

**CENTRALE EASTMAIN-1-A ET DÉRIVATION RUPERT**

**RAPPORT SECTORIEL**

**SIMULATION DES HABITATS DE REPRODUCTION  
PISCICOLE DE LA RIVIÈRE RUPERT AVEC  
HYDROSIM/MODELEUR**

**Hydro-Québec Équipement**

et la

**Société d'Énergie de la Baie James**

**Rapport INRS-ETE #R-732**

**Décembre 2004**

*Auteur(s) et titre (pour fins de citation) :* Boudreau, P., M. Leclerc et Y. Secretan (2004). Centrale de l'Eastmain-1-A et dérivation Rupert - Simulation des habitats de reproduction piscicole de la rivière Rupert avec HYDROSIM/MODELEUR. Rapport à Hydro-Québec et à la Société d'Énergie de la Baie James. Rapport INRS-ETE #R-732. Décembre, 60 pages.

*Résumé :* Le régime de débit réservé écologique constitue un enjeu important de la dérivation partielle de la rivière Rupert. Pour déterminer un régime hydrologique au point de coupure permettant de préserver les habitats de reproduction des principales espèces, la modélisation 2D des microhabitats (MMH) a été retenue avec d'autres approches complémentaires. Afin d'évaluer la sensibilité des résultats aux outils de simulation employés, l'INRS-ETE s'est engagée à répliquer avec ses propres logiciels (MODELEUR/HYDROSIM) le programme de modélisation conduit par le consultant principal (GENIVAR), avec le logiciel TELEMAC-2D. Toutefois, le présent mandat ne comprend pas de proposition de régime de débit réservé, cette responsabilité demeurant celle de GENIVAR.

La modélisation des microhabitats est une méthodologie reconnue consistant d'abord à modéliser les écoulements d'un échantillon de la rivière. Une analyse de sensibilité au débit est conduite dans la gamme pertinente à la détermination d'un régime de débits réservés. Ces résultats sont ensuite traités en fonction des préférences d'habitats des espèces ciblées et il en résulte des cartes d'habitat qui, une fois intégrées spatialement, produisent des courbes de disponibilité d'habitats en fonction du débit, lesquelles sont établies en fonction des périodes cibles du cycle de vie des espèces à protéger.

Deux tronçons ont été sélectionnés, au PK 216 et au PK 281, en raison de leur potentiel de reproduction pour les espèces piscicoles ciblées. En plus des données brutes de terrain et des modèles préférentiels d'habitat, GENIVAR a mis à notre disposition quelques exemples de résultats hydrodynamiques obtenus avec TELEMAC-2D auxquels nos propres résultats ont été comparés. Le présent exercice a été effectué indépendamment pour certains débits représentatifs, forts comme faibles, formant la gamme d'intérêt. Pour le site du PK 216, on retrouve dans l'ensemble le même schéma d'écoulement, des différences subsistant aux endroits du modèle où généralement les résultats ont une fiabilité plus faible, notamment près des frontières ouvertes où la répartition des écoulements est imposée par l'opérateur.

Au PK 281, on retrouve dans l'ensemble les mêmes schémas d'écoulement pour toute la gamme de débit simulée. Des différences locales sont cependant notables, particulièrement sur le seuil au centre du domaine. Elles peuvent être expliquées par le fait que les données manquantes à cet endroit n'ont pas été comblées identiquement par les deux équipes de

modélisation. Le maillage diffère également, notamment par sa densité et son extension près de la frontière aval.

Plusieurs modèles d'habitat de reproduction du poisson ont été appliqués. Les modèles les plus performants à l'étape de validation ont été retenus et sont appliqués dans ce rapport. Les espèces considérées sont le grand corégone, une « guilde » d'espèces similaires incluant les meuniers et le doré jaune, ainsi que l'esturgeon jaune. Différentes approches ont été appliquées pour représenter leurs préférences : *courbes d'utilisation*, *courbes de préférence*, *régressions logistiques*, ou encore, *courbes de préférences* pour la *guilde*. Les résultats bruts sont présentés dans le rapport mais leur interprétation est incluse dans le rapport correspondant de GENIVAR. Mentionnons qu'une règle d'interprétation basée sur le *principe de précaution* a été appliquée visant à sélectionner le débit réservé maximum parmi les résultats obtenus avec les différents modèles.

**Mots clés :** Habitats de reproduction, débits réservés, rivière Rupert, dérivation, simulation hydrodynamique, logiciel HYDROSIM/MODELEUR

**Date :** décembre 2004

**Version :** finale

**Diffusion :** interne/externe

**Liste de distribution :** Hydro-Québec Équipement (Direction Environnement et Services techniques)/ Société d'Énergie de la Baie James

*Authors(s) and title (for reference) :* Boudreau, P., M. Leclerc and Y. Secretan (2004). Centrale de l'Eastmain-1-A et dérivation Rupert - Simulation des habitats de reproduction piscicole de la rivière Rupert avec HYDROSIM/MODELEUR. Rapport to Hydro-Québec and to the Société d'Énergie de la Baie James. Report INRS-ETE #R-732. December, 60 pages.

*Abstract :* The conservation flow regime is an important issue of the partial diversion of the Rupert River towards the Eastmain River. In order to determine the proper hydrological regime at the upstream diversion point that would allow to conserve the spawning habitats of the main fish species downstream, a two-dimensional (2D) habitat modeling approach was retained along with complementary holistic methods. Aiming to evaluate the sensitivity of simulation results with respect to the tools employed, INRS-ETE was committed to replicate the GENIVAR TELEMAR-2D modeling program by making use of its own software tools, MODELEUR/HYDROSIM. However, the INRS-ETE mandate do not include any proposition concerning the conservation flow regime, this aspect remaining the responsibility of GENIVAR.

The microhabitat modeling methodology is a well known approach that is firstly undertaken by modeling the flow regime for a selected sample of river reaches. A sensitivity analysis to the discharge within a relevant range with respect to the determination of a seasonal regime of conservation flows is conducted. These results are further treated by considering the habitat preferences of the target fish species (IFN or instream flow needs). This results in habitat maps that are spatially integrated to produce curves expressing the relationship between habitat availability and flow discharge for sensitive target periods of the life cycle of the species to protect.

Two river reaches were selected, at the KP 216 and the KP 281, for their well known spawning potential for the target species. The field data and the fish preferences models has been provided by GENIVAR. The two simulation programs were conducted independently for a given number of hydrological reference events, forming the relevant flow range. A sample of hydrodynamic results obtained with TELEMAR-2D was also provided by GENIVAR for comparison purposes with HYDROSIM results. For the KP 216 site, both models simulated similar flow patterns, some minor differences remaining in some areas where results are generally poorer, particularly, close to the open boundaries where the flow conditions are imposed by the model operator.

Similarly, at the KP 281, both models provided globally same simulated flow patterns for all the flow events that were compared. Some local differences can still be observed, especially in a limited area located at the centre of the flow domain where the field data sets were poorer

because of some problems of characterization (fast rapid zone), and where indirect information (e.g. aerial photographs) was mobilized to complete the digital terrain model.

Several fish spawning habitat models were applied. The most performing models at the validation stage were retained and applied in this report. The target species were namely the lake sturgeon, the walleye, the longnose and white suckers and the lake whitefish. Among the different approaches used to represent their *preferenda*, one counts *utilisation curves*, *logistic regressions*, *preference curves*, either for single species or for the already mentioned guild. The final results are being displayed in this report but their interpretation is presented in the GENIVAR report. However, let's mention that an interpretation rule based on the *principle of precaution* was applied aiming to select the highest conservation flow discharge among the results obtained with the various models.

**Key words :** Spawning habitats, Rupert River, conservation flow regime, diversion, hydrodynamic simulation, HYDROSIM/MODELEUR software

**Date :** December 2004

**Version :** final

**Diffusion :** internal/external

**Distribution list:** Hydro-Québec Équipement (Direction Environnement et Services techniques)/ Société d'Énergie de la Baie James

## ÉQUIPE DE RÉALISATION

---

### **Hydro-Québec (Équipement)**

Responsable de l'étude	<i>Geneviève Corfa, biologiste</i>
Conseillers en milieu naturel	<i>Gabriel Durocher, biologiste</i> <i>Jean-Christophe Guay, biologiste</i> <i>Michel Bérubé, biologiste</i>
Collaborateur	<i>Francis Therrien, Ing.</i>

### **Institut national de la recherche scientifique – Eau, Terre et Environnement**

Responsable, rédaction	<i>Michel Leclerc, Ph.D., M.Sc., Ing. Professeur</i>
Simulations, rédaction	<i>Paul Boudreau, M.Sc.-Eau, Agent de recherche</i>
Soutien hydro-informatique	<i>Yves Secretan, , Ph.D., M.Sc. Professeur</i>

### **GENIVAR**

Chargé de projet	<i>Louis Belzile, biologiste, M.Sc.</i>
Collaborateurs	<i>Steve Renaud, Ing., M.Sc.-Eau</i> <i>Pierre Pelletier, Ing., M.Sc.</i> <i>Isabelle Guay, biologiste</i>

### **Environnement Illimité Inc.**

Aspects biologiques – esturgeon jaune	<i>Marc Gendron, biologiste, M.Sc.</i>
Collaborateurs :	<i>Gilles Guay, biologiste</i> <i>Frédéric Burton, biologiste</i>

Nous remercions les nombreux autres collaborateurs des organismes mentionnés qui ont également participé indirectement à cette étude.

© INRS-ETE

ISBN 2-89146-308-0

## TABLE DES MATIÈRES

<b>SOMMAIRE</b>	<b>II</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>IV</b>
<b>1. CONTEXTE ET OBJECTIFS</b>	<b>1</b>
1.1 L'enjeu des débits réservés écologiques dans l'entente <i>Boumhounan</i>	1
1.2 Portée de l'étude de l'INRS-ETE	1
1.3 Objectifs	2
<b>2. DESCRIPTION SOMMAIRE DU PROJET</b>	<b>3</b>
<b>3. MÉTHODOLOGIE</b>	<b>5</b>
3.1 Vue d'ensemble	5
3.2 La modélisation du terrain et de l'hydrodynamique avec <b>MODELEUR/HYDROSIM</b>	6
3.2.1 Le simulateur hydrodynamique HYDROSIM	6
3.2.2 La modélisation numérique de terrain avec le logiciel <b>MODELEUR V1.07</b>	6
3.3 <b>Résultats de la modélisation du terrain – Présentation des biefs de référence</b>	7
3.3.1 Espèces cibles, zone d'étude et choix des tronçons de référence	7
3.3.2 Données disponibles et contraintes de construction du modèle numérique de terrain	9
3.3.3 Présentation du tronçon PK 216 et de son modèle numérique de terrain (MNT)	9
3.3.4 Présentation du tronçon du PK 281 et de son modèle numérique de terrain	12
3.4 <b>Simulations hydrodynamiques</b>	16
3.4.1 Paramétrisation des deux tronçons à l'étude	16
3.4.2 Validation hydrodynamique – Tronçon PK 216	17
3.4.3 Validation hydrodynamique – Tronçon PK 281	19
3.4.4 Présentation des résultats hydrodynamiques pour un état typique	23
3.4.5 Gamme de débits de référence pour les simulations hydrodynamiques	26
<b>4. COMPARAISON HYDRODYNAMIQUE HYDROSIM – TELEMAR 2D</b>	<b>28</b>
4.1 Particularités des outils de simulation	28
4.2 Comparaison des résultats - Tronçon PK 216	29
4.3 Comparaison des résultats - Tronçon PK 281	32
<b>5. RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION DES MICROHABITATS</b>	<b>37</b>
5.1 Revue des modèles d'habitat préférentiels utilisés	37

<b>5.2</b>	<b>Modèle du grand corégone</b>	<b>37</b>
5.2.1	Indices de base univariés	37
5.2.2	Indice global pour le grand corégone	38
<b>5.3</b>	<b>Modèle de l'esturgeon jaune</b>	<b>40</b>
5.3.1	Indices de base univariés	40
5.3.2	Indice global pour l'esturgeon jaune	43
<b>5.4</b>	<b>Modèle de la « guild printanière »</b>	<b>43</b>
<b>5.5</b>	<b>Méthodologie du calcul de la disponibilité de l'habitat : les Aires Pondérées Utiles ou <i>APU</i></b>	<b>44</b>
<b>5.6</b>	<b>La disponibilité d'habitats de reproduction – Tronçon PK 216</b>	<b>44</b>
<b>5.7</b>	<b>La disponibilité d'habitats de reproduction – Tronçon PK 281</b>	<b>47</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONS</b>	<b>51</b>
6.1	Sur la portée du mandat	51
6.2	Sur les résultats hydrodynamiques	51
6.3	Sur les particularités des outils de simulation	52
6.4	Sur les résultats de disponibilité d'habitats	52
<b>7.</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>54</b>
	<b>ANNEXE MÉTHODOLOGIQUE : LA THÉORIE D'HYDROSIM</b>	<b>56</b>
	<b>Modèle mathématique</b>	<b>56</b>
	<b>Traitement des conditions aux limites et initiales</b>	<b>58</b>
	<b>Discrétisation par éléments finis</b>	<b>59</b>
	<b>La résolution numérique</b>	<b>59</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Vue d'ensemble du projet de dérivation de la rivière Rupert .....	4
Figure 2 : Réseau hydrographique dans la zone d'étude, points de coupure et sites modélisés.....	8
Figure 3 : Photographie aérienne (mosaïque) de la rivière Rupert au PK 216 (source GENIVAR). Les eaux blanches signalent la présence de blocs métriques et/ou d'affleurements rocheux. On distingue également les trajectoires d'écoulement. ....	10
Figure 4 : Distribution des points de mesure topographiques au PK 216 – En rouge, les limites du modèle .....	11
Figure 5 : Maillage hydrodynamique du tronçon du PK216 - 11423 éléments T6L et 23388 nœuds.....	11
Figure 6 : Topographie du lit mineur utilisée pour la modélisation hydrodynamique au PK 216 .	12
Figure 7 : Distribution des diamètres des substrats (MNS) au PK 216.....	12
Figure 8 : Photographie aérienne (mosaïque) de la rivière Rupert au PK 281 (source GENIVAR). Les eaux blanches signalent la présence de blocs métriques et/ou d'affleurements rocheux.	13
Figure 9 : Distribution des points de mesure topographiques au PK 281 – La ligne bleue signale les limites du modèle .....	14
Figure 10 : Maillage hydrodynamique du tronçon du PK 281 - 11896 éléments T6L, 24277 nœuds.....	14
Figure 11 : Topographie du lit mineur utilisée pour la modélisation hydrodynamique au PK 281	15
Figure 12 : Distribution des substrats au PK 281 .....	15
Figure 13 : Position du profil longitudinal pour la comparaison des niveaux d'eau (en bleu) – PK 216.....	17
Figure 14 : Comparaison des niveaux d'eau mesurés et simulés avec HYDROSIM – PK 216 ....	18
Figure 15 : Exemple de comparaison des vitesses mesurées au courantomètre Doppler acoustique (en noir) et simulées avec HYDROSIM (en rouge) – PK 216. Mesures par GENIVAR .....	19
Figure 16 : Position du profil longitudinal pour la comparaison des niveaux d'eau (bleu) – PK 281 .....	20
Figure 17 : Comparaison des niveaux d'eau mesurés et simulés avec HYDROSIM – PK 281 ....	21
Figure 18 : Position des mesures de niveau d'eau du 23 mai 2003 (855 m <sup>3</sup> /s).....	21
Figure 19 : Comparaison des vitesses mesurées au courantomètre Doppler acoustique (en noir) et simulées avec HYDROSIM (en rouge) – PK 281. Mesures par GENIVAR .....	23

Figure 20 : Résultat de simulation des vitesses au PK 216 pour un débit de 800 m <sup>3</sup> /s.....	24
Figure 21 : Détail de simulation des vitesses au PK 216 pour un débit de 800 m <sup>3</sup> /s .....	24
Figure 22 : Résultat de simulation des vitesses au PK 216 pour un débit de 800 m <sup>3</sup> /s.....	25
Figure 23 : Détail de simulation des vitesses au PK 281 pour un débit de 800 m <sup>3</sup> /s .....	25
Figure 24 : Extension du domaine mouillé et des surfaces asséchées au PK 216 pour des débits de 200 (gris) et 1200 m <sup>3</sup> /s (noir).....	26
Figure 25 : Extension du domaine mouillé et des surfaces asséchées au PK 281 pour des débits de 200 et 1200 m <sup>3</sup> /s .....	27
Figure 26 : Profondeur simulée à 600 m <sup>3</sup> /s d'après le modèle HYDROSIM – PK 216. Le trait rouge représente la limite du modèle GENIVAR.....	30
Figure 27 : Profondeur à 600 m <sup>3</sup> /s d'après le modèle GENIVAR (TELEMAC 2D) – PK 216 Le trait rouge représente la limite du modèle INRS-ETE. ....	30
Figure 28 : Vitesses simulées au débit de 600 m <sup>3</sup> /s avec HYDROSIM (INRS-ETE) – PK 216 ...	31
Figure 29 : Vitesses simulées à 600 m <sup>3</sup> /s avec TELEMAC (GENIVAR) – PK 216 .....	31
Figure 30 : Profondeur simulée à 600 m <sup>3</sup> /s d'après le modèle HYDROSIM – PK 281. Le trait rouge représente la limite du modèle GENIVAR.....	33
Figure 31 : Profondeur simulée à 600 m <sup>3</sup> /s d'après le modèle TELEMAC – PK 281. Le trait rouge représente la limite du modèle HYDROSIM (Source GENIVAR).....	33
Figure 32 : Vitesses (norme et direction) d'après HYDROSIM à 300 m <sup>3</sup> /s – PK 281 .....	34
Figure 33 : Vitesses (norme et direction) d'après TELEMAC à 300 m <sup>3</sup> /s – PK 281.....	34
Figure 34 : Vitesses (norme) simulées avec HYDROSIM à 600 m <sup>3</sup> /s – PK 281 .....	35
Figure 35 : Vitesses (norme) simulées avec TELEMAC à 600 m <sup>3</sup> /s – PK 281 .....	35
Figure 36 : Vitesses (norme et direction) simulées avec HYDROSIM à 900 m <sup>3</sup> /s – PK 281 Pour alléger la figure, les vecteurs sont représentés pour un nœud sur trois .....	36
Figure 37 : Vitesses (norme et direction) simulées avec TELEMAC à 900 m <sup>3</sup> /s – PK 281 .....	36
Figure 38 : Modèle d'habitat de reproduction ( $I_{vit}$ ) pour le grand corégone – Variable vitesse (Source GENIVAR, 2004). ....	39
Figure 39 : Modèle d'habitat de reproduction ( $I_{prof}$ ) pour le grand corégone – Profondeur (Source GENIVAR, 2004). ....	39
Figure 40 : Modèle d'habitat de reproduction ( $I_{subs}$ ) pour le grand corégone –Taille du substrat (GENIVAR, 2004).....	40

Figure 41 : Modèle d'habitat de reproduction de l'esturgeon jaune pour la vitesse ( $I_{vit}$ ) d'après l'utilisation (Source : Environnement Illimité, 2004) .....	41
Figure 42 : Modèle d'habitat de reproduction pour l'esturgeon jaune d'après l'utilisation de chacune des classes de substrat. (Source Environnement Illimité Inc., 2004) .....	42
Figure 43 : Zone de calcul de la disponibilité d'aires de fraie de l'esturgeon jaune – PK 216.....	45
Figure 44 : Disponibilité d'habitats de fraie du grand corégone de la rivière Rupert – PK 216 ....	45
Figure 45 : Disponibilité d'habitats de fraie de l'esturgeon jaune de la rivière Rupert – PK 216 .	46
Figure 46 : Disponibilité d'habitats de fraie de l'esturgeon jaune de la rivière Rupert - Frayère identifiée du PK 216 .....	46
Figure 47: Disponibilité d'habitats de fraie de la guildes printanière de la rivière Rupert – PK 21647	
Figure 48 : Zone de calcul de la disponibilité d'aires de fraie de l'esturgeon jaune – Aval du PK 281 .....	48
Figure 49 : Zone de calcul de la disponibilité d'aires de fraie de l'esturgeon jaune – Frayère en rive gauche en aval du PK 281 .....	48
Figure 50 : Disponibilité d'habitats de fraie du grand corégone de la rivière Rupert – PK 281 ....	49
Figure 51: Disponibilité d'habitats de fraie de la guildes printanière de la rivière Rupert – PK 28149	
Figure 52 : Disponibilité d'habitats de fraie de l'esturgeon jaune de la rivière Rupert - Zone aval du PK 281 .....	50
Figure 53 : Disponibilité d'habitats de fraie de l'esturgeon jaune de la rivière Rupert - Zone de fraie identifiée du PK 281 .....	50
Figure 54: Notations du modèle de Saint-Venant bidimensionnel horizontal.....	56
Figure 55: Discrétisation des variables à l'aide des éléments T6L, T3, L3L et L2 dans HYDROSIM.....	60

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Comparaison des niveaux d'eau mesurés et simulés - Débit de 855 m <sup>3</sup> /s au PK 281.22	
Tableau 2 —Proportion des différentes classes de substrat sur les frayères à esturgeon jaune des rivières Rupert et Eastmain et valeur des sous-indices de substrat correspondants (Source : Environnement Illimité Inc., 2004) .....	42

# 1. Contexte et objectifs

---

## 1.1 L'enjeu des débits réservés écologiques dans l'entente *Boumhounan*

Suite à la convention *Boumhounan* du 7 février 2002 intervenue entre les Cris et Hydro-Québec, la Société d'Énergie de la Baie James (SEBJ) a été mandatée pour développer l'avant-projet de la centrale de l'Eastmain-1-A (770 MW) et de la dérivation partielle de la rivière Rupert.

Des études de caractérisation du milieu aquatique ont été réalisées au début des années 1990 sur une partie de la zone d'étude dans le cadre des projets d'aménagement hydroélectrique d'Eastmain-1 et du complexe Nottaway-Broadback-Rupert (NBR). Ces études ont récemment été actualisées et/ou complétées en fonction de la nouvelle zone d'étude et des exigences légales actuelles, comprenant les dispositions fédérales.

Un enjeu environnemental du projet est le régime de débits réservés écologiques de la rivière Rupert. Selon la convention *Boumhounan*, le débit minimum dans la Rupert doit être équivalent à au moins 20% du débit module au point de dérivation (PK 314). Toutefois, la valeur exacte de ce débit constitue un des objectifs à atteindre auxquels contribue la présente étude, incluant les modulations que l'on devra y apporter selon les saisons.

GENIVAR a été mandatée comme consultant principal pour évaluer les impacts sur la faune aquatique et pour déterminer le régime de débits réservés écologiques dans la Rupert. Le mandat de l'INRS-ETE est d'appuyer GENIVAR sur les aspects liés à la modélisation hydrodynamique, laquelle a été utilisée dans la détermination de ce régime. La simulation des habitats de poisson et la détermination des débits réservés selon la méthode de modélisation des microhabitats (MMH) constituent, de concert avec de nombreuses expertises sur l'écologie du cours d'eau, l'approche méthodologique privilégiée pour cette contribution. La portée exacte de la contribution de l'INRS-ETE est définie à la section suivante.

## 1.2 Portée de l'étude de l'INRS-ETE

Le mandat de l'INRS-ETE concerne la modélisation bidimensionnelle (2D) des habitats de reproduction des espèces cibles présentes dans la rivière Rupert, lesquels se retrouvent principalement dans les zones de rapides (tronçons lotiques). Il exclut donc toute analyse relative aux habitats d'alimentation des mêmes espèces, lesquels se retrouvent surtout en zone lentic et

ne requièrent pas nécessairement de modélisation 2D. Le mandat ne comprend pas non plus la détermination des préférences d'habitat des espèces, qui est prise en charge par les consultants en biologie retenus par Hydro-Québec. Il consiste seulement à appliquer les modèles d'habitats développés par le consultant principal (GENIVAR) et ses partenaires (notamment, Environnement Illimité) à ses propres résultats hydrodynamiques. De plus, un certain support méthodologique est requis de la part de l'INRS-ETE à certaines étapes critiques de la démarche d'analyse. Toutefois, les avis émis sont à caractère consultatif seulement. Dans cette optique, les recommandations sont formulées afin de se conformer le plus possible et éventuellement repousser les limites de l'état des connaissances telles que rapportées dans Leclerc *et al.* (2003) suite à l'Atelier sur l'état des connaissances et la modélisation d'habitat tenu à Québec en mars de la même année.

### **1.3 Objectifs**

GENIVAR a été mandaté comme consultant principal pour réaliser les simulations d'habitat et proposer des scénarios de régime de débits réservés écologiques. Toutefois, comme le domaine de la simulation numérique fluviale et de ses habitats évolue rapidement, il est apparu utile que ce consultant s'adjoigne des chercheurs d'INRS-ETE dont les innovations, notamment l'approche bi-dimensionnelle des modèles d'habitats, ont contribué à la reconnaissance de son expertise dans ce domaine.

