M., 2002. La place de l'hydrogéomorphologie dans les études d'inondation en France Méditerranéenne. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, no. 1, 297-306.
- Gillard, O. et Gendreau, N., 1998. Inondabilité : une méthode de prévention raisonnable du risque d'inondation pour une gestion mieux intégrée des bassins-versant. *Revue des sciences de l'eau*, no. 3, 429-444.
- Gregory, K.J. 2006. The human role in changing river channels. *Geomorphology*, vol. 79, 172-191.
- Knighton, D., 1998. *Fluvial Forms and Processes : A New Perspective*. Arnold Publication, London, 383 pages.
- Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement et Ministère de l'équipement, des transports et du Logement, 1999. *Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR) des risques d'inondation : guide méthodologique*, La documentation française, 123 pages.
- Robert, A., 2003. *River Processes: An Introduction to Fluvial Dynamics*. Arnold Publication, London, 240 pages
- Thorne, C.R., Hey R.D., et Newson M.D., 1998. *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. Chichester, John Wiley, 376 pages.