Le mandat de l'INRS-ETE dans ce contexte consiste à :

1. *Effectuer, par principe de précaution, des modélisations hydrodynamiques en parallèle à celles réalisées par GENIVAR sur des tronçons ciblés de la Rupert;*
2. *Comparer les résultats hydrodynamiques obtenus avec ceux du consultant principal;*
3. *Appliquer les modèles de préférence d'habitat retenus par les consultants en biologie;*
4. *Contribuer à la bonification des études de modélisation du consultant principal et formuler au fur et à mesure les critiques et les suggestions appropriées.*

## 2. Description sommaire du projet

---

La dérivation partielle de la rivière Rupert (Figure 1) consiste à acheminer vers le complexe La Grande les eaux d'une partie de son bassin versant au moyen des ouvrages et des aménagements suivants :

- un barrage principal au kilomètre 314 de la rivière Rupert et trois barrages secondaires dont deux sur la rivière Nemiscau et un sur la rivière Lemare ;
- un évacuateur de crues sur la rivière Rupert à proximité du barrage ;
- une cinquantaine de digues formant le périmètre de fermeture ;
- deux biefs de retenue d'une superficie totale de l'ordre de 395 km<sup>2</sup> ;
- un ouvrage régulateur entre les biefs amont et aval au point de coupure de la rivière Rupert d'une capacité maximale de 800 m<sup>3</sup>/s ;
- un réseau de canaux totalisant approximativement 12 km pour faciliter l'écoulement dans les différentes portions des biefs ;
- des ouvrages assurant la restitution d'un débit réservé écologique dans le cours aval des rivières Rupert, Lemare et Nemiscau.

Le lecteur est renvoyé au chapitre 4 de l'étude d'impact pour une description détaillée du projet.

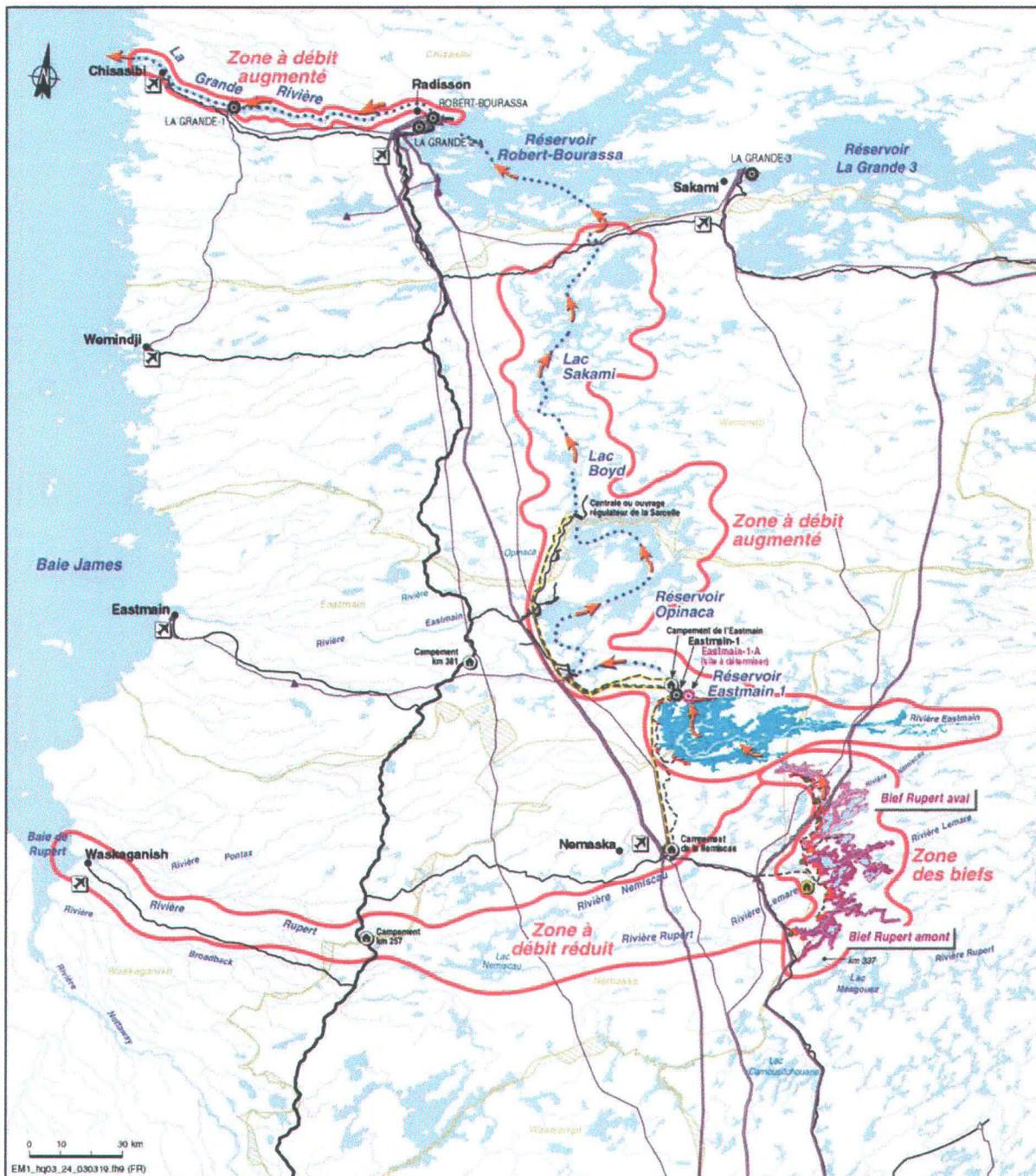


Figure 1 : Vue d'ensemble du projet de dérivation de la rivière Rupert

### 3. Méthodologie

---

#### 3.1 Vue d'ensemble

Au-delà des avis demandés, la méthodologie de la présente étude comprend les étapes suivantes, applicables à chacun des sites sélectionnés, étapes typiques de la méthodologie de modélisation bidimensionnelle des microhabitats (MMH):

1. *Participation avec le consultant principal à la reconnaissance de la rivière sur le terrain et à l'élaboration d'un protocole de relevés approprié pour les études par modèle 2D*
2. *Traitement et validation des données de terrain (itérativement avec les deux étapes suivantes)*
3. *Construction et validation du modèle numérique correspondant (MNT)*
4. *Construction et calibration/validation du modèle hydrodynamique*
5. *Simulations hydrodynamiques dans la gamme hydrologique de référence*
6. *Analyse comparative des résultats avec ceux obtenus par le consultant principal*
7. *Application des modèles préférentiels d'habitat, calcul de la disponibilité des habitats*
8. *Rapports, coordination*

Ci-après, les résultats de la modélisation de terrain et hydrodynamique seront brièvement présentés et comparés avec ceux obtenus par le consultant principal avec le programme TELEMAC-2D du Laboratoire national d'hydraulique (LNH) d'Électricité de France (EDF). Il est donc requis dans ce rapport de procéder également à une comparaison des outils utilisés. Nous y reviendrons plus loin. Quant aux résultats de disponibilité d'habitats, ceux-ci seront présentés dans un chapitre ultérieur. La formulation de recommandations de débits réservés découlant des relations disponibilité d'habitats/débit (les Aires Pondérées Utiles ou APU) découle du choix d'une méthode d'interprétation écologique de ces courbes, domaine dans lequel les auteurs du présent rapport n'ont ni la compétence ni le mandat. Cette responsabilité demeure donc celle du consultant principal qui y consacre son propre rapport (GENIVAR, 2004).

## **3.2 La modélisation du terrain et de l'hydrodynamique avec MODELEUR/HYDROSIM**

### **3.2.1 Le simulateur hydrodynamique HYDROSIM**

Le programme de simulation utilisé pour cette étude s'appelle HYDROSIM (Heniche *et al.*, 2002, 2001, 1999a et b). Il résout les équations de Saint-Venant qui régissent mathématiquement les écoulements fluviaux, stationnaires ou non, à deux dimensions. Le programme incorpore de plus une fonctionnalité couvrant-découvrant qui lui permet de trouver dynamiquement la frontière de l'écoulement en berge inclinée. La méthode des éléments finis est utilisée pour la résolution numérique. Il utilise un élément à six nœuds lui-même formé de 4 éléments linéaires à 3 nœuds.

Ayant fait l'objet dans une forme antérieure (MEFLU) de nombreuses publications scientifiques (dont Leclerc *et al.*, 1987, 1990a,b, Boudreau *et al.*, 1994), ce modèle a été développé par les chercheurs de l'INRS-ETE qui y ont apporté de nombreux perfectionnements au fil des années. Il a servi à de multiples reprises pour la résolution de problèmes d'ingénierie ou d'environnement fluvial notamment, pour Hydro-Québec, la S.E.B.J., Environnement Canada, Environnement Québec, la Garde Côtière Canadienne et des municipalités, souvent en collaboration avec des firmes de consultants. Le programme HYDROSIM a bénéficié, entre autres, du support financier du Fonds de recherche et de développement technologique en environnement (FRDTE) du MEF (Leclerc *et al.*, 1996) et il est actuellement en voie de révision en vue d'y apporter de nombreuses nouvelles fonctionnalités (supporté par le Fonds des Priorités gouvernementales en Sciences et Technologies, volet Environnement ou FPGSTE; voir Secretan *et al.*, 2003).

On trouvera à l'Annexe méthodologique une description un peu plus élaborée des éléments scientifiques et numériques qui sous-tendent ce programme.

### **3.2.2 La modélisation numérique de terrain avec le logiciel MODELEUR V1.07**

Le deuxième programme, appelé MODELEUR V1.07 (Secretan *et al.*, 2001, 2000, 1998), est un outil (logiciel) de modélisation numérique du terrain (MNT) comprenant un maillage de type éléments finis permettant de traiter très efficacement les différents ensembles de données spatiales nécessaires à HYDROSIM, et par extension, à diverses études sur l'environnement fluvial requérant de l'analyse spatiale. Il permet de piloter des simulations hydrodynamiques avec HYDROSIM. C'est un outil graphique et convivial de type SIG développé entièrement à l'INRS-ETE et maintenu à jour sur le plan informatique depuis plus de dix ans. Il a été mis en œuvre et éprouvé dans des situations très complexes, notamment pour représenter l'ensemble du tronçon fluvial du Saint-Laurent entre Cornwall et Trois-Rivières, incluant la rivière des Mille-îles. Il a aussi servi à traiter et représenter les données du Saguenay dans le cadre des travaux de simulation numérique pour la Commission scientifique et technique sur la gestion des barrages (CSTGB). Il est opéré sur une plate-forme PC sous Win32 (Windows NT). Ayant également

bénéficié du support du FRDTE et du FPGSTE, ce logiciel a été d'un précieux secours pour traiter et valider les ensembles de données hétérogènes des rivières du Saguenay. Une version 2 complètement revisitée est en préparation avec la participation de partenaires du secteur privé et avec le support du FPGSTE (Secretan *et al.*, 2003).

### **3.3 Résultats de la modélisation du terrain – Présentation des biefs de référence**

#### **3.3.1 Espèces cibles, zone d'étude et choix des tronçons de référence**

Les espèces ciblées pour les fins de la détermination du débit réservé durant les périodes de reproduction sont l'esturgeon jaune, le doré jaune, les meuniers (rouge et noir) et le grand corégone. Les raisons de ce choix sont exposées dans GENIVAR (2004). Le doré jaune et les meuniers ont été regroupés sous l'appellation « guildes printanière » parce que les caractéristiques de leurs habitats de reproduction sont très similaires (GENIVAR, 2004). Elles ont donc été traitées ensemble dans l'analyse des débits réservés. Rappelons que l'esturgeon jaune, le doré jaune et les meuniers se reproduisent au printemps (approximativement entre le 15 mai et le 30 juin) tandis que le grand corégone fraie à l'automne (5 octobre au 5 novembre).

L'ensemble de la zone d'étude pour les fins de débit réservé comprend le tronçon à débit réduit de la rivière Rupert depuis le point de dérivation (PK 314, voir la figure 2) . Plus précisément, l'étude se concentre sur deux tronçons désignés pour analyser la problématique des débits réservés. Ceux-ci sont situés respectivement à 216 km et 281 km de l'embouchure de la rivière. Ils ont été sélectionnés notamment en raison du potentiel de reproduction qu'ils représentent pour les espèces cibles. La justification écologique détaillée d'un tel choix est fournie dans le rapport GENIVAR (2004). La détermination du régime de débits réservés pour l'alimentation des poissons adultes et juvéniles n'est pas effectuée par modélisation bidimensionnelle, ce qui exclut cette préoccupation de la portée de la présente étude.

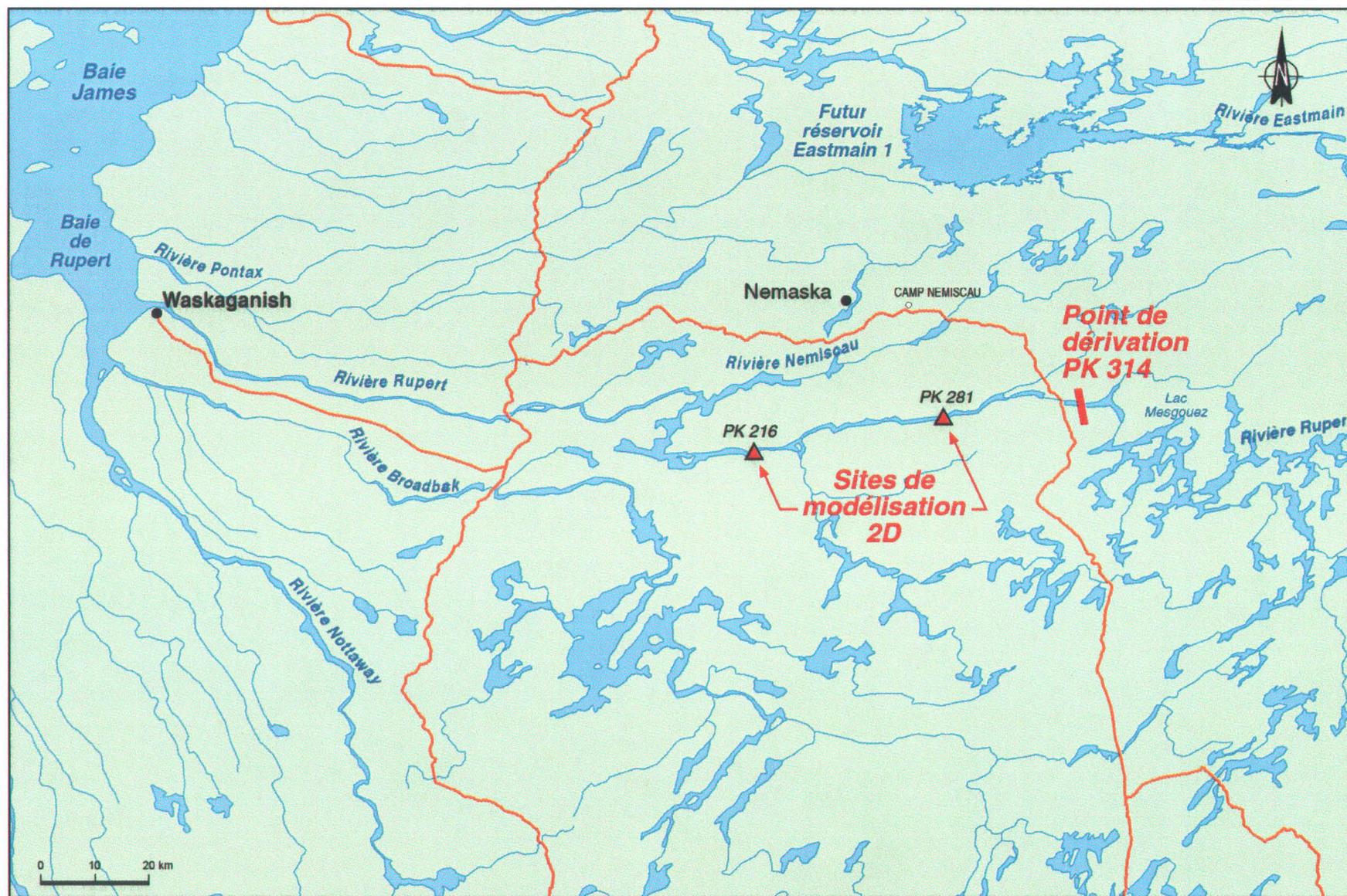


Figure 2 : Réseau hydrographique dans la zone d'étude, points de coupure et sites modélisés

### 3.3.2 Données disponibles et contraintes de construction du modèle numérique de terrain

Dans cette démarche, l'étape de relevés topographiques (responsabilité de GENIVAR) s'est révélée particulièrement ardue en raison des faciès d'écoulement très rapide dans les tronçons retenus. Les surfaces d'habitats de reproduction se trouvant pour la plupart situées au pied ou en bordure des rapides, une juste représentation du régime et de la distribution latérale des écoulements dans ces faciès est importante.

En raison de la difficulté d'échantillonner dans certaines zones de rapides très turbulentes, particulièrement au site du PK 281, les simulations préliminaires ont d'abord dû être conduites en posant certaines hypothèses morpho-hydrodynamiques quant à la morphologie de ces parties pratiquement impossibles à caractériser avec précision. Ces hypothèses sont basées sur :

1. la connaissance de la relation niveau-débit en certains points ou la ligne d'eau à un débit donné,
2. l'estimation d'une section hydraulique appropriée pour passer un débit de référence,
3. la distribution latérale de l'écoulement (veines d'eau, bifurcations, convergents),
4. l'observation d'indices de forme visibles d'après les photographies aériennes disponibles (affleurements rocheux, présence de blocs métriques, etc.).

En plus des paramètres habituels de résistance à l'écoulement et de viscosité numérique, la construction des modèles a donc dû être réalisée avec un degré de liberté additionnel représenté par une topographie complétée par estimation. Normalement, le modèle numérique d'élévation (MNE) se base sur une couverture exhaustive de mesures topographiques supposée recouvrir adéquatement les formes dominantes du lit de la rivière. Cependant, les contraintes logistiques lors de la mesure empêchent parfois d'obtenir cette couverture. L'information doit alors être estimée (calibrée) en accord avec les indices objectifs disponibles, obtenus lors de visite des sites au terrain et lors de l'examen de photographies aériennes à haute résolution (XEOS).

Des caractérisations additionnelles conduites tard au printemps de 2003 ont permis de confirmer le bien-fondé des hypothèses posées *a priori*, de combler en partie les manques de données topographiques, et de dûment compléter l'exercice de modélisation hydrodynamique.

### 3.3.3 Présentation du tronçon PK 216 et de son modèle numérique de terrain (MNT)

Le tronçon modélisé du PK 216 mesure environ 1,2 km de longueur (figure 3). Il débute au pied d'un important rapide et se termine avant un autre, mineur celui-là. Le tronçon est rectiligne à part une légère courbe vers la droite à l'approche du rapide aval. Le tronçon possède un écoulement relativement rapide, de type lotique. Les substrats de fort calibre, tels les blocs et blocs métriques, dominent le thalweg du tronçon. Sur les côtés, les substrats sont un peu plus

petits, allant du gravier au bloc. Dans des endroits plus abrités, et en rive la plupart du temps, on peut retrouver du sable et même du limon.

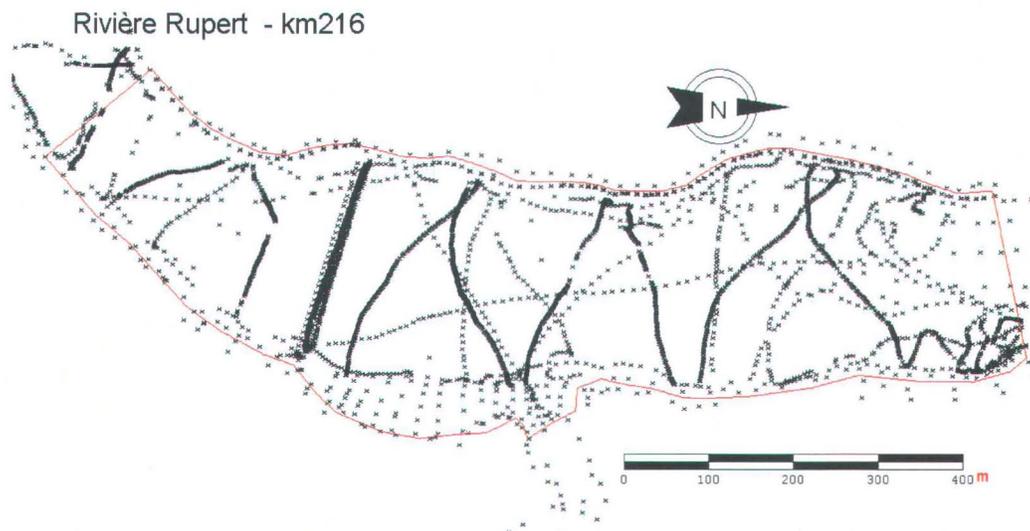


**Figure 3 : Photographie aérienne (mosaïque) de la rivière Rupert au PK 216 (source GENIVAR). Les eaux blanches signalent la présence de blocs métriques et/ou d'affleurements rocheux. On distingue également les trajectoires d'écoulement.**

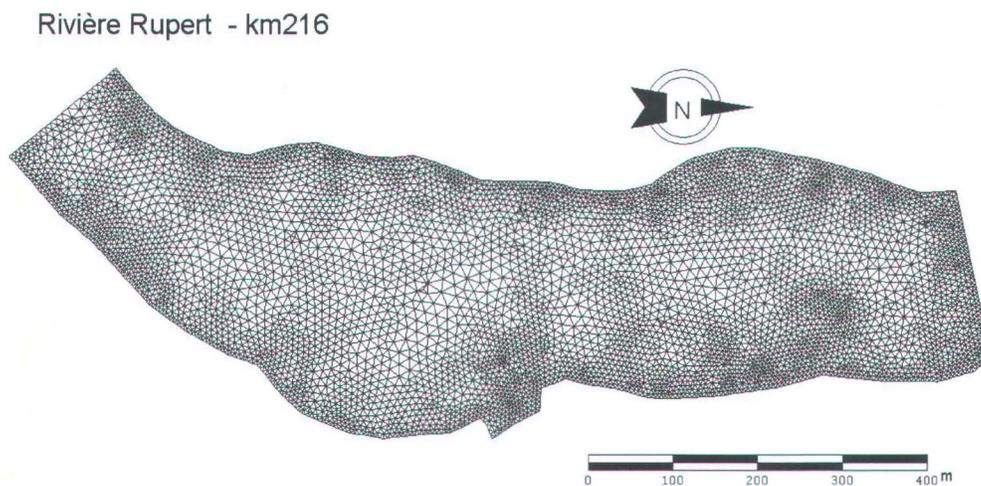
La figure 4 montre la distribution des points de mesure. On peut y distinguer la zone d'écoulement rapide où la caractérisation s'est avérée difficile et a requis des approximations tel qu'énoncé précédemment. Ces ajouts portaient peu à conséquence étant donné qu'ils n'affectaient qu'une très petite partie du tronçon à l'amont et que la ligne d'eau est contrôlée par l'aval (régime fluvial).

La topographie du lit mineur telle que mesurée est traitée par interpolation linéaire entre les points cotés à l'aide d'un maillage éléments finis de type Delaunay qui est généré automatiquement dans le logiciel MODELEUR. Cette représentation constitue le *modèle numérique d'élévation* (MNE) original; il comprend les estimations réalisées. Ce modèle alimente en données topographiques le maillage hydrodynamique (figure 5) qui, pour le PK 216, est constitué de 11 423 éléments T6L et 23 388 nœuds. La figure 6 montre la topographie du lit mineur telle que représentée par ce maillage qui reproduit aussi fidèlement que possible le MNE original, et peut donc être considéré comme valide. La figure 7 montre le diamètre caractéristique des substrats tels que représentés par le *modèle numérique du substrat* (MNS).

Cette information est portée sur le maillage hydrodynamique afin de paramétrer la résistance à l'écoulement ( $n$  de Manning) et permettre le calcul des préférences d'habitats piscicoles.



**Figure 4 : Distribution des points de mesure topographiques au PK 216 –  
En rouge, les limites du modèle**



**Figure 5 : Maillage hydrodynamique du tronçon du PK216 - 11423 éléments T6L et 23388 nœuds**

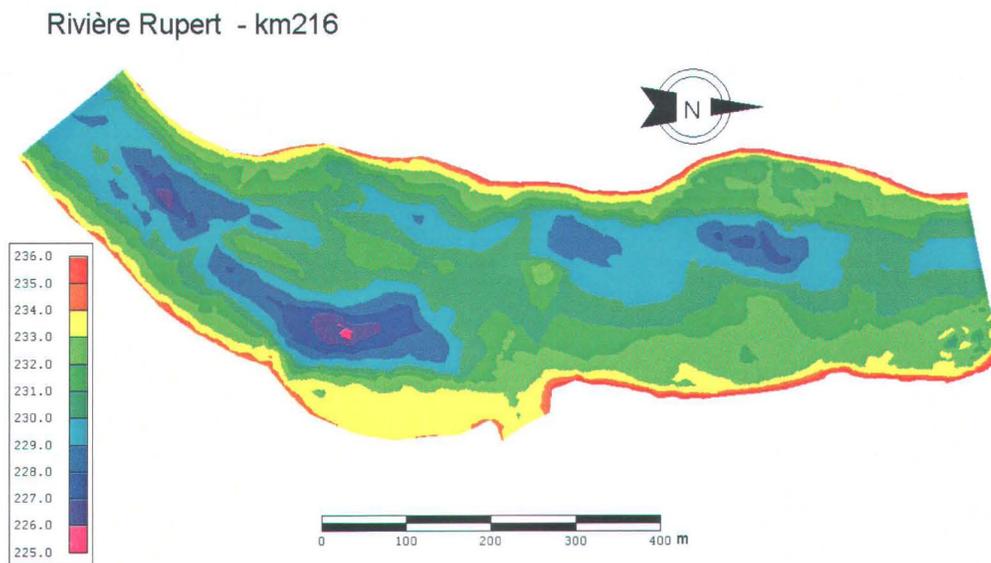


Figure 6 : Topographie du lit mineur utilisée pour la modélisation hydrodynamique au PK 216

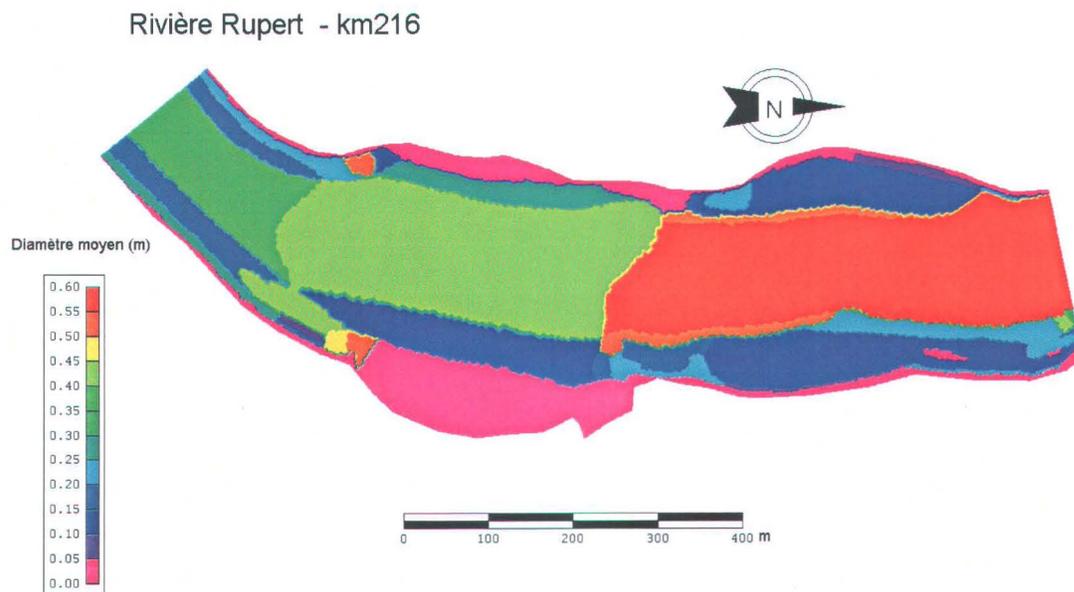


Figure 7 : Distribution des diamètres des substrats (MNS) au PK 216

### 3.3.4 Présentation du tronçon du PK 281 et de son modèle numérique de terrain

Le tronçon modélisé du PK 281 mesure environ 1,3 km de longueur. Le centre du tronçon est formé d'un rapide modéré. La rivière est large d'environ 300 m à l'amont, puis se rétrécit à

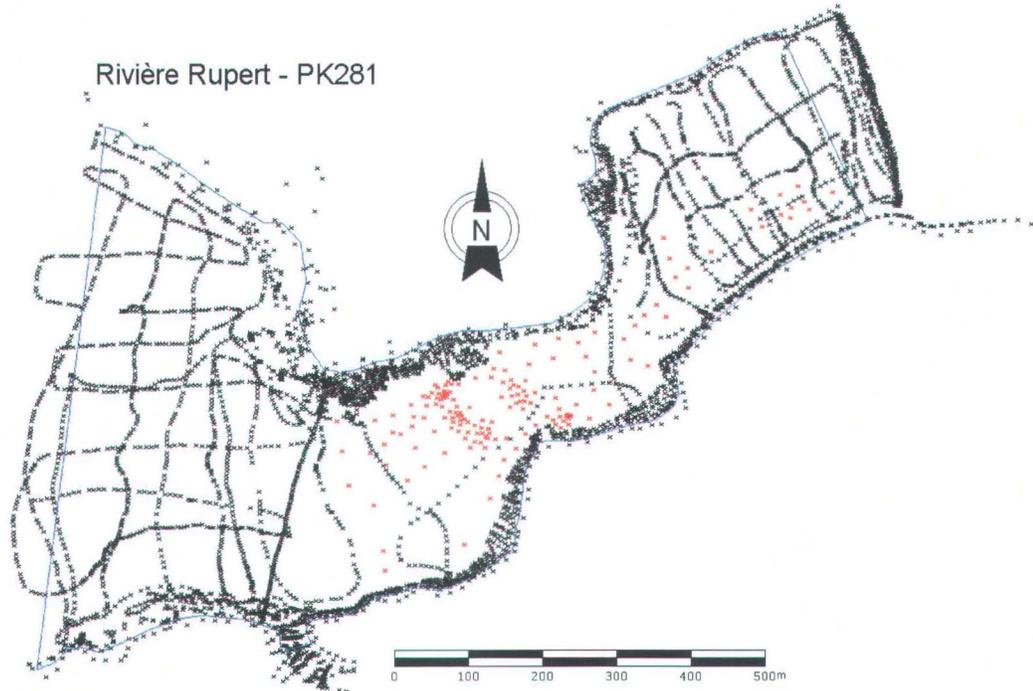
175 m au niveau du rapide qui forme un goulot d'écoulement, pour ensuite s'élargir à plus de 800 m à l'aval du rapide dans un bassin. Un bras secondaire de la Rupert (collectant aussi quelques petits tributaires) se jette dans le tronçon en rive gauche à l'aval du rapide. Selon un état de référence mesuré par GENIVAR, seulement 20 % du débit de ce bras provient de la Rupert elle-même, le reste provenant du bassin versant intermédiaire. L'écoulement est moyennement rapide à l'amont du seuil. Il s'accélère fortement sur le seuil puis ralentit pour devenir très faible, une fois entré dans le bassin.



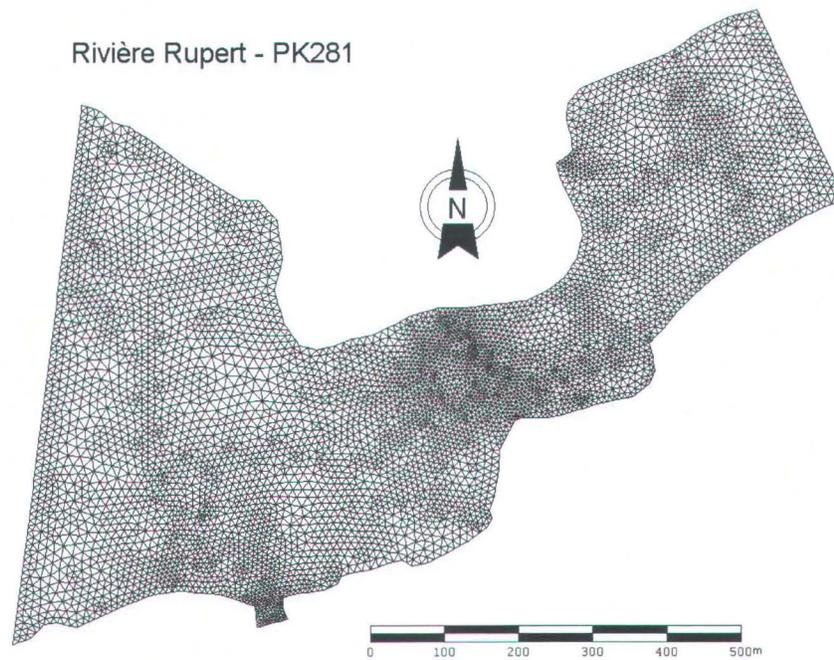
**Figure 8 : Photographie aérienne (mosaïque) de la rivière Rupert au PK 281 (source GENIVAR).** Les eaux blanches signalent la présence de blocs métriques et/ou d'affleurements rocheux.

Pour les mêmes raisons d'accessibilité à l'ensemble du site, la couverture spatiale des données topographiques du lit mineur n'était pas complète pour le tronçon PK 281 (figure 9) surtout au niveau du rapide (seuil) situé dans la portion médiane du tronçon. Même si l'intérêt principal du PK 281 est situé à l'aval du seuil, il était nécessaire de compléter la couverture topographique, même avec des valeurs estimées, pour générer une répartition des courants s'approchant de la réalité dans la zone d'intérêt. L'intervention a été plus significative que pour le PK 216. Comme il a été indiqué précédemment, les données du seuil ont été complétées en s'inspirant d'indices observables sur les photographies aériennes à basse altitude qui nous ont indiqué la trajectoire des principales veines d'eau et la présence d'éléments rocheux (blocs métriques) affleurant la surface de l'eau. En tenant compte de lois de conservation simples de l'écoulement, et en se basant sur quelques mesures de niveaux d'eau et de vitesse, il a été possible d'ajuster les données synthétiques au sein du MNE. La qualité de l'ajustement sera discutée à la section suivante.

Les figures suivantes (9 à 12) présentent les résultats des étapes successives de la construction du MNT du PK 281. Sur la première, les points rouges complètent au jugé les données.



**Figure 9 : Distribution des points de mesure topographiques au PK 281 –**  
La ligne bleue signale les limites du modèle



**Figure 10 : Maillage hydrodynamique du tronçon du PK 281 - 11896 éléments T6L, 24277 nœuds**

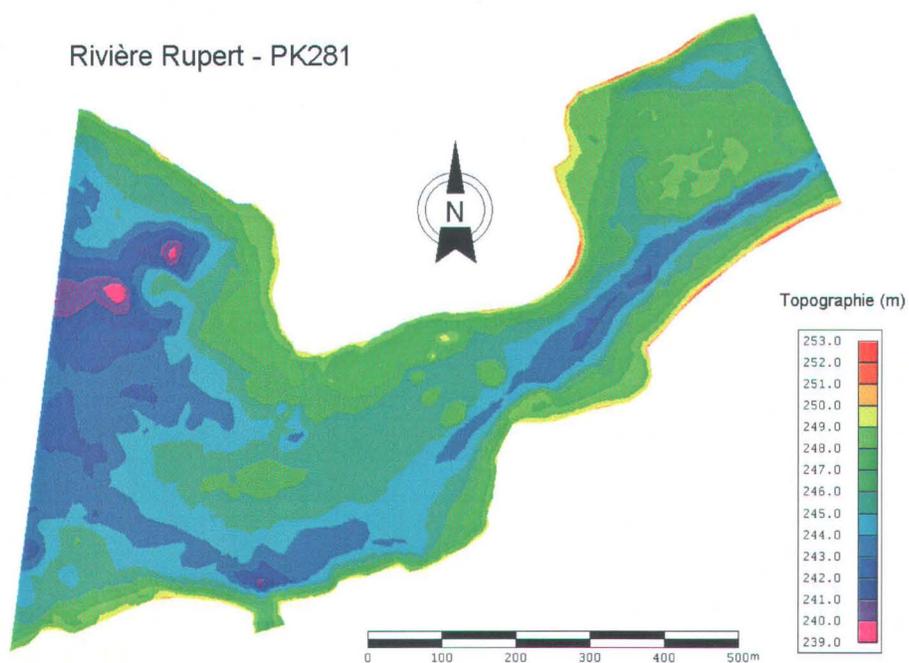


Figure 11 : Topographie du lit mineur utilisée pour la modélisation hydrodynamique au PK 281

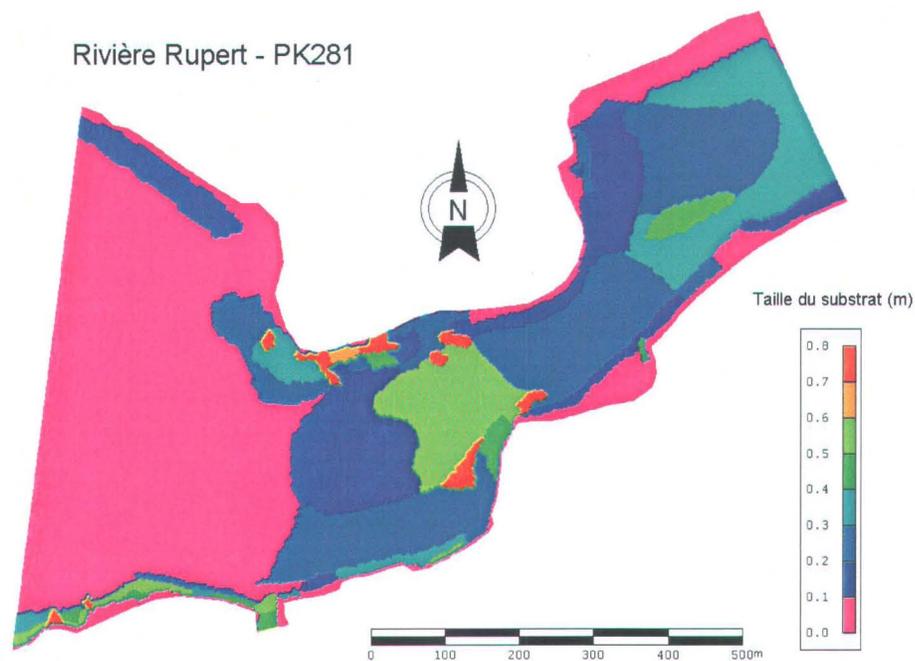


Figure 12 : Distribution des substrats au PK 281

Pour ce tronçon, le maillage hydrodynamique (figure 10) comporte 11 896 éléments à six nœuds T6L qui permettent de documenter 24277 nœuds lors des simulations hydrodynamiques. La

figure 11 montre la topographie fournie au modèle hydrodynamique tandis que la figure 12 montre la taille caractéristique des substrats.

### 3.4 Simulations hydrodynamiques

#### 3.4.1 Paramétrisation des deux tronçons à l'étude

À partir de l'expérience de ses nombreuses applications numériques de modélisation fluviale, l'INRS-ETE a développé, par ajustements successifs, une fonction de transfert empirique entre la taille caractéristique des substrats (MNS) et le coefficient de Manning  $n$  local. Cette approche permet d'assigner au modèle un champ ( $n$  est alors fonction de  $x,y$ ) paramétrique de frottement qui dépend du substrat local. La relation utilisée, implantée dans le logiciel MODELEUR, a prouvé sa validité à de nombreuses reprises et elle permet d'accélérer l'étape de calibration. Par contre, il est toujours possible d'ajuster manuellement les coefficients lorsque requis, notamment quand la mobilité du sédiment introduit des macro-rugosités (ex : dunes, anti-dunes, rides) qui majorent la valeur de la résistance à l'écoulement.

La formule permet d'obtenir le coefficient de frottement à partir de la taille caractéristique du substrat (ou des macro-rugosités lorsque disponibles). La méthode de calcul détermine d'abord la taille caractéristique  $d_m$  à partir des % de présence des composantes du substrat et de la taille médiane de ces classes. La formule suivante permet de convertir cette taille en  $n$  de Manning:

$$n = \frac{1}{34.9(-\log d_m)^{0.31} + 0.0017} \quad \text{[Équation 1]}$$

Où

$n$  est le coefficient de Manning

$d_m$  est le diamètre médian de l'assemblage.

$$\text{Si } d_m > 0,7 \text{ m, alors } n = 0,051$$

ce qui signifie que le paramètre de frottement se voit imposer une valeur plafond.

La paramétrisation du frottement a donc été réalisée avec la formule précédente (Équation 1), sans ajustement additionnel, les lignes d'eau simulées coïncidant bien avec les lignes d'eau mesurées (voir l'étape de validation plus loin). L'ensemble des conditions de simulation (terrain, paramétrisation) formant un tout logique et consistant, les modèles des deux tronçons à l'étude ont été jugés satisfaisants à cette étape, du moins pour les niveaux d'eau.

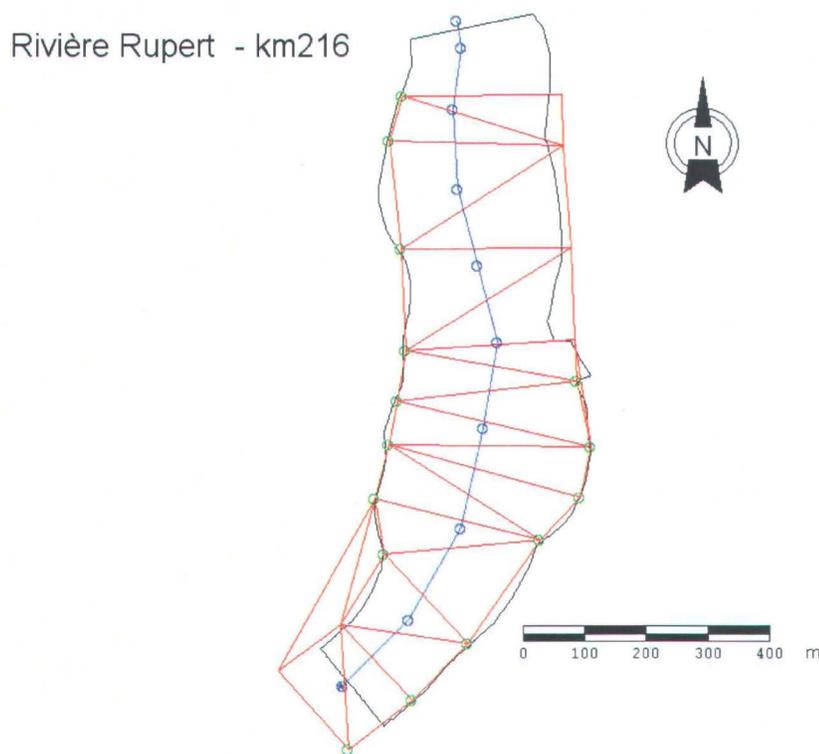
Dans ces circonstances, la phase de calibration se limitait à l'ajustement de la topographie sur une partie du domaine et ce, surtout pour le PK 281. Les deux modèles devaient malgré tout faire l'objet d'une étape de validation afin de vérifier leur bon comportement à d'autres débits. Les résultats de cette calibration et de la validation subséquente sont présentés aux sections suivantes.

### 3.4.2 Validation hydrodynamique – Tronçon PK 216

Nous présentons ci-après les comparaisons de résultats pour tous les événements hydrologiques documentés disponibles (calibration et validation). La première comparaison a trait aux lignes d'eau. Par la suite, les vitesses simulées sont confrontées avec les vitesses mesurées.

Les lignes d'eau ont été mesurées les 31 août 2002 et 4 novembre 2002 pour des débits de  $883 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $1142 \text{ m}^3/\text{s}$  respectivement. Une ligne d'eau supplémentaire a été mesurée le 19 mai 2003 pour un débit de  $1123 \text{ m}^3/\text{s}$ , donnée assimilable à celle du 4 novembre.

Afin de ramener les résultats du modèle et les mesures sur un profil longitudinal homogène, une procédure d'interpolation des niveaux mesurés a été appliquée. Elle permet de générer un champ continu de niveau d'eau mesuré qui alimente des points de contrôle de validation répartis longitudinalement dans le tronçon, normalement dans l'axe curviligne du thalweg (voir la figure 13).



**Figure 13 : Position du profil longitudinal pour la comparaison des niveaux d'eau (en bleu) – PK 216**

La figure 13 illustre aussi la procédure adoptée pour interpoler les mesures de niveau d'eau pour le débit de  $999 \text{ m}^3/\text{s}$  (en vert). Le maillage de représentation permet de générer une surface d'eau continue et interpolable à partir des mesures (en rouge).

La paramétrisation du modèle donne une ligne d'eau acceptable (figure 14). Outre l'incertitude liée aux mesures de niveaux d'eau, le fait d'interpoler au centre ces mesures effectuées en rive

masque évidemment les variations de niveau d'eau local dans la rivière. Compte tenu de ceci, les comparaisons de la figure 14 démontrent une bonne représentativité des niveaux d'eau par le modèle hydrodynamique.

La comparaison des vitesses simulées avec celles mesurées par GENIVAR à l'aide d'un courantomètre à effet Doppler sont dans l'ensemble acceptables (figure 15). On remarque toutefois un effet de lissage par le modèle qui tend à surestimer les vitesses vers la rive et à les sous-estimer dans le centre. Les valeurs médianes, celles ayant la plus grande importance sur le plan écologique sont par contre relativement justes. Il est à noter que les mesures sont de type local et instantané alors que les simulations correspondent à des valeurs moyennes dans la verticale et intégrées dans le temps afin d'éliminer les écarts momentanés liés à la turbulence. Pour permettre la comparaison, les valeurs mesurées sont donc intégrées dans la verticale afin de les rendre homogènes aux valeurs simulées. Par contre, les changements transitoires de direction (voir la direction des flèches à la figure 15) ne peuvent être corrigés autrement qu'en prolongeant la mesure dans le temps, période nécessaire pour amortir l'effet turbulent. Les contraintes logistiques (écoulement rapide avec des bulles d'air, durée de l'opération) n'ont pas permis de prolonger la mesure suffisamment.

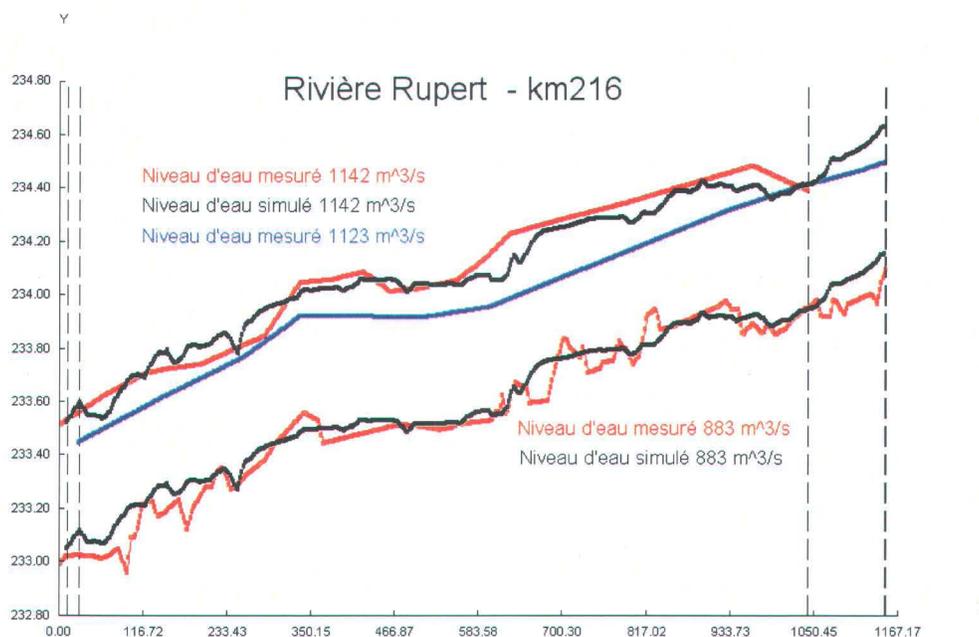


Figure 14 : Comparaison des niveaux d'eau mesurés et simulés avec HYDROSIM – PK 216

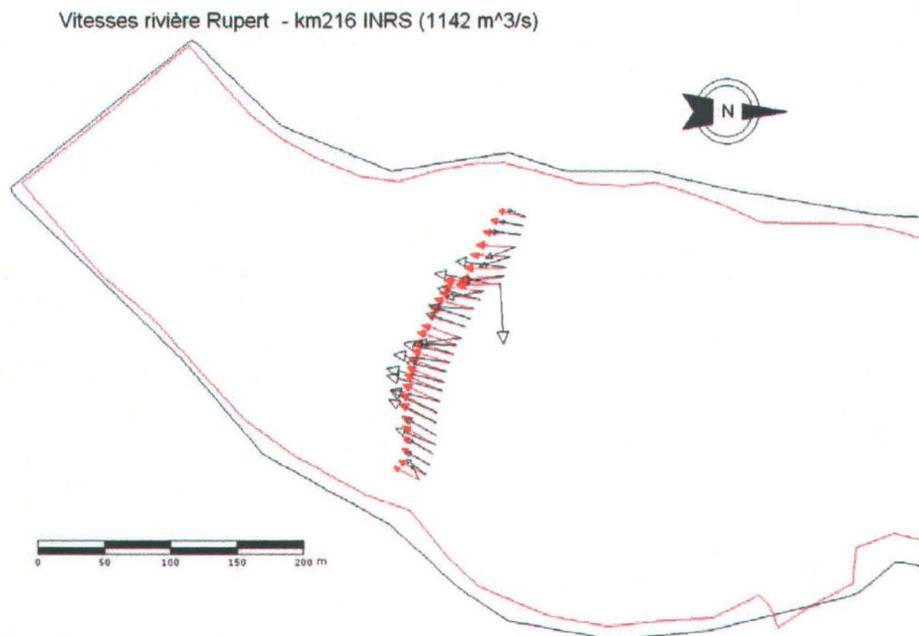


Figure 15 : Exemple de comparaison des vitesses mesurées au courantomètre Doppler acoustique (en noir) et simulées avec HYDROSIM (en rouge) – PK 216. Mesures par GENIVAR

### 3.4.3 Validation hydrodynamique – Tronçon PK 281

La procédure appliquée ici est semblable au tronçon précédent. La ligne d'eau a d'abord fait l'objet d'une vérification afin de confirmer les choix de paramétrisation et de mise à jour de la topographie. Par la suite, les vitesses simulées ont été confrontées avec les vitesses mesurées.

Les lignes d'eau ont été mesurées par GENIVAR le 28 août 2002 et le 5 novembre 2002 pour des débits de 783 m<sup>3</sup>/s et 999 m<sup>3</sup>/s respectivement. Une ligne d'eau supplémentaire a été mesurée le 23 mai 2003 pour un débit de 855 m<sup>3</sup>/s. Des surfaces curvilignes de niveau d'eau ont été générées à partir des valeurs mesurées afin d'effectuer une comparaison selon un profil longitudinal de la même façon que pour le tronçon PK 216 (figure 16).

Comme nous l'avons mentionné, les données topographiques du seuil ont été complétées en s'inspirant d'indices photographiques (aériens) et de quelques mesures isolées sur le terrain dans la zone sous-documentée. Elles ont été ajustées dans le MNT afin de recouper la ligne d'eau de 999 m<sup>3</sup>/s avec la simulation de calibration. La campagne du printemps 2003 a permis d'obtenir quelques points topographiques additionnels sur le seuil. Seuls des ajustements additionnels mineurs ont été nécessaires pour prendre en compte ces dernières car le MNT obtenu précédemment était compatible avec les nouvelles mesures.

Le coefficient de frottement de Manning généré par défaut par MODELEUR (Équation 1) donne une ligne d'eau valide pour la partie aval et pour le seuil comme tel. Des écarts apparaissent dans

la partie amont pour le débit de  $783 \text{ m}^3/\text{s}$ , mais une bonne concordance est observée pour le débit de  $999 \text{ m}^3/\text{s}$ . La distribution spatiale des données du 23 mai 2003 ne permettait pas de générer une ligne d'eau complète comme pour les autres états. Un tableau comparatif des niveaux d'eau simulés et mesurés est donc produit pour cet état (tableau 1).

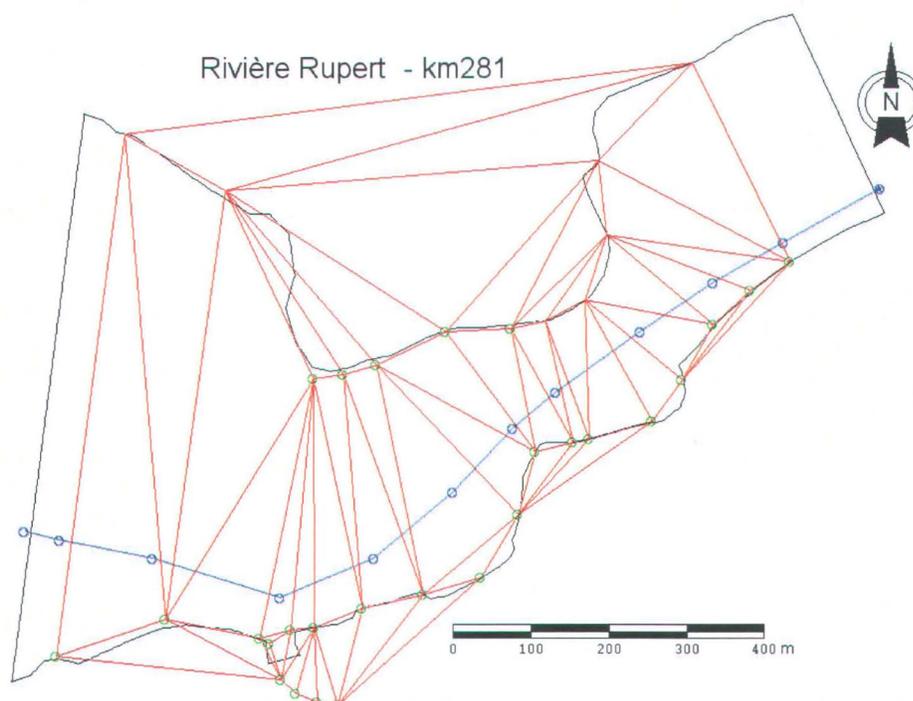


Figure 16 : Position du profil longitudinal pour la comparaison des niveaux d'eau (bleu) – PK 281

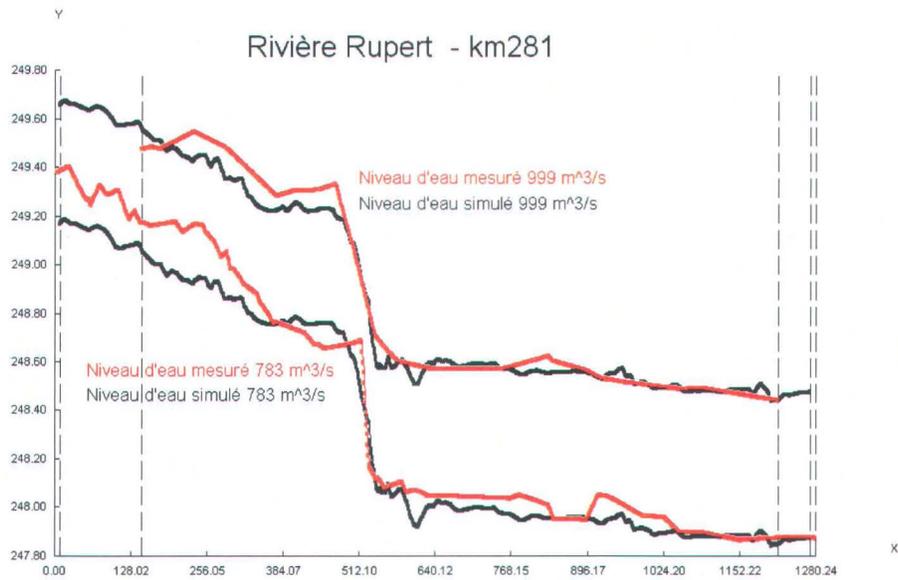


Figure 17 : Comparaison des niveaux d'eau mesurés et simulés avec HYDROSIM – PK 281

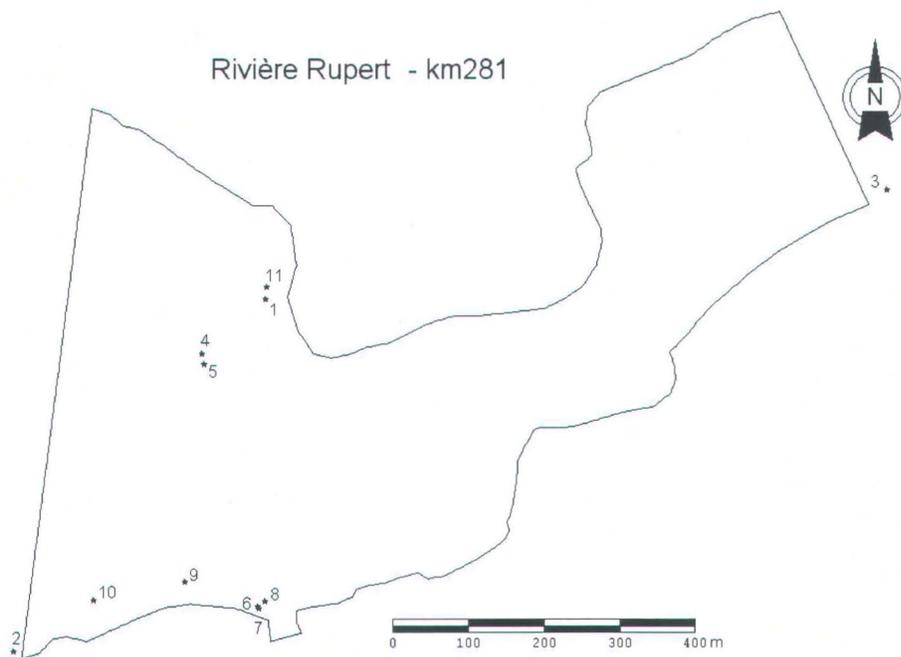


Figure 18 : Position des mesures de niveau d'eau du 23 mai 2003 (855 m<sup>3</sup>/s).

Tableau 1 : Comparaison des niveaux d'eau mesurés et simulés - Débit de 855 m<sup>3</sup>/s au PK 281

No	Niveau mesuré (m)	Niveau simulé (m)	Différence (cm)
1	248,15	248,14	1,0
2	248,21	248,14	7,2
3	249,66	249,50	16,2
4	248,16	248,13	2,1
5	248,20	248,13	7,1
6	248,32	248,23	8,9
7	248,32	248,23	8,6
8	248,33	248,22	11,0
9	248,19	248,14	4,1
10	248,16	248,12	4,4
11	248,19	248,14	5,0

Les vitesses mesurées et simulées sur 2 transects pour l'événement du 5 novembre 2002 (999 m<sup>3</sup>/s) sont dans l'ensemble comparables, avec les mêmes réserves, que pour le tronçon précédent. On note que pour le transect aval, en rive gauche, les vitesses simulées sont plus grandes que les vitesses mesurées. Par contre, sur l'autre transect, on observe le contraire. Les vitesses simulées en rive sont un peu plus faibles ici que celles mesurées. La qualité des mesures sur le transect du tributaire ne permet pas de tirer de conclusion sur la qualité de la simulation.

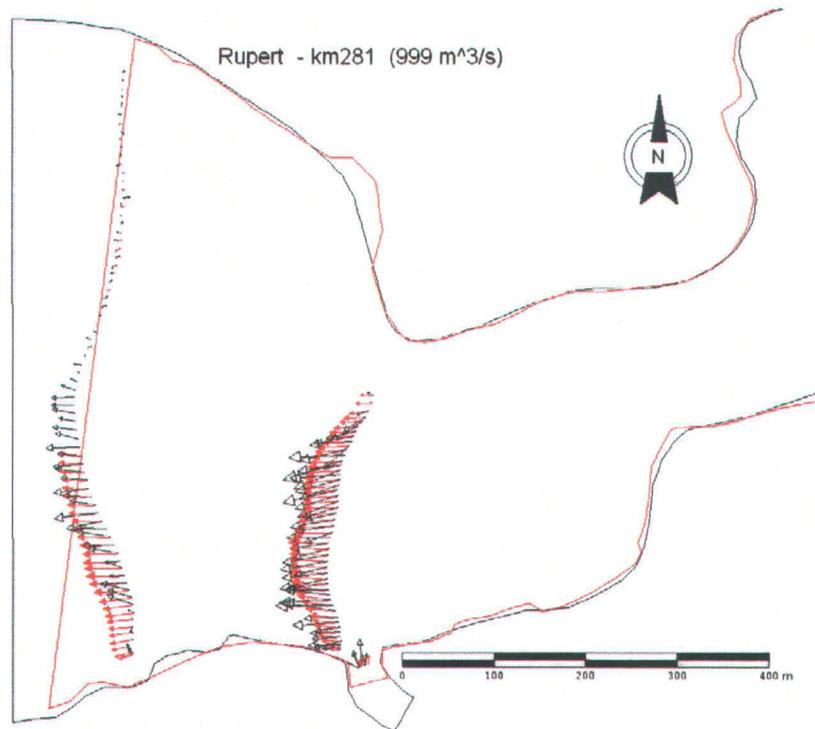


Figure 19 : Comparaison des vitesses mesurées au courantmètre Doppler acoustique (en noir) et simulées avec HYDROSIM (en rouge) – PK 281. Mesures par GENIVAR

### 3.4.4 Présentation des résultats hydrodynamiques pour un état typique

Dans le but d'illustrer et de commenter la distribution des écoulements sur les deux tronçons, les résultats de simulation pour un débit de 800 m<sup>3</sup>/s sont brièvement présentés ci-après.

Au PK 216, les simulations reproduisent un écoulement relativement rapide (type lotique) pratiquement sur l'ensemble du tronçon (figure 20). Les zones près des rives présentent des vitesses plus faibles. Les vitesses au centre sont normalement comprises entre 1 et 2 m/s avec des profondeurs entre 1 et 5 m. Quelques cellules de recirculation sont présentes là où le substrat est le plus fin dans les endroits plus abrités en rive (figure 21).

Le comportement hydrodynamique du PK 281 est plus contrasté. L'écoulement est moyennement rapide à l'amont du rapide soit autour de 1 m/s. Il accélère fortement sur le seuil pour atteindre des vitesses d'approximativement 3 m/s (figure 22). Il ralentit pour devenir très faible, inférieur à 1 m/s une fois entré dans le bassin qui domine l'écoulement en aval. Toute la partie droite du bassin présente des vitesses inférieures à 10 cm/s. Une cellule de recirculation est présente en rive gauche à l'amont du seuil (figure 23) et une autre est présente dans le bassin en rive droite.

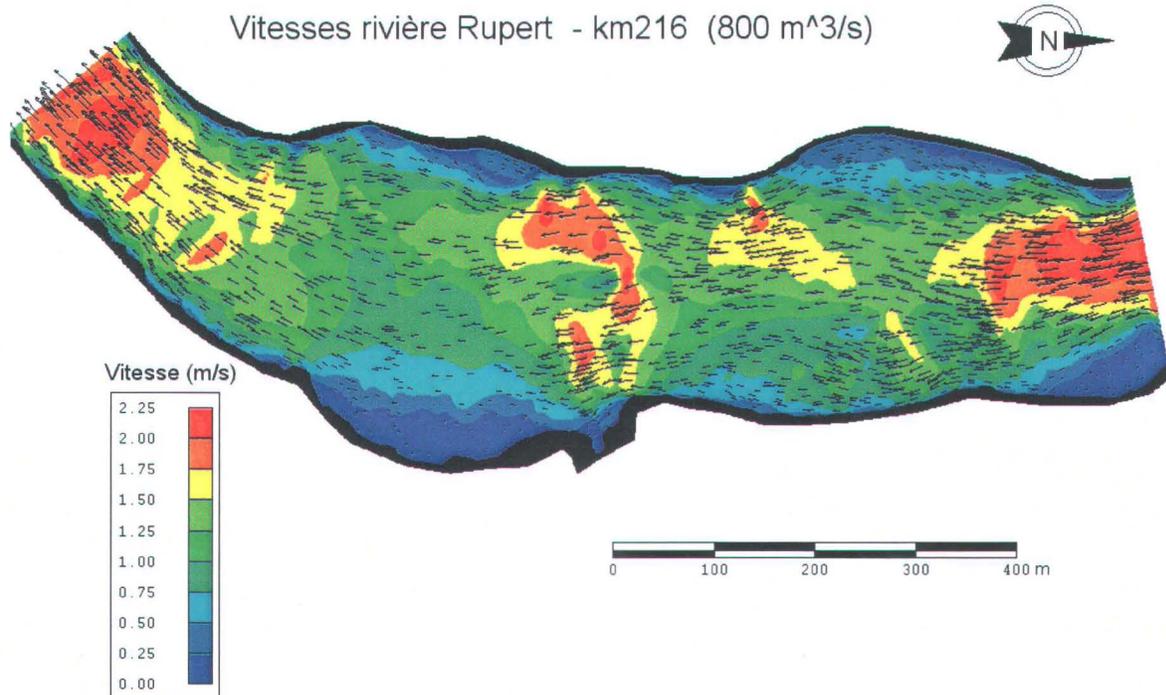


Figure 20 : Résultat de simulation des vitesses au PK 216 pour un débit de 800 m<sup>3</sup>/s

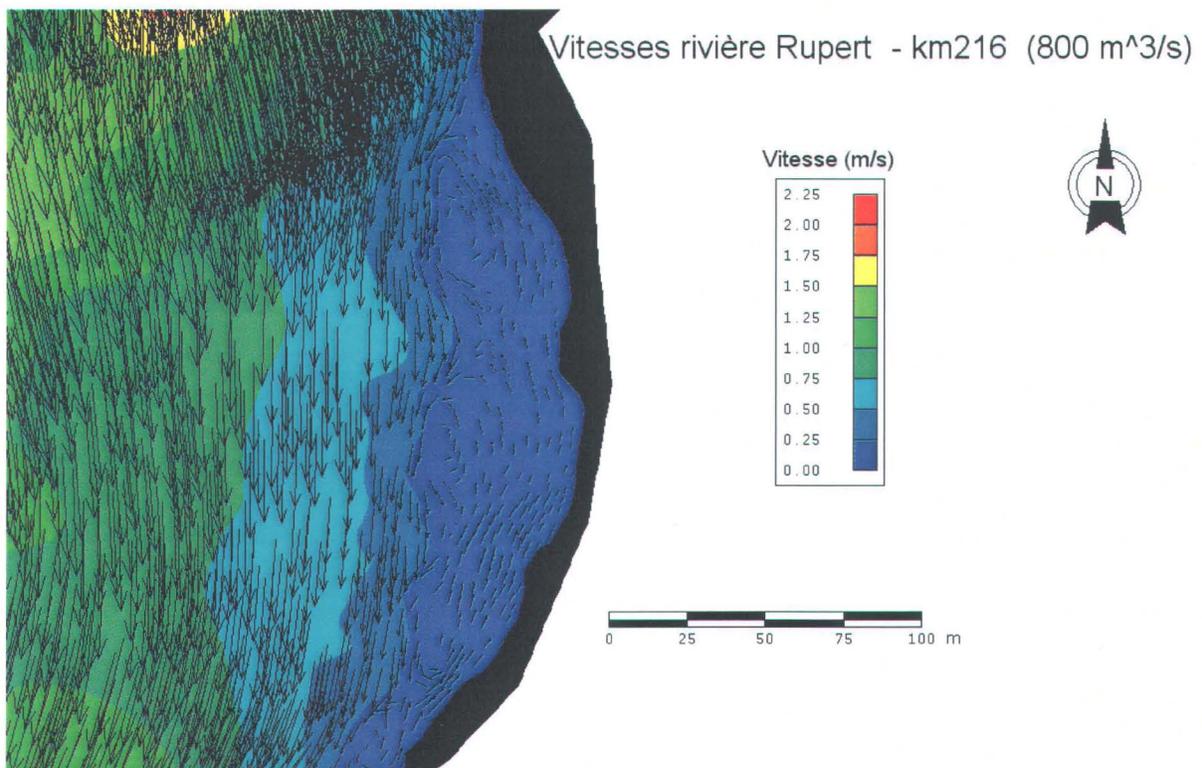


Figure 21 : Détail de simulation des vitesses au PK 216 pour un débit de 800 m<sup>3</sup>/s

Vitesses rivière Rupert - km281 (800 m<sup>3</sup>/s)

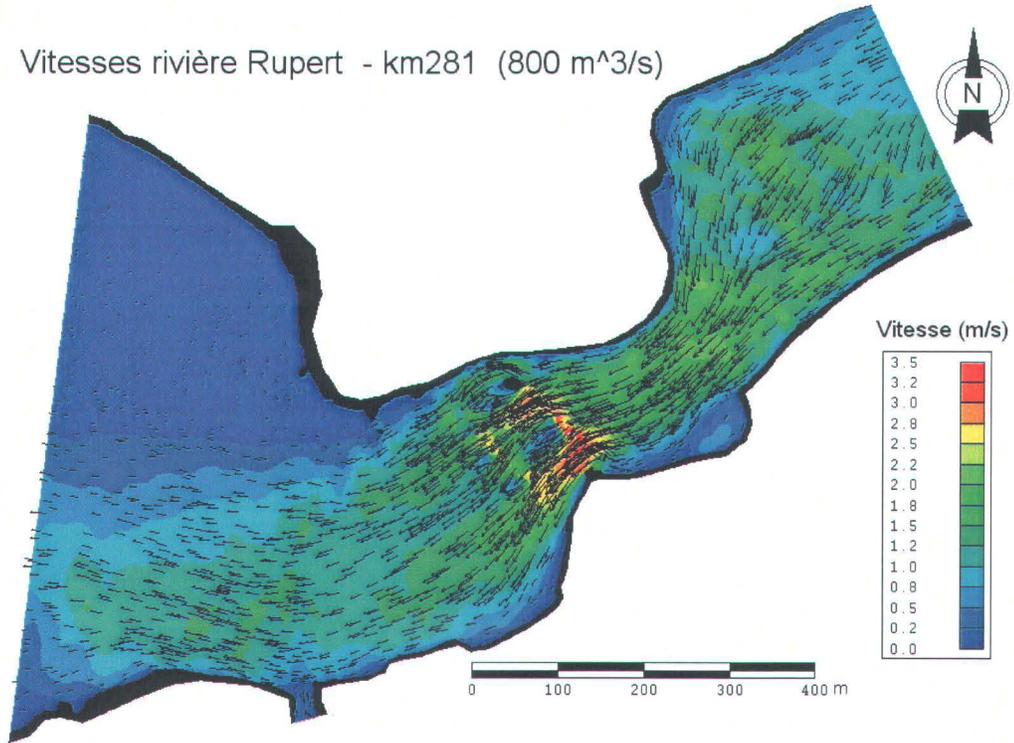


Figure 22 : Résultat de simulation des vitesses au PK 216 pour un débit de 800 m<sup>3</sup>/s

Vitesses rivière Rupert - km281 (800 m<sup>3</sup>/s)

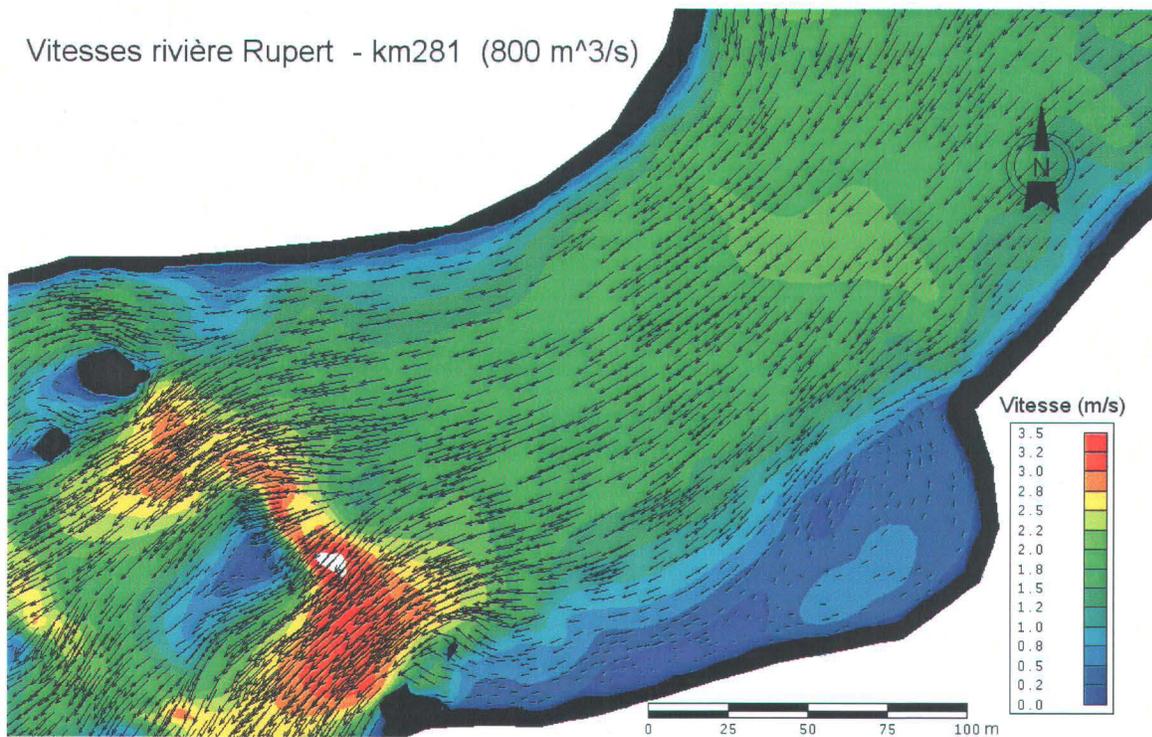


Figure 23 : Détail de simulation des vitesses au PK 281 pour un débit de 800 m<sup>3</sup>/s

### 3.4.5 Gamme de débits de référence pour les simulations hydrodynamiques

Pour les deux tronçons modélisés, la gamme de débit simulée est de 200 à 1200 m<sup>3</sup>/s par incréments de 100 m<sup>3</sup>/s. Comme nous le verrons plus loin, seuls ont été conservés pour les calculs d'habitats les résultats pour un débit supérieur à 300 m<sup>3</sup>/s. L'extension latérale du domaine de simulation a été déterminée de façon à pouvoir représenter les débits maximums de la gamme. La figure 24 montre les surfaces asséchées pour des débits de 200 et 1200 m<sup>3</sup>/s sur le tronçon PK 216 tandis que la figure 25 fait de même pour le PK 281. À certains endroits, pour le débit de 1200 m<sup>3</sup>/s, l'eau atteint la limite du modèle. Dans tous les cas, les profondeurs d'eau à ces endroits sont très faibles, de l'ordre de 20 cm. La limite réelle n'est donc pas très loin. Cela n'a donc pratiquement pas d'influence sur les résultats de la modélisation hydrodynamique ou d'habitat. À certains endroits, comme en rive gauche au centre du PK 216, les données topographiques du terrain ne permettaient pas d'explicitier les zones asséchées pour le débit de 1200 m<sup>3</sup>/s.

Vitesses rivière Rupert - km216 INRS - Découvrement (200 et 1200 m<sup>3</sup>/s)



Figure 24 : Extension du domaine mouillé et des surfaces asséchées au PK 216 pour des débits de 200 (gris) et 1200 m<sup>3</sup>/s (noir)

Rupert - km281 INRS - Découvrement (200 et 1200 m<sup>3</sup>/s)

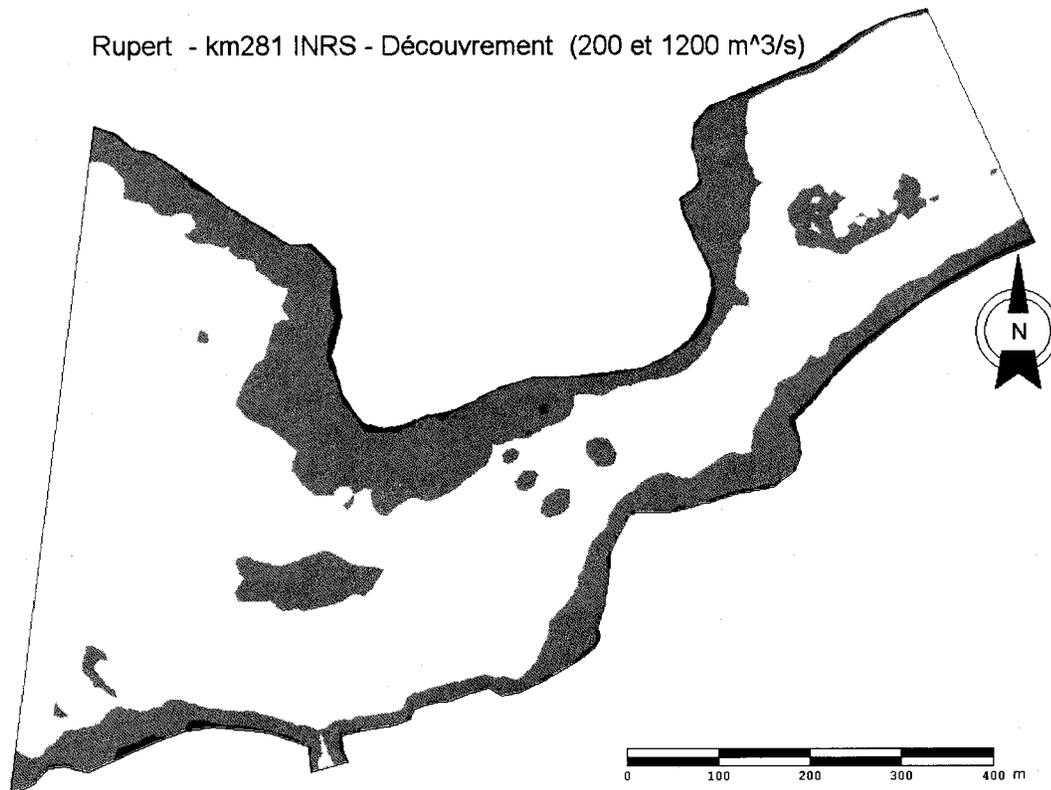


Figure 25 : Extension du domaine mouillé et des surfaces asséchées au PK 281 pour des débits de 200 et 1200 m<sup>3</sup>/s

---

## 4. Comparaison hydrodynamique HYDROSIM – TELEMAC 2D

---

Comme cela a été mentionné précédemment, les calculs de simulation présentés dans ce rapport ont été effectués indépendamment et en parallèle à ceux réalisés par GENIVAR avec TELEMAC-2D d'Électricité de France (voir GENIVAR, 2004). Le but de cet exercice est de comparer les résultats issus de l'utilisation d'outils de simulation alternatifs, apparemment équivalents, et en bout de ligne, de mesurer les conséquences sur les recommandations de débits réservés écologiques pour la protection des habitats de reproduction du poisson dans la Rupert. Les sections suivantes décrivent d'abord les particularités des outils de simulation employés, puis comparent les résultats obtenus au sites des PK 216 et 281.

### 4.1 Particularités des outils de simulation

Bien que les logiciels HYDROSIM de l'INRS-ETE et TELEMAC-2D permettent la résolution par éléments finis des mêmes équations, celles de Saint-Venant intégrées dans la verticale (2D horizontal), les deux outils se distinguent à maints égards sur le plan numérique: méthode de résolution algébrique utilisée, algorithme de découverture/recouvrement par l'écoulement, représentation de la turbulence et de la résistance à l'écoulement, type d'approximation par éléments finis, méthode d'intégration spatiale (ex : pour les aires pondérées utiles), etc.. De plus, le nombre d'options offertes par les outils peut varier ainsi que les contextes d'utilisation possibles. Pour la théorie sous-jacente à TELEMAC-2D, le lecteur est renvoyé aux « Notes de principe » de cet outil (Électricité de France, 2001). Les items mentionnés, et la liste n'est pas exhaustive, sont bien sûr susceptibles de générer certaines différences observables au niveau des résultats. Nous n'avons cependant pas l'intention de comparer les outils sur le plan théorique, un exercice peu pertinent dans le présent contexte, d'autant plus que les fonctionnalités employées ne couvrent qu'une partie de celles offertes.

En plus des méthodes numériques utilisées, la prise en compte des données de terrain dans le modèle numérique de terrain (MNT), la taille du maillage et la distribution des mailles, ainsi que les choix de paramétrisation sont aussi des facteurs pouvant conduire à des différences de résultats. Enfin, l'expérience des opérateurs dans ce type d'étude et la qualité de la démarche appliquée représentent des facteurs non négligeables pouvant conduire à des résultats sensiblement différents. Afin de mieux apprécier l'exercice conduit par GENIVAR (2004), le lecteur est renvoyé au rapport sectoriel de cette firme.

Pour le présent exercice de comparaison, GENIVAR a mis à notre disposition quelques exemples de résultats hydrodynamiques qui vont servir ci-après à comparer globalement les résultats. Nous nous limiterons à présenter certains résultats représentatifs des deux outils, et ce pour les deux tronçons à l'étude. Lorsque des différences sont observées entre les résultats des deux exercices, nous en prenons acte avec quelques commentaires et certaines hypothèses seront parfois proposées pour en expliquer l'origine.

## 4.2 Comparaison des résultats - Tronçon PK 216

Tel que mentionné précédemment, le maillage HYDROSIM de l'INRS-ETE du tronçon PK 216 comporte 11 423 éléments T6L et 23 388 nœuds. Il a été confectionné avec MODELEUR. Un élément T6L comprend 4 sous-éléments T3 (donc  $4 \times 11\,423 = 45\,692$  T3) et six nœuds de calcul. L'approximation est linéaire sur chacun des 4 T3 pour la vitesse et linéaire sur les sommets du T6L pour la topographie et le niveau d'eau. La superficie couverte par le maillage est de  $287\,392\text{ m}^2$ . Un nœud couvre en moyenne  $12\text{ m}^2$ . La taille des éléments varie entre 5 et 10 m de côté à l'échelle du T6L et cet élément couvre en moyenne  $25\text{ m}^2$ . À l'échelle du sous-élément T3, la couverture moyenne est de  $6\text{ m}^2$ .

Le maillage TELEMAC-2D de GENIVAR comprend 15504 éléments T3 et 7 986 nœuds pour une superficie de  $320\,678\text{ m}^2$ . Un nœud couvre en moyenne  $40\text{ m}^2$  et un élément couvre en moyenne  $21\text{ m}^2$ . Même si les éléments ne sont pas les mêmes, les maillages ont des répartitions d'éléments (densités) semblables qui tiennent compte des besoins de simulation, notamment dans les zones de frayères connues.

En résumé, le maillage INRS présente une couverture plus raffinée pour les vitesses que celui de GENIVAR, mais la représentation topographique de l'INRS-ETE étant portée aux sommets des T6L seulement, la couverture topographique demeure inférieure à celle de GENIVAR. Toutefois, la densité des données de terrain étant nettement inférieure à celle des maillages utilisés, le résultat topographique est sensiblement le même. À la précision des niveaux près, et en fonction des approximations effectuées pour compléter la couverture topographique obtenue sur le terrain, il n'est donc pas surprenant que les profondeurs simulées par les deux modèles soient visuellement très semblables (Comparer la figure 26 à la figure 27).

Les vitesses correspondant au débit de  $600\text{ m}^3/\text{s}$  ont pareillement fait l'objet d'une comparaison visuelle. Dans l'ensemble, on retrouve le même schéma d'écoulement. Des différences locales subsistent cependant. Les vitesses provenant de TELEMAC-2D tendent à être plus élevées dans le thalweg et plus faibles sur les côtés que les résultats provenant de l'INRS. L'existence de ces différences est difficile à expliquer. Elles sont possiblement liées à la paramétrisation, à la formulation mathématique et au traitement de la turbulence. Certaines différences sont plus marquées près des frontières ouvertes amont (15-20%) et aval (10%). Il est bien connu cependant que la précision des résultats n'est pas aussi bonne près des frontières d'imposition des conditions aux limites, surtout si le découpage du modèle est effectué dans une zone assez « rapidement variée » là où l'on peut retrouver un ressaut ondulé (ex : pied d'un rapide). Le traitement numérique du processus de découpage, la formulation mathématique des termes de contour (forme faible du modèle variationnel) et la cohérence des conditions aux limites imposées sont aussi des facteurs pouvant expliquer les différences observées.

Profondeur rivière Rupert - km216 INRS (600 m<sup>3</sup>/s)

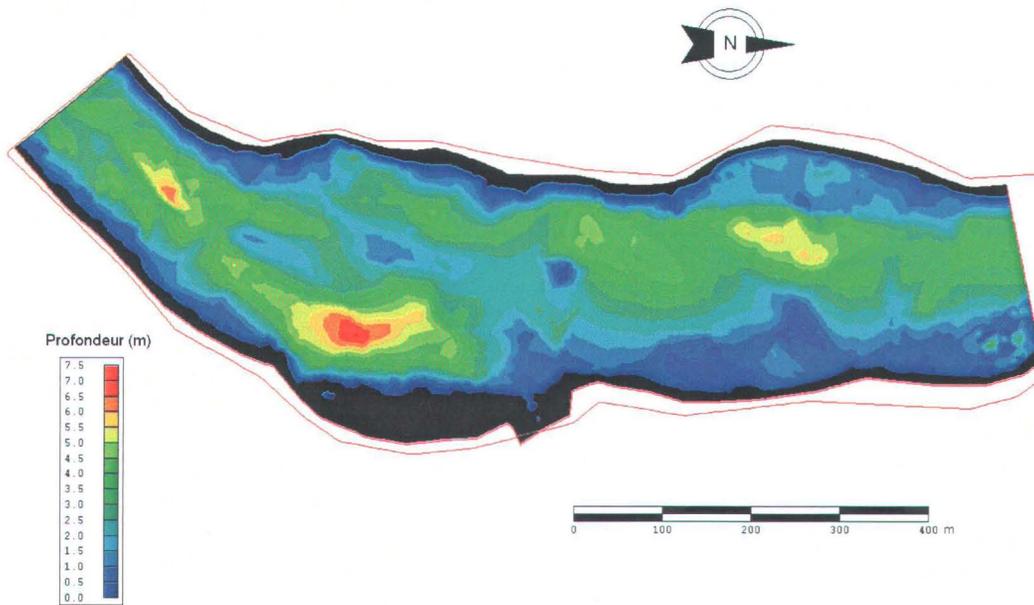


Figure 26 : Profondeur simulée à 600 m<sup>3</sup>/s d'après le modèle HYDROSIM – PK 216.  
Le trait rouge représente la limite du modèle GENIVAR

Profondeur rivière Rupert - km216 GENIVAR (600 m<sup>3</sup>/s)

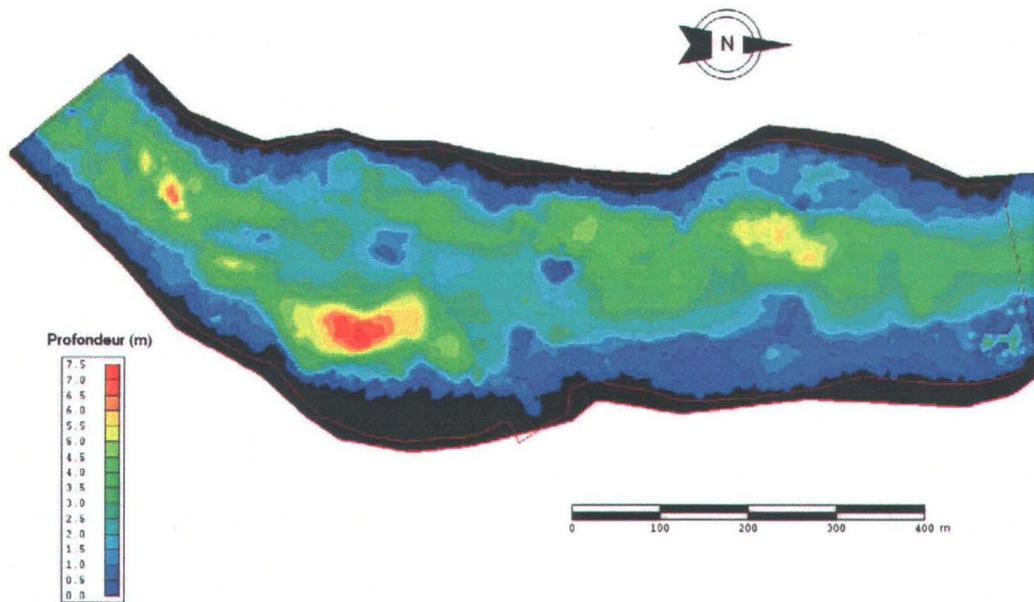


Figure 27 : Profondeur à 600 m<sup>3</sup>/s d'après le modèle GENIVAR (TELEMAR 2D) – PK 216  
Le trait rouge représente la limite du modèle INRS-ETE.

Vitesses rivière Rupert - km216 INRS (600 m<sup>3</sup>/s)

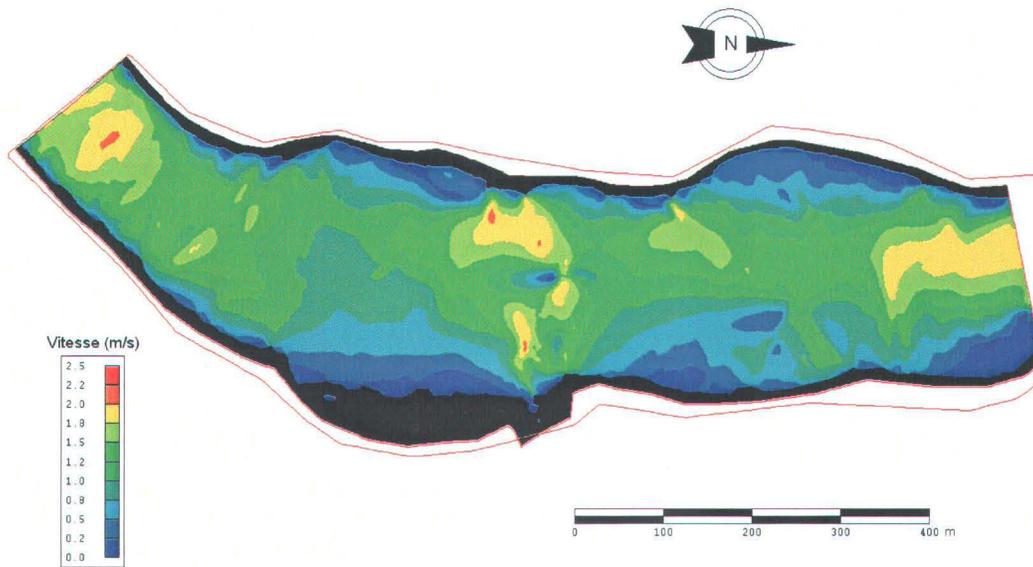


Figure 28 : Vitesses simulées au débit de 600 m<sup>3</sup>/s avec HYDROSIM (INRS-ETE) – PK 216

Vitesses rivière Rupert - km216 GENIVAR (600 m<sup>3</sup>/s)

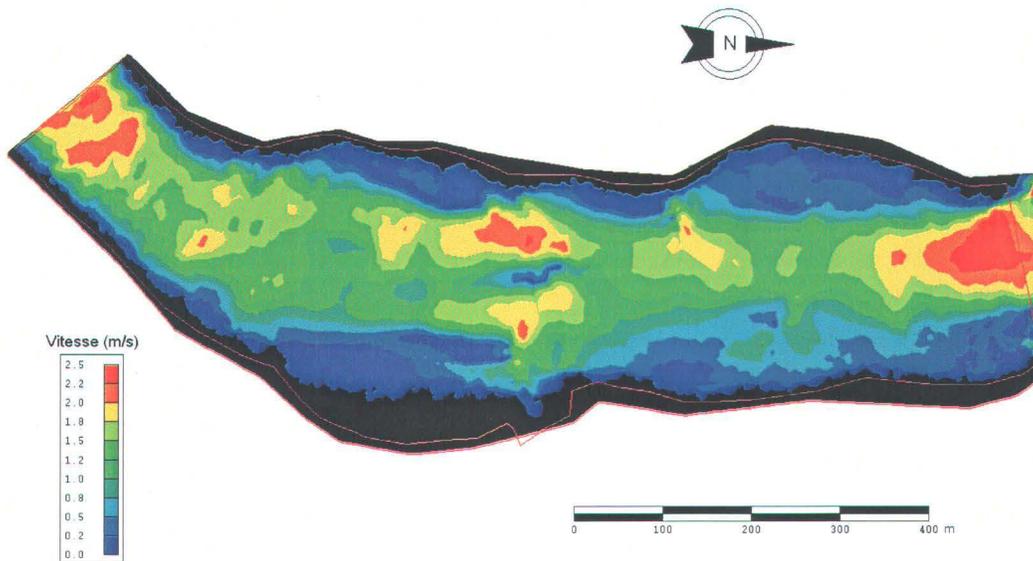


Figure 29 : Vitesses simulées à 600 m<sup>3</sup>/s avec TELEMAC (GENIVAR) – PK 216

### 4.3 Comparaison des résultats - Tronçon PK 281

Le maillage HYDROSIM de l'INRS-ETE (PK 281) est formé de 11 896 éléments T6L et 24 277 nœuds. La superficie couverte par le maillage est de 421 567 m<sup>2</sup>. Un nœud couvre en moyenne 17 m<sup>2</sup>. La taille des éléments varie entre 4 et 10 m de côté. Un élément couvre en moyenne 35 m<sup>2</sup> (8,75 m<sup>2</sup> à l'échelle du sous-élément T3). Le maillage TELEMAC de GENIVAR est constitué de 16 311 éléments T3 et 8 426 nœuds pour une superficie sensiblement supérieure de 495 612 m<sup>2</sup>, la différence étant constituée par un milieu lentique situé à l'aval du domaine. Un nœud couvre en moyenne 59 m<sup>2</sup> et un élément, 30 m<sup>2</sup>. Les mêmes remarques que pour le PK 216 s'appliquent ici. Dans la partie médiane du tronçon (seuil), les différences topographiques entre les deux modèles sont observables sur la carte des profondeurs au débit de 600 m<sup>3</sup>/s (comparer la figure 30 et la figure 31). L'INRS-ETE a interprété différemment la présence visible d'affleurements sur les photographies aériennes disponibles. Les écarts sont cependant limités à une faible superficie et ne semblent pas porter à conséquence sur les résultats globaux, notamment sur l'orientation générale des écoulements en sortie de rapide. La différence apparente de topographie à la limite aval est due à l'extension des modèles qui est plus étendue pour TELEMAC. De plus, l'angle de la frontière par rapport à l'écoulement n'est pas le même.

Les vitesses simulées ont fait l'objet d'une comparaison visuelle plus poussée que le tronçon PK 216 en considérant en plus du débit de 600 m<sup>3</sup>/s (figure 34 vs figure 35), les valeurs de 300 (figure 32 vs figure 33) et 900 m<sup>3</sup>/s (figure 36 vs figure 37). Dans l'ensemble, on retrouve les mêmes schémas d'écoulement pour toute la gamme de débit. Des différences locales sont cependant notables, particulièrement sur le seuil au centre du domaine. Elles peuvent être expliquées par le fait que les données manquantes à cet endroit n'ont pas été comblées identiquement. Le maillage également diffère, notamment par sa densité et son extension près de la frontière aval. De façon générale, on remarque comme pour le PK 216 que l'écoulement simulé avec TELEMAC semble plus concentré dans le thalweg qu'avec HYDROSIM, ce qui sous-tend un schéma numérique différent près de la frontière (algorithme couvrant-découvrant, condition d'adhérence). Enfin, les remarques formulées pour le PK 216 concernant l'adéquation des résultats aux frontières ouvertes sont applicables ici aussi.

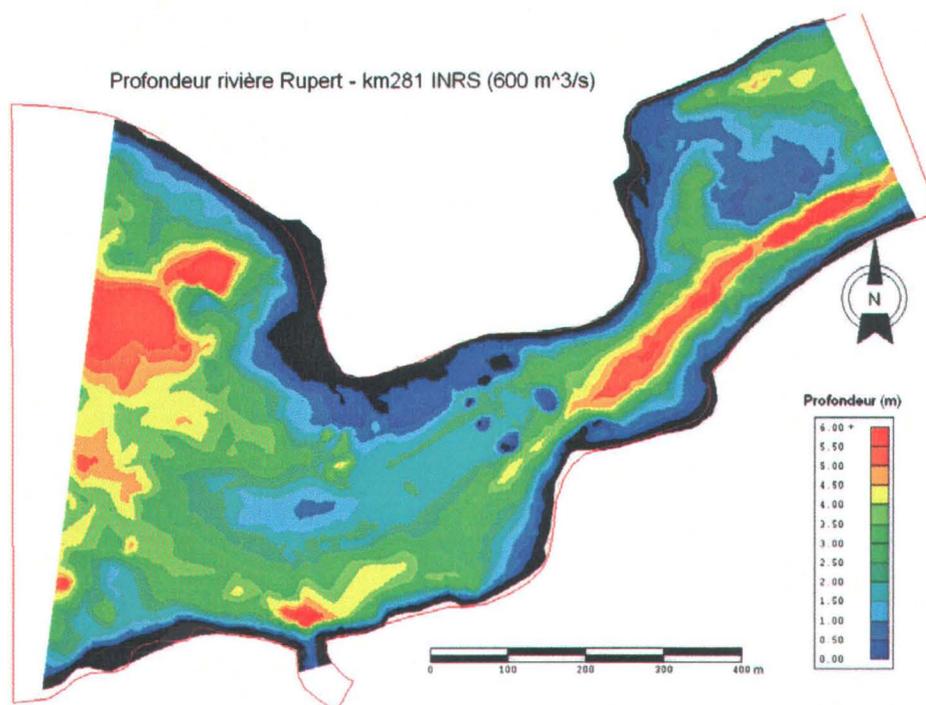


Figure 30 : Profondeur simulée à 600 m<sup>3</sup>/s d'après le modèle HYDROSIM – PK 281.  
Le trait rouge représente la limite du modèle GENIVAR

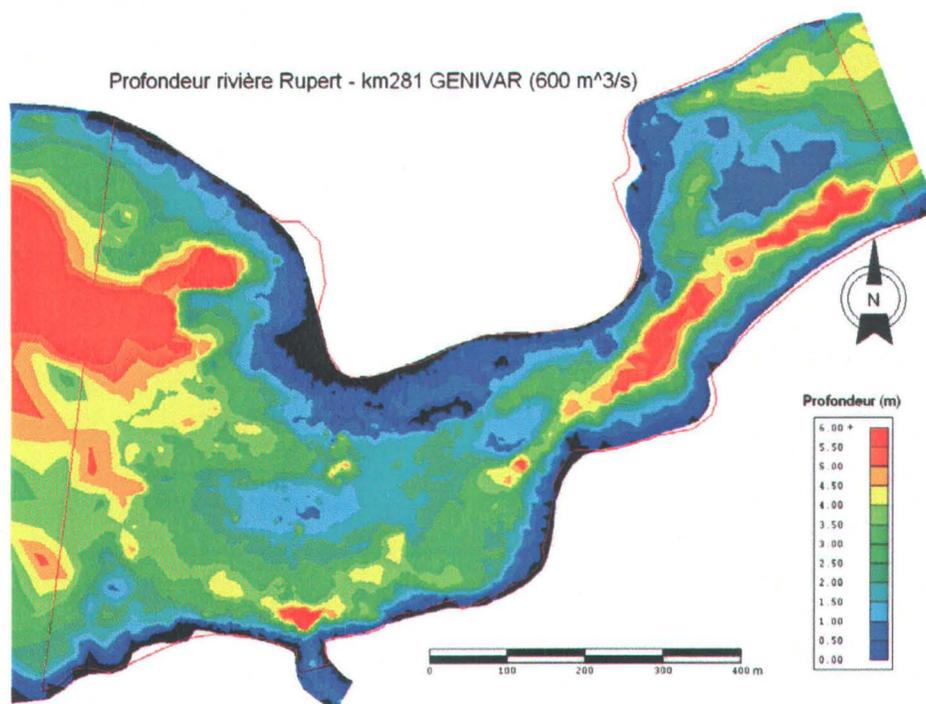


Figure 31 : Profondeur simulée à 600 m<sup>3</sup>/s d'après le modèle TELEMAR – PK 281.  
Le trait rouge représente la limite du modèle HYDROSIM (Source GENIVAR)

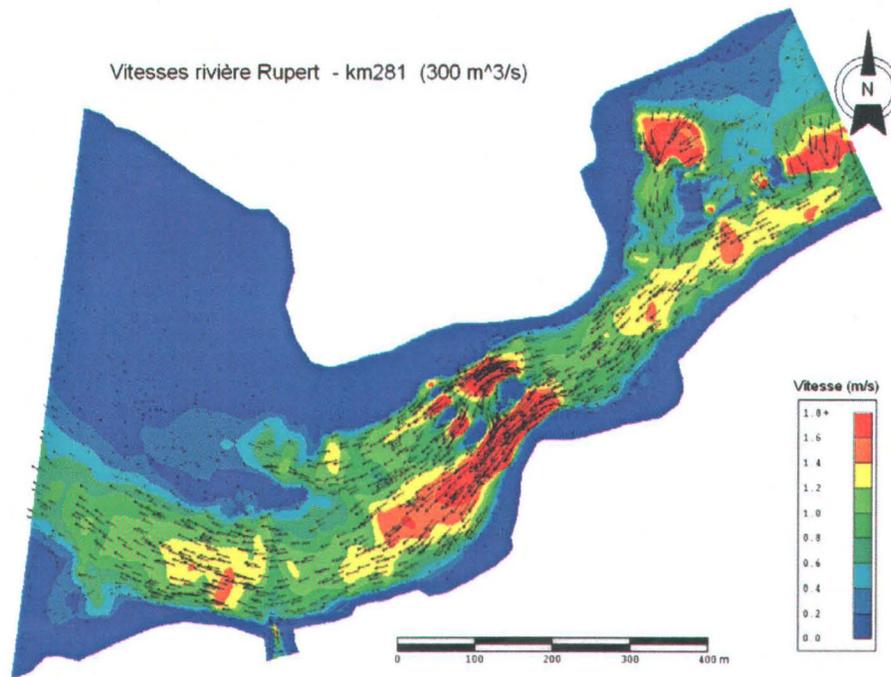


Figure 32 : Vitesses (norme et direction) d'après HYDROSIM à 300 m<sup>3</sup>/s – PK 281

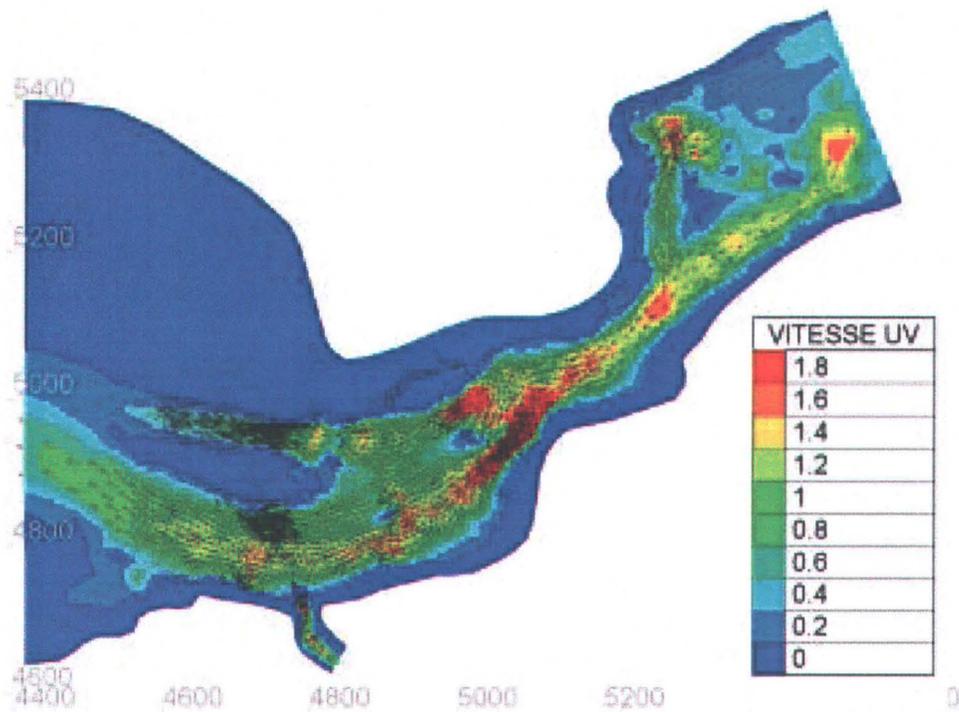


Figure 33 : Vitesses (norme et direction) d'après TELEMAT à 300 m<sup>3</sup>/s – PK 281

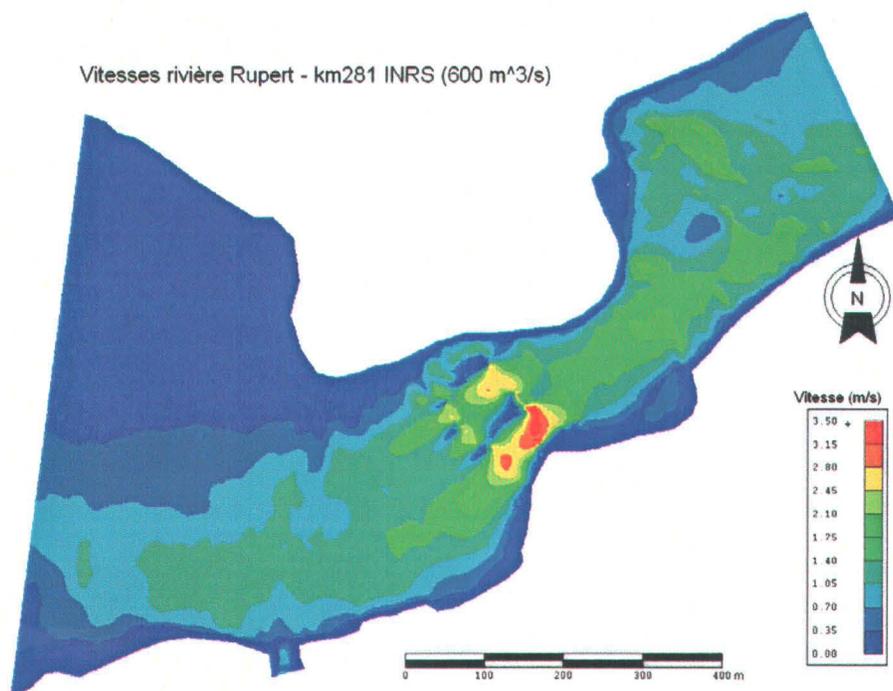


Figure 34 : Vitesses (norme) simulées avec HYDROSIM à 600 m<sup>3</sup>/s – PK 281

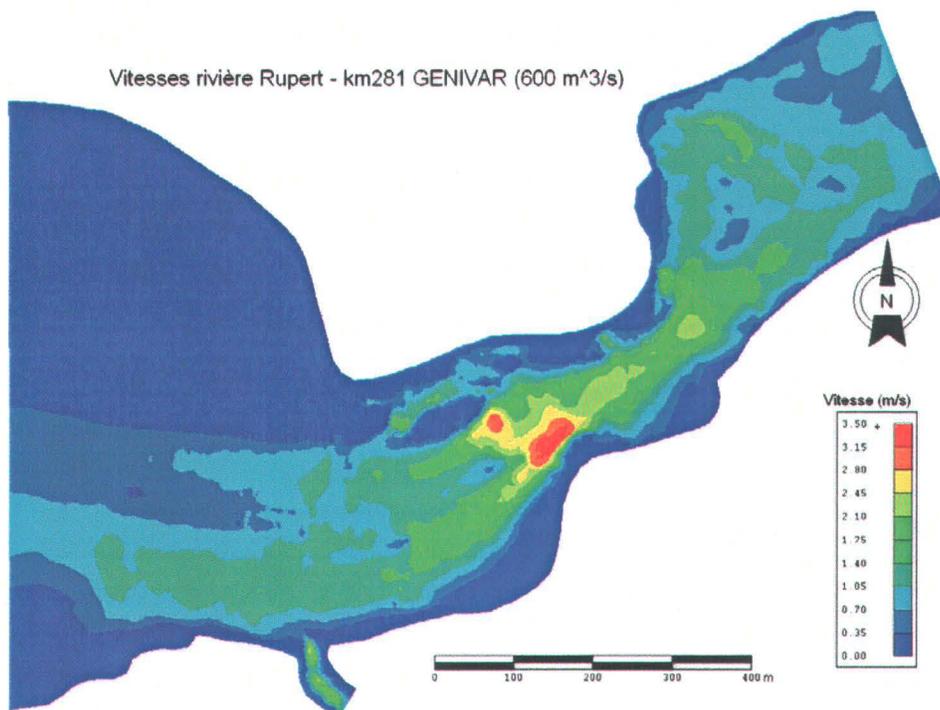


Figure 35 : Vitesses (norme) simulées avec TELEMAR à 600 m<sup>3</sup>/s – PK 281

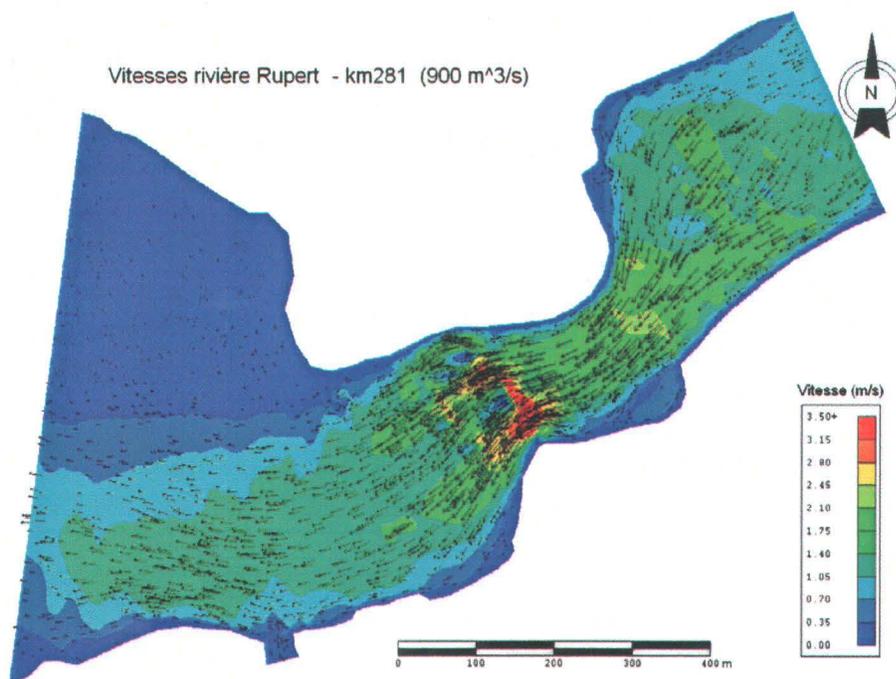


Figure 36 : Vitesses (norme et direction) simulées avec HYDROSIM à 900 m<sup>3</sup>/s – PK 281  
 Pour alléger la figure, les vecteurs sont représentés pour un nœud sur trois

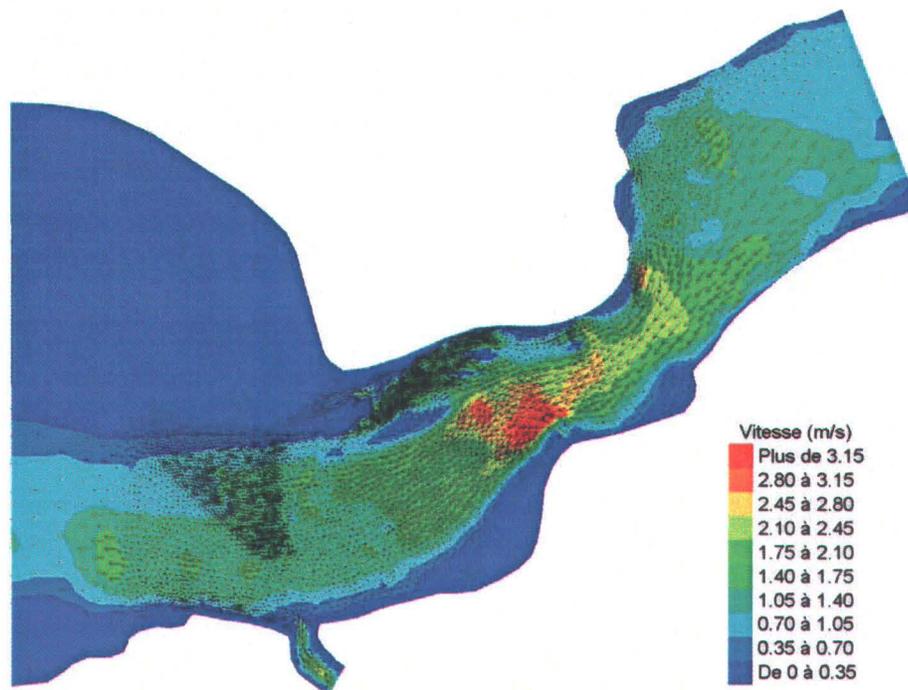


Figure 37 : Vitesses (norme et direction) simulées avec TELEMAC à 900 m<sup>3</sup>/s – PK 281

## 5. Résultats de la modélisation des microhabitats

---

### 5.1 Revue des modèles d'habitat préférentiels utilisés

Les modèles d'habitat retenus dans cette études portent sur la reproduction du grand corégone une « guildes printanière » d'espèces similaires (le doré jaune et les meuniers) et l'esturgeon jaune. Ces modèles ont été fournis par GENIVAR et indirectement par Environnement Illimité pour l'esturgeon jaune. L'INRS-ETE en a fait l'application aux résultats hydrodynamiques obtenus avec HYDROSIM.

L'interprétation des courbes de disponibilité d'habitat en fonction du débit ne faisait pas partie du mandat de l'INRS-ETE, de sorte que ce rapport ne formule aucun commentaire sur ces modèles ni aucune recommandation à l'égard du régime de débit réservé écologique. Le lecteur est invité à consulter le rapport de GENIVAR (2004) pour les aspects de l'étude visant le choix des modèles préférentiels et les recommandations. Les modèles d'habitat préférentiel sont présentés ici pour des fins de compréhension. Les sections qui suivent présentent les modèles retenus pour les différentes espèces.

### 5.2 Modèle du grand corégone

#### 5.2.1 Indices de base univariés

Le modèle appliqué au microhabitat de reproduction du grand corégone est du type *indice de qualité d'habitat (IQH)*. Pour la fonction reproduction, il est basé sur l'histogramme normalisé des observations de présence d'œufs en fonction de la variable considérée. Il se compose de trois indices univariés d'habitat, représentés sous forme de courbe d'utilisation. Les variables d'habitat sont la vitesse moyenne de l'écoulement, la profondeur et le type de substrat.

**Indice de vitesse.** L'indice de base pour la vitesse ( $I_{vit}$ ) est représenté à la figure 38 et les équations correspondantes sont données ci-après. Selon ce modèle, les valeurs d'habitat les plus élevées ( $> 0,7$ ) sont assignées pour la gamme de vitesses comprises entre 0,1 et 0,35 m/s avec un optimum à 0,22 m/s. La valeur d'habitat chute graduellement à partir de 0,35 m/s pour atteindre un palier de 0,13 à 0,6 m/s, puis elle devient nulle pour des vitesses supérieures à 1,5 m/s. Les paramètres mathématiques des courbes d'utilisation sont donnés ci-après :

Si vitesse ( $V$ ) < 0,05 m/s,  $I_{vit} = 0$

Si  $0,05 \text{ m/s} < V < 0,6 \text{ m/s}$ ,

$$I_{vit} = 10,852 \times V^5 - 47,736 \times V^4 + 76,128 \times V^3 - 52,119 \times V^2 + 13,116 \times V - 0,0745 \quad [\text{Équation 2}]$$

Si  $0,6 \text{ m/s} < V < 1,4$ ,  $I_{vit} = 0,13 \text{ m/s}$

Si  $V > 1,5 \text{ m/s}$ ,  $I_{vit} = 0$

**Indice de profondeur.** Des valeurs d'indice optimums ( $I_{prof} > 0.7$ ) sont assignées pour les profondeurs comprises entre 0,55 et 1,9 m avec un optimum autour de 1,1 m (figure 39 et équations suivantes). L'optimum se trouve compris entre 0,75 et 2,0 m. Les paramètres mathématiques des courbes de préférence sont donnés ci-après :

Si profondeur ( $H$ ) < 0,25m,  $I_{prof} = 0$

Si  $0,2 \text{ m} < H < 3,2 \text{ m}$ ,

$$I_{prof} = 0,0044 \times H^5 - 0,0966 \times H^4 + 0,7649 \times H^3 - 2,6249 \times H^2 + 3,4386 \times H - 0,4809 \quad [\text{Équation 3}]$$

Si  $3,2 \text{ m} < H < 6 \text{ m}$ ,  $I_{prof} = 0,05$

Si  $H > 6,0 \text{ m}$ ,  $I_{prof} = 0$

**Indice de substrat.** En ce qui concerne le substrat, des valeurs élevées ( $> 0.7$ ) sont observées pour les diamètres compris entre 5 et 23 cm avec un optimum autour de 12 cm (figure 40 et équations suivantes). La forme mathématique est la suivante :

Si diamètre ( $S$ ) < 0,5 cm,  $I_{subs} = 0$

Si  $0,5 \text{ cm} < S < 0,7 \text{ m}$ ,

$$I_{subs} = 2,049 \times 10^{-8} S^5 - 4,53 \times 10^{-6} S^4 + 3,75281 \times 10^{-4} S^3 - 0,014 \times S^2 + 0,2033 \times S + 0,0119 \quad [\text{Équation 4}]$$

Si  $S > 0,7 \text{ m}$ ,  $I_{subs} = 0$

### 5.2.2 Indice global pour le grand corégone

L'indice global ( $IQH$ ) est la pondération utilisée pour calculer la disponibilité d'habitats (les aires pondérées utiles). Elle s'obtient par la moyenne géométrique des indices de base ( $I_{prof}$ ,  $I_{vit}$  et  $I_{subs}$ ) que nous venons d'introduire. La valeur des indices de base est cadrée entre 0 et 1. L'indice global  $IQH$  est donné par :

$$IQH = I_{prof}^{0,13} \times I_{vit}^{0,5} \times I_{subs}^{0,37} \quad [\text{Équation 5}]$$

Les coefficients de pondération (les exposants) ont été obtenus statistiquement en fonction de la variance expliquée (voir GENIVAR 2004).

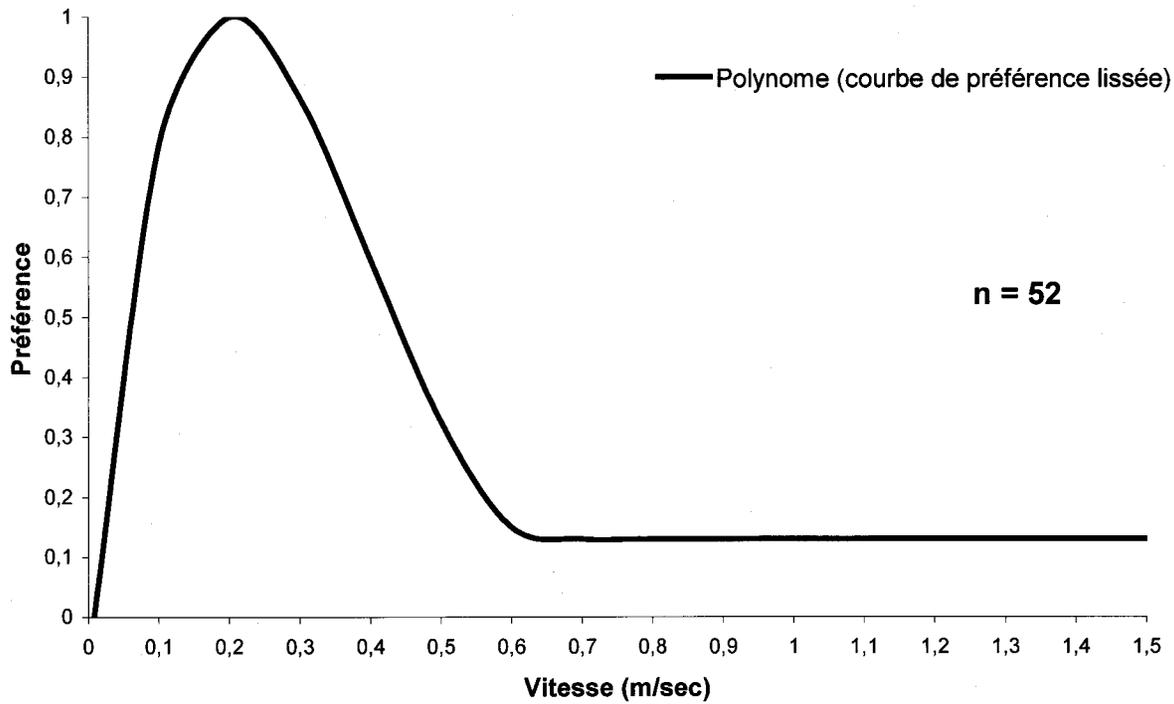


Figure 38 : Modèle d'habitat de reproduction ( $I_{vit}$ ) pour le grand corégone – Variable vitesse (Source GENIVAR, 2004).

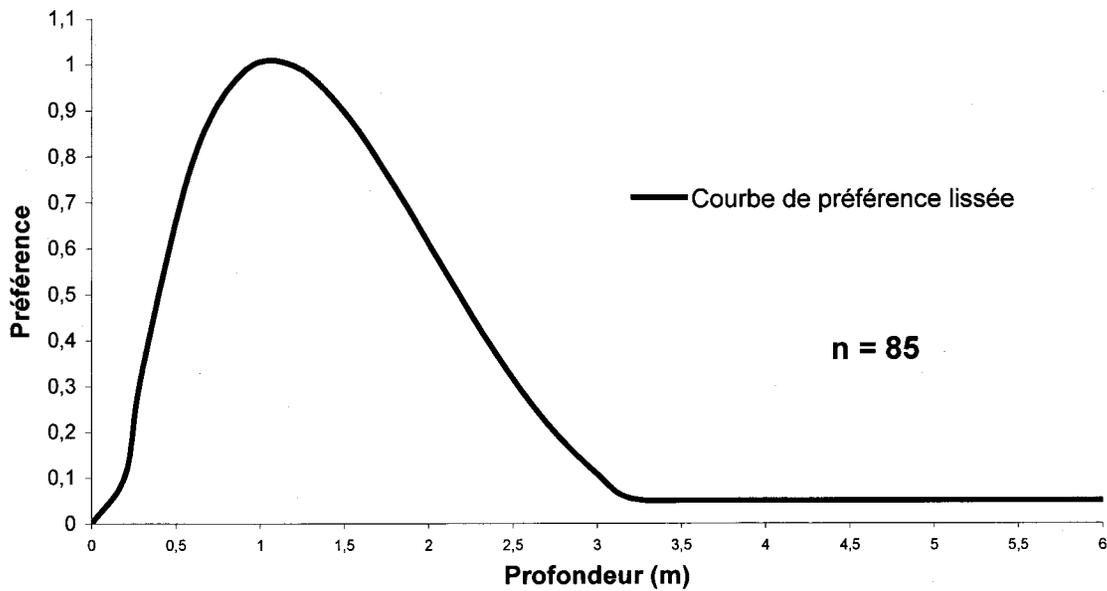


Figure 39 : Modèle d'habitat de reproduction ( $I_{prof}$ ) pour le grand corégone – Profondeur (Source GENIVAR, 2004).

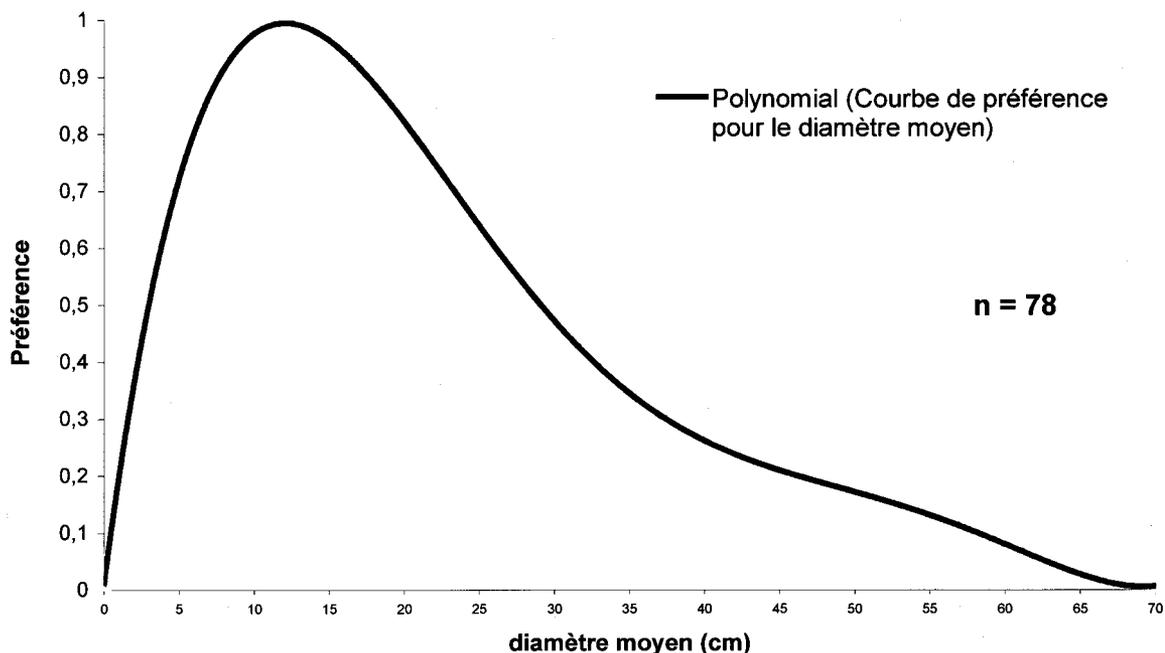


Figure 40 : Modèle d'habitat de reproduction ( $I_{subs}$ ) pour le grand corégone –Taille du substrat (GENIVAR, 2004).

### 5.3 Modèle de l'esturgeon jaune

#### 5.3.1 Indices de base univariés

Le modèle retenu pour l'esturgeon jaune est également construit à l'aide d'indices de qualité d'habitat ( $IQH$ ) basés sur l'utilisation brute du milieu par l'espèce. Il a été développé par Environnement Illimité. Pour la fonction reproduction, il est basé sur l'histogramme normalisé des observations de présence d'œufs en fonction de la variable considérée.

**Indice de vitesse.** L'indice de base pour la vitesse ( $I_{vit}$ ) est représenté à la figure 41 et les équations correspondantes sont données ci-après. La classe de vitesse maximale est atteinte à 0,5-0,8 m/s (centre de la classe à 0,65 m/s). Des valeurs  $I_{vit}$  optimales ( $> 0,7$ ) sont observées pour la gamme de vitesses comprises entre 0,2 et 1,1 m/s. La courbe  $I_{vit}$  a été lissée à l'aide d'un polynôme d'ordre 3. Les paramètres mathématiques sont donnés ci-après.

Si vitesse ( $V$ ) = 0 m/s,  $I_{vit} = 0$

Si  $0 < V < 1,85$  m/s,  $I_{vit} = 1,0831 \times V^3 - 4,0095 \times V^2 + 3,7261 \times V - 0,0283$  [Équation 6]

Si  $V > 1,85$  m/s,  $I_{vit} = 0$

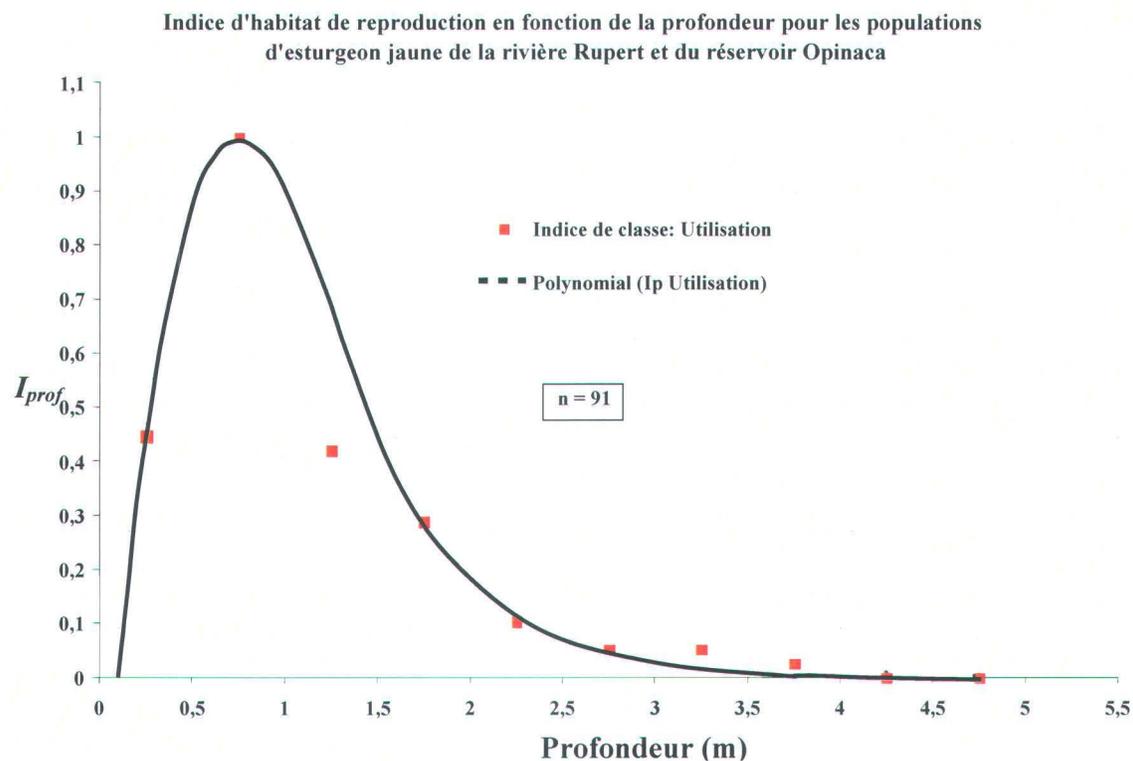
**Indice de profondeur.** Pour ce qui est de la profondeur ( $H$ ), l'utilisation maximale de l'habitat se produit à des profondeurs de 0,5 à 1,0 m (pic à 0,75). Un indice  $I_{prof}$  supérieur à 0,7 est applicable entre les valeurs de 0,4 et 1,25 m. La courbe  $I_{prof}$  a été ajustée à l'aide d'un polynôme d'ordre 3 pour les profondeurs inférieures à 1,75 m et une courbe exponentielle a été utilisée pour les profondeurs supérieures. Les fonctions décrivant ces courbes (figure 41) sont les suivantes :

$$\text{Si } 0 < H < 0,1, I_{prof} = 0$$

$$\text{Si } 0,1 < H < 1,75, I_{prof} = 1,0166 \times H^3 - 4,0063 \times H^2 + 4,2855 \times H - 0,3895 \quad \text{[Équation 7]}$$

$$\text{Si } 1,75 < H < 5,0, I_{prof} = 6,5876 e^{-1,7884 \times H} \quad \text{[Équation 8]}$$

$$\text{Si } H > 5,0, I_{prof} = 0$$



**Figure 41 : Modèle d'habitat de reproduction de l'esturgeon jaune pour la profondeur ( $I_{prof}$ ) d'après l'utilisation (Source : Environnement Illimité, 2004)**

**Indice de substrat.** La distribution des pourcentages de chacune des classes de substrat est présentée à la figure 42. Le substrat de fraie utilisé par l'esturgeon jaune est constitué principalement d'un assemblage de blocs (20 à 70 %), galets (25 à 60 %), cailloux (< 30 %) et gravier (< 5 %) (tableau 2). Les substrats limitants sont caractérisés par une trop grande proportion de roche mère (plus de 40 %), ou de gravier (plus de 30 %). Notons aussi que seulement un faible pourcentage de sable peut être présent, soit moins de 10 %. L'indice de base

pour le substrat est obtenu par la multiplication des sous-indices correspondant à chaque classe de taille (tableau 2).

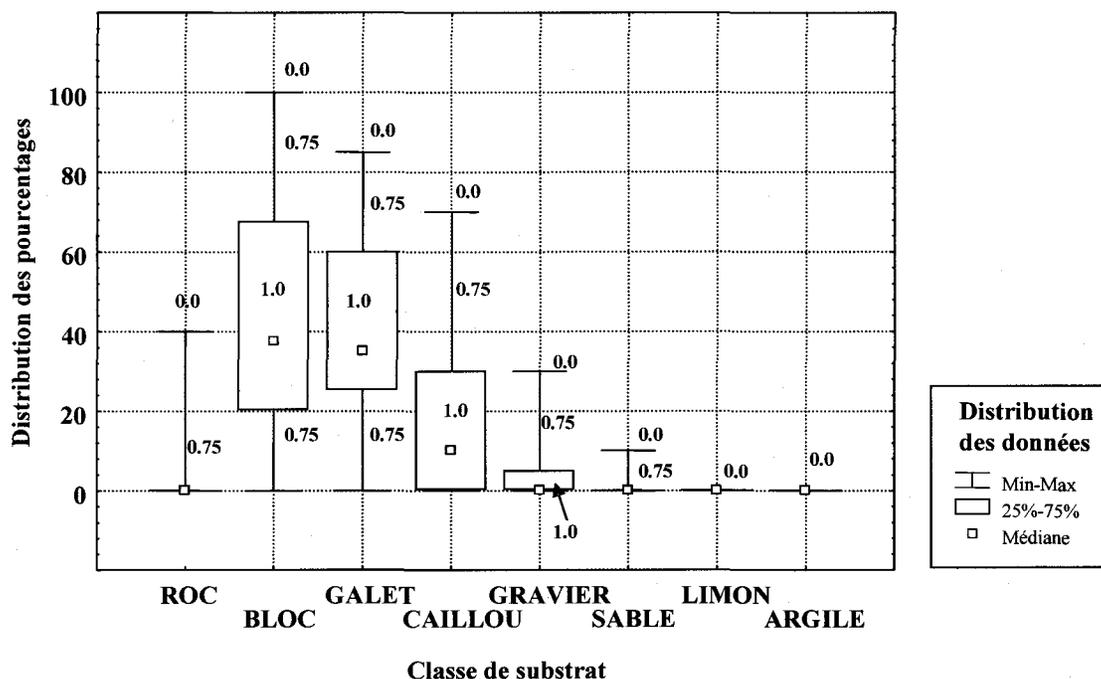


Figure 42 : Modèle d'habitat de reproduction pour l'esturgeon jaune d'après l'utilisation de chacune des classes de substrat. (Source Environnement Illimité Inc., 2004)

Tableau 2 — Proportion des différentes classes de substrat sur les frayères à esturgeon jaune des rivières Rupert et Eastmain et valeur des sous-indices de substrat correspondants (Source : Environnement Illimité Inc., 2004)

Distribution des données	Quartile inférieur	25 à 75 %	Quartile supérieur	Portion excédant le quartile supérieur
$I_{subs}$	0,75	1	0,75	0
% de roc		0%	1-40 %	41-100 %
% de bloc	0-19 %	20-70 %	71-100 %	
% de galet	0-24 %	25-60 %	61-85 %	86-100 %
% de caillou		0-30 %	31-70 %	71-100 %
% de gravier		0-5 %	6-30 %	31-100 %
% de sable		0%	1-10 %	11-100 %
% de limon		0%		1-100 %
% d'argile		0%		1-100 %

### 5.3.2 Indice global pour l'esturgeon jaune

L'équation de l'indice global d'habitat ( $IQH$ ) pour l'esturgeon jaune des rivières Eastmain et Rupert ( $IQH_U$ ) est la suivante :

$$IQH_U = I_{Vit}^{0,284} \times I_{Prof}^{0,345} \times I_{Subs}^{0,371} \quad [\text{Équation 9}]$$

Les coefficients de pondération (les exposants) ont été obtenus statistiquement en fonction de la variance expliquée (voir GENIVAR 2004).

### 5.4 Modèle de la « guildes printanière »

Les préférences d'habitat de reproduction de la guildes printanière apparaissant assez similaires, les deux ensembles de données ont été amalgamés afin d'augmenter la taille de l'échantillon et améliorer les résultats de prédiction. Les modèles de microhabitats de cette « guildes » sont des indices probabilistes d'habitat ( $IPH$ ) conformes à l'approche proposée par Guay *et al.* (2000). L'indice probabiliste d'habitat ( $IPH$ ) prend la forme suivante

$$IPH = 1 / (1 + e^{-\lambda}) \quad [\text{Équation 10}]$$

Où  $\lambda$  est une fonction polynomiale dérivée d'une régression logistique multiple.

Le modèle retenu pour la guildes est le suivant:

Pour l' $IPH$ ,  $\lambda$  est donnée par :

$$\begin{aligned} \lambda = & 1,6111H + 5,8145V - 1,1231H^2 - 2,2876V^2 - 0,0146B + 0,0093Ga \\ & + 0,028C - 0,0083Gr - 0,064S - 0,0226L - 3,0346Fr - 1,7617 \end{aligned} \quad [\text{Équation 11}]$$

Où

$H$  est la profondeur

$V$  représente la norme de la vitesse

$Fr$  est le nombre de Froude (exprime le régime d'écoulement)

$B$  = % de blocs

$Ga$  = % de galets

$C$  = % de cailloux

$Gr$  = % de gravier

$S$  = % de sable

$L$  = % de limon

Puisque, dans HYDROSIM, la profondeur  $H$  peut prendre des valeurs négatives aux endroits secs, les valeurs d' $IPH$  sont ramenées à zéro lorsque  $H$  est égal ou inférieur à zéro.

## 5.5 Méthodologie du calcul de la disponibilité de l'habitat : les Aires Pondérées Utiles ou *APU*

Le calcul de la disponibilité d'habitats appelée Aires pondérées utiles (*APU*) est la simple intégration spatiale de la valeur d'habitat ( $IQH$  ou  $IPH$ ) sur l'ensemble de la zone d'intérêt, qui peut être le domaine simulé en entier ou une zone particulière. Cette intégration s'effectue numériquement par une somme des superficies mouillées des éléments pondérées par la valeur d'habitat calculée (Équation suivante).

$$APU = \int (IQH \text{ ou } IPH) dA \cong \sum (IQH \text{ ou } IPH)_i \Delta A_i \quad \text{[Équation 12]}$$

Le choix d'une méthode d'intégration n'est pas sans conséquence sur la valeur d'*APU* obtenue; c'est pourquoi nous présentons ci-après la méthode utilisée par l'INRS-ETE pour ce calcul qui s'effectue dans MODELEUR. L'élément utilisé par le maillage hydrodynamique HYDROSIM est un T6L, soit un triangle à 6 nœuds avec une approximation linéaire. Trois nœuds sont situés sur les sommets et trois nœuds sont placés au milieu des côtés (Voir l'annexe méthodologique). La vitesse est interpolée linéairement sur les sous-éléments T3 tandis que le niveau d'eau, la profondeur et la topographie sont représentés linéairement entre les sommets du T6L. Quel que soit le modèle préférentiel retenu, la valeur d'habitat est toujours calculée à tous les nœuds du maillage, tant les nœuds milieux que les nœuds sommets.

L'intégration sur l'élément se fait en sommant sur chacun des nœuds, la valeur d'habitat multipliée par le sixième de la surface de l'élément, de sorte que même si un ou plusieurs nœuds sont secs (ex : sur un élément frontière partiellement découvert), l'élément contribue quand même à l'habitat disponible total avec ses nœuds mouillés. De la même façon, lorsqu'on trace des zones d'intérêt plus localisées telles que les frayères, tous les nœuds d'un élément n'ont pas besoin d'être dans cette zone pour que l'élément contribue au calcul. Aussitôt qu'un nœud est dans la zone d'intérêt, il contribuera au calcul de l'habitat disponible pour 1/6 de la surface de l'élément auquel il appartient.

Signalons ici que la méthode d'intégration utilisée par GENIVAR élimine l'élément dont un nœud ou plus se retrouve en dehors du domaine d'intégration. Cette approche devrait donner des valeurs d'*APU* sensiblement inférieures à celles obtenues ici. Le lecteur est invité à consulter le rapport de GENIVAR pour comparer ces résultats de disponibilité.

## 5.6 La disponibilité d'habitats de reproduction – Tronçon PK 216

Les habitats pour toutes les espèces ont été intégrés sur toute la surface du domaine de simulation. Pour ce qui est de l'esturgeon, l'habitat a aussi été intégré sur une zone plus localisée, identifiée aux frayères (figure 43). Sur les différents graphiques, la mention superficie

> 0,5 ou > 0,7 dans les légendes signifie que seules les surfaces possédant un indice supérieur à 0,5 et 0,7 respectivement ont été prises en compte. Autrement (i.e. sans mention de > 0,5 ou > 0,7), toutes les gammes de valeur de l'habitat sur la surface considérée sont intégrées dans le calcul. Les résultats sont présentés à la figure 44 (grand corégone), à la figure 45 (esturgeon, domaine complet), à la figure 46 (esturgeon, zone de fraie) ainsi qu'à la figure 47 (gilde). Ces résultats ne feront pas l'objet d'interprétation dans ce rapport. Le lecteur est renvoyé au rapport GENIVAR (2004) pour leur interprétation et la formulation de recommandations concernant le régime de débits réservés écologiques relié à la reproduction de ces espèces.

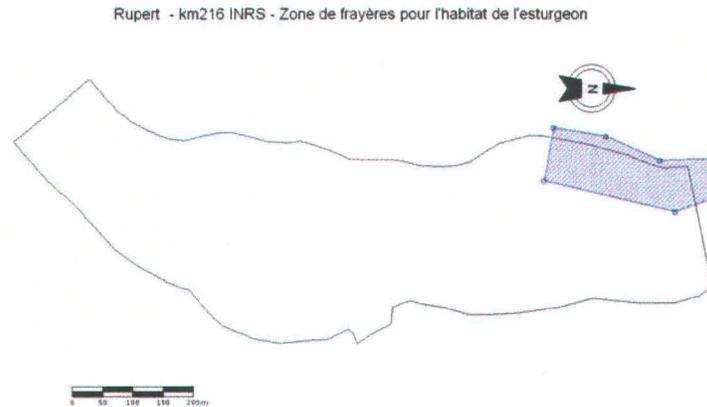


Figure 43 : Zone de calcul de la disponibilité d'aires de fraie de l'esturgeon jaune – PK 216

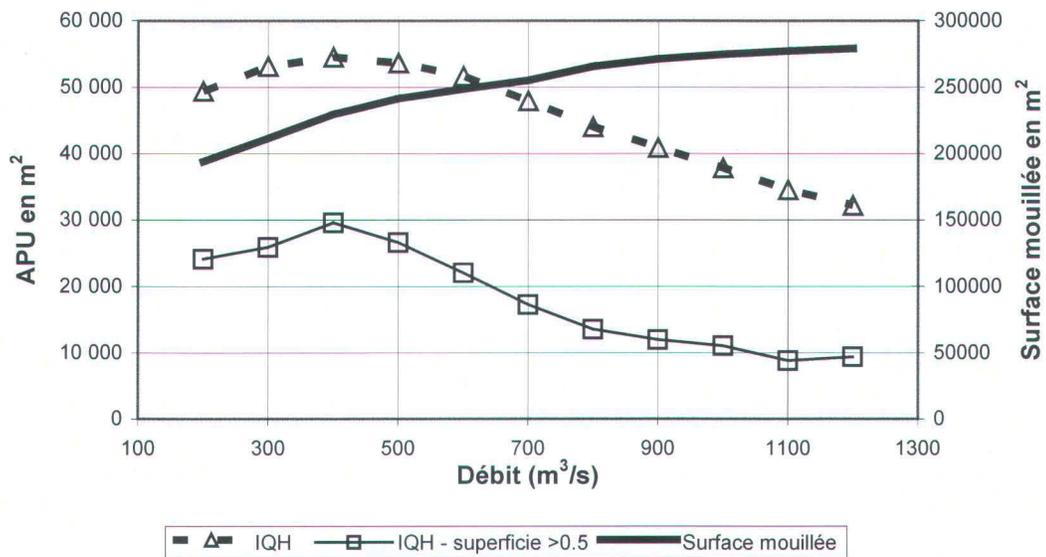


Figure 44 : Disponibilité d'habitats de fraie du grand corégone de la rivière Rupert – PK 216

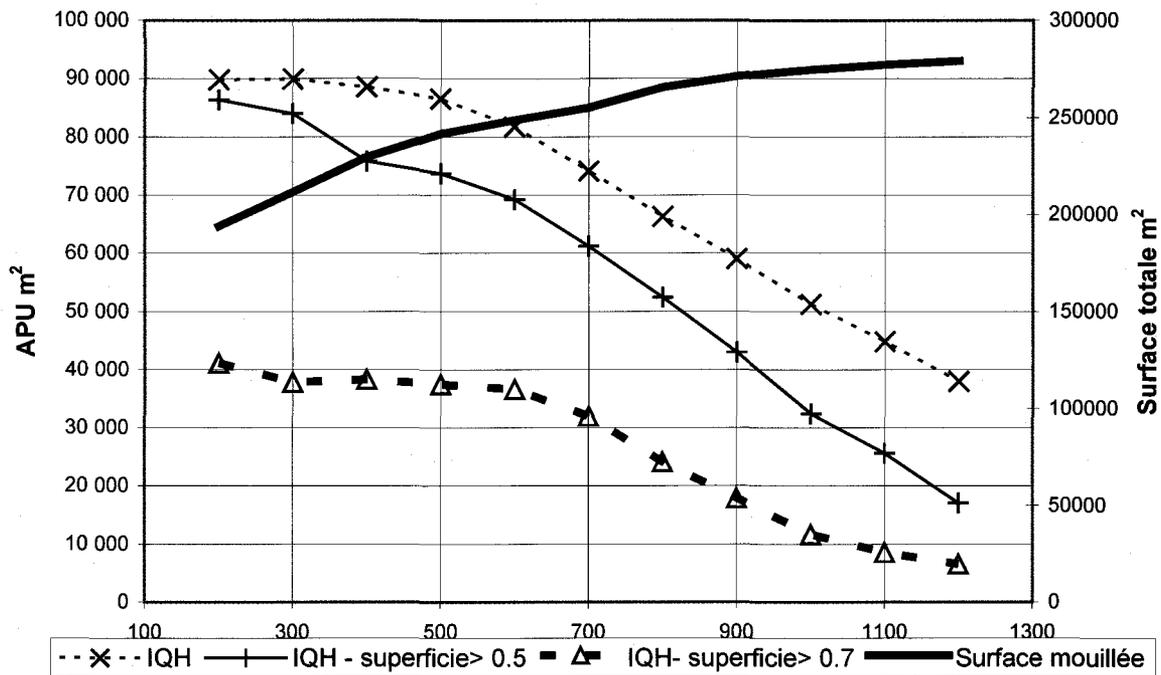


Figure 45 : Disponibilité d'habitats de fraie de l'esturgeon jaune de la rivière Rupert – PK 216

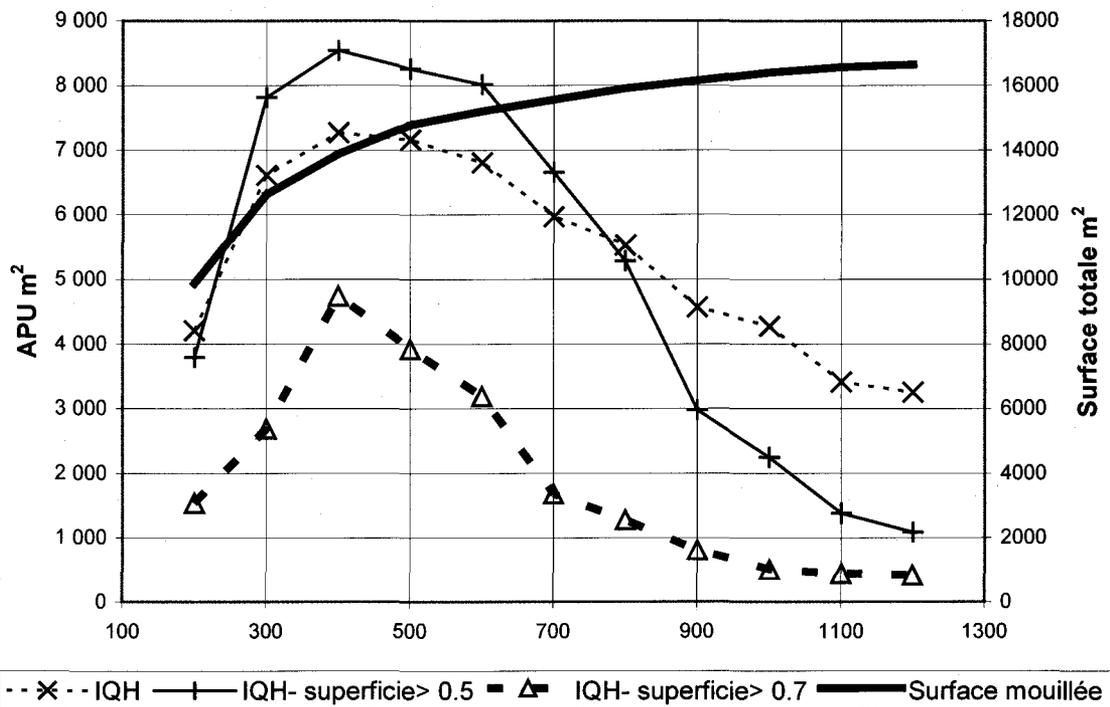


Figure 46 : Disponibilité d'habitats de fraie de l'esturgeon jaune de la rivière Rupert - Frayère identifiée du PK 216

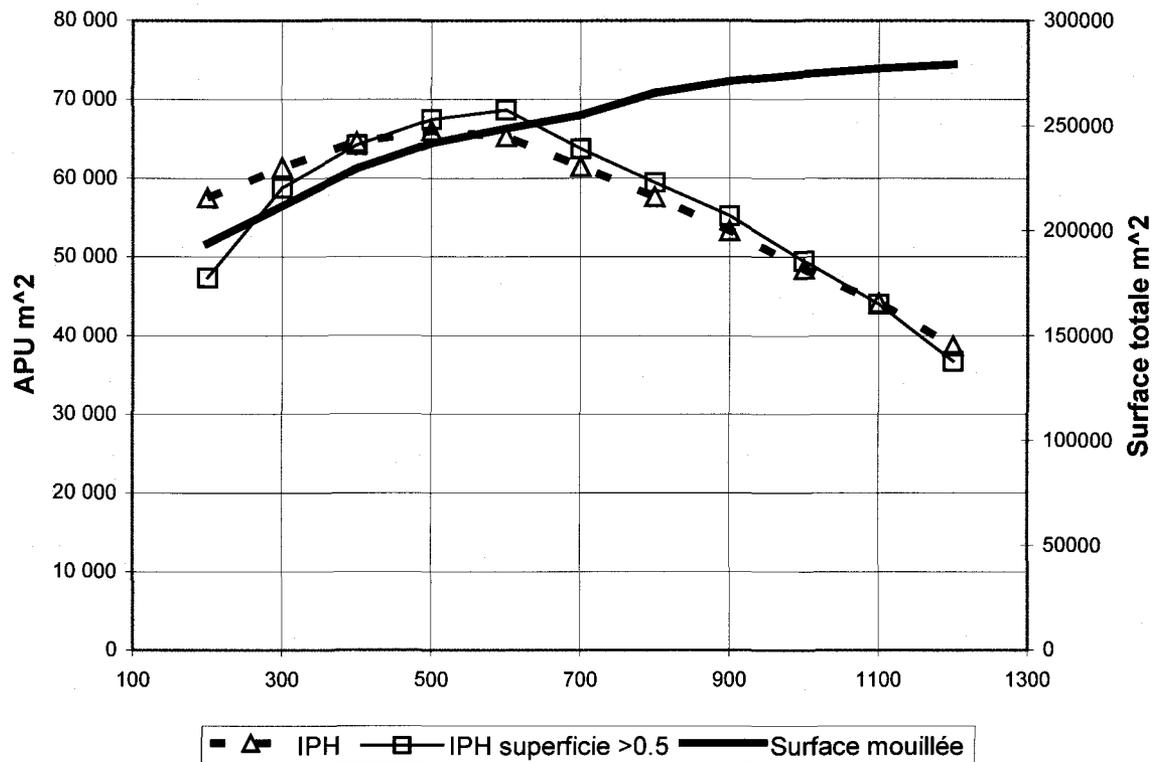


Figure 47: Disponibilité d'habitats de fraie de la guild printanière de la rivière Rupert – PK 216

## 5.7 La disponibilité d'habitats de reproduction – Tronçon PK 281

Les habitats pour le corégone et la guild printanière ont été intégrés sur toute la surface du domaine de simulation. Pour ce qui est de l'esturgeon, l'habitat a été intégré sur la zone aval du tronçon PK 281 (figure 48) mais également sur la zone identifiée des frayères (figure 49).

Comme précédemment, la mention superficie > 0,5 ou > 0,7 dans les légendes des graphiques signifie que seules les surfaces possédant un indice supérieur à 0,5 et 0,7 respectivement ont été prises en compte. Autrement (i.e. sans mention de > 0,5 ou > 0,7), toutes les gammes de valeur de l'habitat sur la surface considérée sont intégrées dans le calcul. Les résultats de disponibilité d'habitat sont donnés à la figure 50 (grand corégone), à la figure 51 (guild), à la figure 52 (esturgeon jaune, zone aval) ainsi qu'à la figure 53 (esturgeon jaune, zone de fraie). Comme pour le tronçon précédent, ces résultats ne feront pas l'objet d'interprétation dans ce rapport. Le lecteur est renvoyé au rapport GENIVAR (2004) pour plus de plus amples détails et les recommandations reliées.

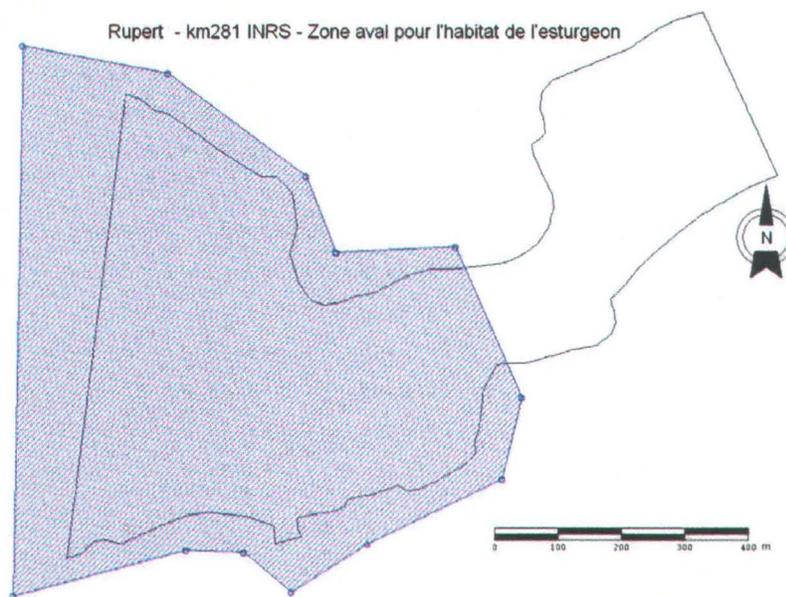


Figure 48 : Zone de calcul de la disponibilité d'aires de fraie de l'esturgeon jaune – Aval du PK 281

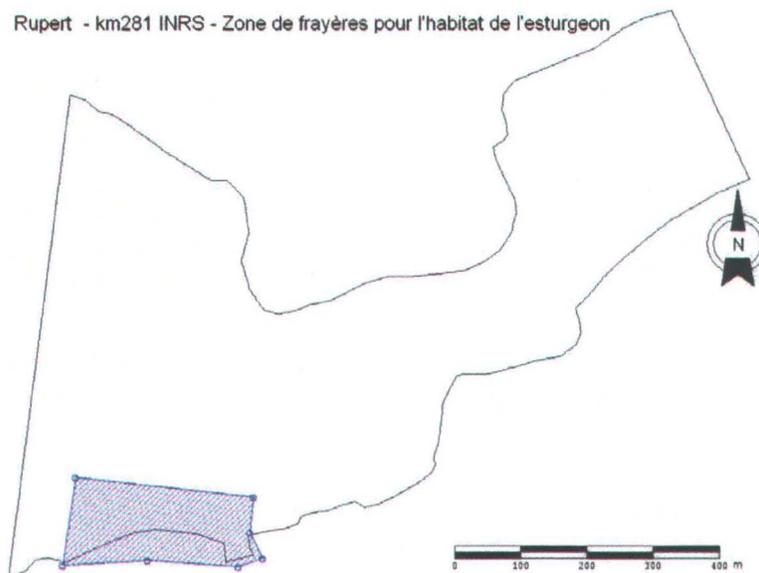


Figure 49 : Zone de calcul de la disponibilité d'aires de fraie de l'esturgeon jaune –  
Frayère en rive gauche en aval du PK 281

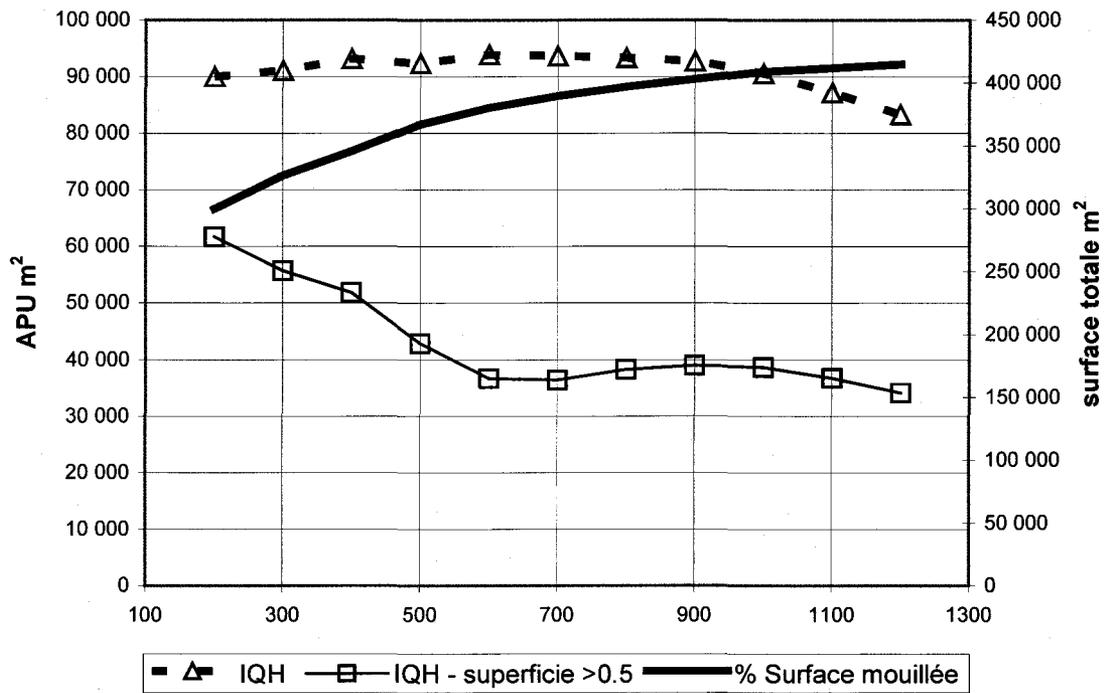


Figure 50 : Disponibilité d'habitats de fraie du grand corégone de la rivière Rupert – PK 281

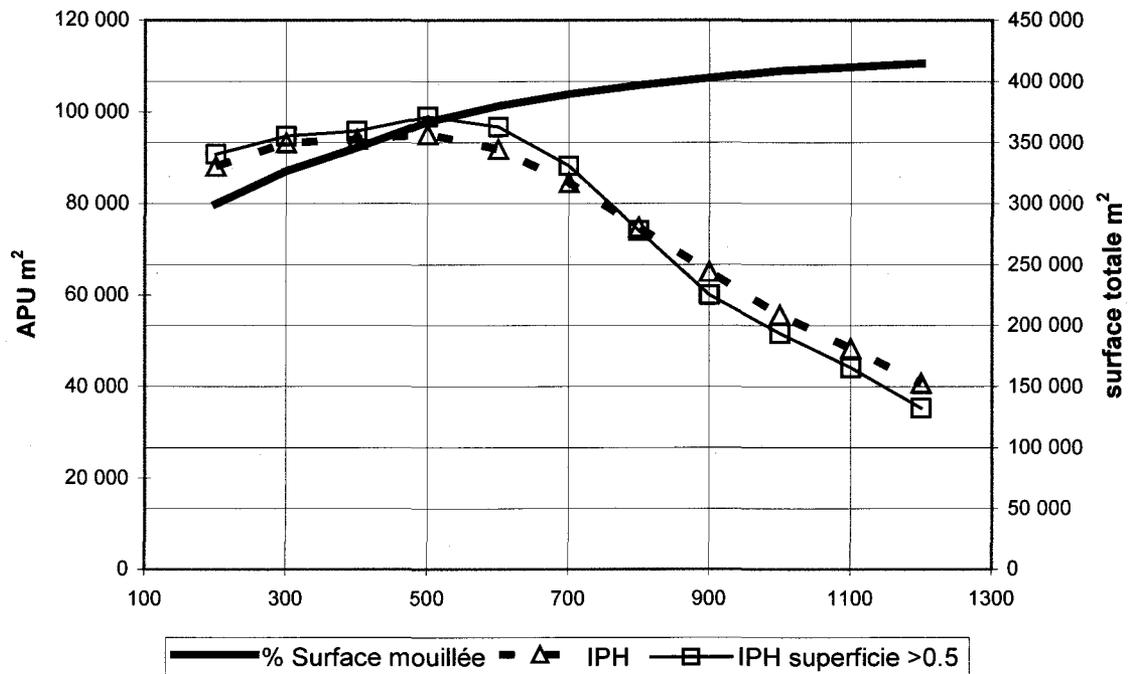


Figure 51: Disponibilité d'habitats de fraie de la guide printanière de la rivière Rupert – PK 281

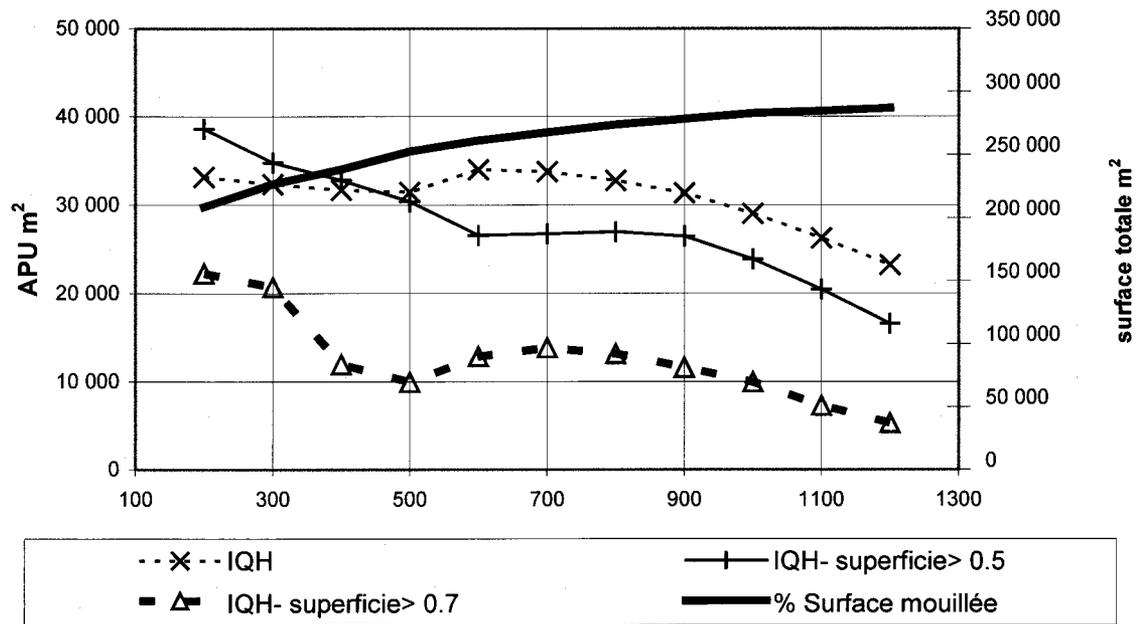


Figure 52 : Disponibilité d'habitats de fraie de l'esturgeon jaune de la rivière Rupert - Zone aval du PK 281

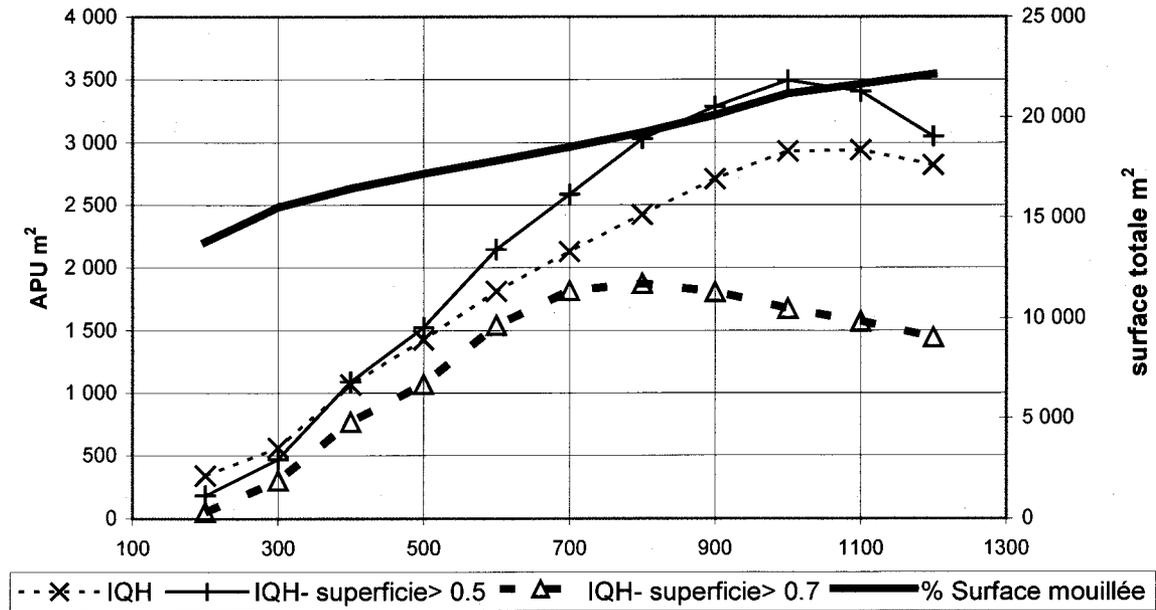


Figure 53 : Disponibilité d'habitats de fraie de l'esturgeon jaune de la rivière Rupert - Zone de fraie identifiée du PK 281

## 6. Conclusions

---

### 6.1 Sur la portée du mandat

La présente étude visait à effectuer des simulations d'habitats de reproduction du poisson dans deux tronçons de la Rupert, parallèlement à celles réalisées par GENIVAR (2004). Le mandat s'inscrit dans une perspective de précaution et d'appui scientifique pour la détermination d'un régime de débits réservés écologiques visant la conservation des habitats de reproduction.

La portée de cette étude se limitait donc à la réalisation des calculs avec les outils de simulation et d'analyse spatiale développés à l'INRS-ETE, soit HYDROSIM pour les simulations hydrodynamiques et MODELEUR pour toutes les tâches de préparation de données de terrain, de maillage, de paramétrisation et de pilotage des simulations ainsi que pour le post-traitement et la visualisation des résultats. GENIVAR a réalisé un mandat similaire en utilisant le logiciel TELEMAC-2D développé par le Laboratoire National d'Hydraulique (LNH) de l'ÉDF (Électricité de France). Une comparaison des résultats hydrodynamiques de ces outils était donc de mise afin de mieux évaluer les différences pouvant en résulter lors des calculs d'habitats. Les calculs d'habitats faisaient partie du mandat mais leur interprétation a été confiée au consultant principal.

### 6.2 Sur les résultats hydrodynamiques

Deux tronçons de la rivière Rupert (PK 216 et PK 281) ont été sélectionnés par le consultant principal, principalement pour des raisons écologiques : les deux tronçons sont représentatifs des milieux lotiques propices à la reproduction des espèces cibles les plus sensibles de la rivière Rupert et ils sont situés assez près du point de dérivation. Des campagnes de terrain exhaustives ont été conduites afin de caractériser tous les ensembles de données requis pour procéder à une modélisation. Cependant, les ensembles de données topographiques des deux tronçons (surtout le PK 281) n'ont pas pu être complétés sur le terrain à cause de contraintes logistiques insurmontables (présence de rapides, limitations instrumentales). Des hypothèses physiques de section d'écoulement ont donc été posées sur la base d'indices visibles à la surface de l'écoulement (affleurements, eaux blanches, lignes de courant) et de mesures de niveau d'eau afin de compléter l'information disponible et construire un modèle numérique de terrain représentatif des écoulements observés. La validation de ces hypothèses s'est faite en comparant les résultats de simulation avec les mesures disponibles, surtout celles du niveau d'eau.

La paramétrisation du modèle hydrodynamique du processus de frottement ( $n$  de Manning) des deux tronçons à l'étude a été réalisée avec la formule générique proposée dans HYDROSIM, laquelle calcule le paramètre comme une fonction distribuée (i.e. fonction de  $x,y$ ) de la taille caractéristique locale des substrats. Aucun ajustement additionnel n'a été requis à ce stade. La phase de calibration ne comportait donc que l'ajustement topographique sur une partie des deux domaines étudiés, surtout le PK 281.

Les lignes d'eau simulées ont été comparées avec les lignes d'eau mesurées pour tous les états hydrologiques documentés (de calibration et de validation) et les modèles des deux tronçons à l'étude ont été jugés satisfaisants pour les niveaux d'eau. L'ensemble des conditions de simulation (terrain, paramétrisation) forme donc un tout logique et consistant à cet égard. De même, les conditions de vitesses ont été vérifiées en quelques transects et les résultats ont été jugés valides malgré une tendance à un lissage latéral des vitesses. Ce comportement est inhérent à la résolution numérique discrétisée des équations de Saint-Venant utilisant une viscosité numérique. Par contre, la mesure elle-même n'offre pas de valeurs de référence des vitesses homogènes avec les résultats de simulation, l'observation étant de nature locale et instantanée.

### 6.3 Sur les particularités des outils de simulation

Bien que les outils de simulation employés (HYDROSIM vs TELEMAC-2D) permettent de résoudre les mêmes équations (Saint-Venant intégrées dans la verticale) avec la méthode des éléments finis, plusieurs subtilités ayant trait surtout aux méthodes numériques employées, à la représentativité du modèle de terrain, au maillage, à la paramétrisation, à l'expérience des opérateurs et à la démarche de calibration/validation représentent des sources de différences qui conduisent à des résultats qui peuvent se démarquer sensiblement dans certaines régions de l'écoulement, notamment près des frontières ouvertes, là où sont imposées les conditions aux limites. Malgré ces réserves, les ensembles de résultats générés indépendamment par les deux exercices pour les deux tronçons à l'étude sont comparables malgré les différences mentionnées.

### 6.4 Sur les résultats de disponibilité d'habitats

Différents modèles d'habitats préférentiels proposés par les consultants (GENIVAR et Environnement Illimité) ont été appliqués aux résultats hydrodynamiques. Les calculs sont effectués aux nœuds du maillage pour chaque débit simulé.

Les résultats de disponibilité d'habitat ont été calculés avec le logiciel MODELEUR (fonction CALCULATRICE). Le programme d'intégration spatiale utilisé considère la partie mouillée des éléments partiellement découverts ce qui n'est pas toujours le cas dans les programmes de ce genre. De même, un élément situé à cheval sur une limite d'intégration est pris en considération pour la partie comprise à l'intérieur de la limite. Cette « subtilité » numérique peut conduire à des disponibilités d'habitats sensiblement différentes en valeur absolue (en  $m^2$ ) mais qui se répercutent toujours dans le même sens en valeur relative en fonction du débit concerné. Il est donc plus important de s'attarder à la forme de la courbe des aires pondérées utiles ou *APU* (valeur du débit optimal par exemple) qu'aux quantités absolues prédites par le modèle.

Les recommandations concernant le régime de débits réservés ont été confiées au consultant principal. Diverses approches ont été considérées pour sélectionner les paramètres du régime hydrologique à recommander. Ces approches n'ont pas été rapportées ici, cet aspect ne faisant pas partie de notre mandat. Mentionnons seulement que, dans la situation où plus d'un modèle est utilisé, diverses approches du débit réservé sont testées ou l'existence de tout autre facteur de nature à donner des valeurs différentes de débit recommandé intervient, l'INRS-ETE adhère à l'interprétation du *principe de précaution* qui stipule qu'on doit préférentiellement sélectionner la(les) valeur(s) les plus conservatrices au sein de la gamme obtenue.

---

## 7. Bibliographie

---

- Boudreau, P., M. Leclerc et G.R. Fortin, 1994. Modélisation hydrodynamique du lac Saint-Pierre, fleuve Saint-Laurent: influence de la végétation aquatique. *Revue canadienne de génie civil* **21**(3): 471-489.
- Électricité de France, 2001. Système de modélisation TELEMAC 2D Version 3.0 – Notes de principe. Rapport HE 43/94/052/B. Direction des Études et Recherches – Laboratoire national d’Hydraulique. Chatou, France.
- Environnement Illimité, 2004. Centrale de l’ Eastmain-1-A et dérivation Rupert - Esturgeon jaune. Rapport présenté à Hydro-Québec et à la Société d’Énergie de la Baie James. 110 p. et annexes.
- GENIVAR, 2004. Centrale de l’ Eastmain-1-A et dérivation Rupert – Détermination du régime de débits réservés écologiques. Rapport de GENIVAR Groupe Conseil inc. pour Hydro-Québec et la Société d’énergie de la Baie James. 92 p. et annexes.
- Guay, J.-C., D. Boisclair, M. Leclerc et M. Lapointe, 2003. Assessment of the transferability of biological habitat models for juveniles of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Can. J. of Fisheries and Aquatic Sciences*, **60**: 1398-1408.
- Heniche, M., Y. Secretan, P. Boudreau et M. Leclerc, 2002. Dynamic tracking of flow boundaries in rivers with respect to discharge. *Journal of Hydraulic Research (IAHR)*. **40**(5):589-602.
- Heniche M., Y. Secretan, P. Boudreau and M. Leclerc, 1999. A new finite element drying-wetting model for rivers and estuaries. *Int. J. Advances in Water Resources*. **38**(3) : 163-172 (Janvier)
- Heniche, M., Y. Secretan et M. Leclerc, 1999. MODELEUR/HYDROSIM – Guide d’utilisation. Document HYDROSIM 1.0a06. Rapport INRS-Eau R482-G2, 90p. p.v., Janvier
- Heniche, M. Y. Secretan et M. Leclerc, 2001. Efficient ILU preconditioning and inexact-Newton-GMRES to solve the 2D steady shallow water equations. *Comm. In Numerical Meth. in Engineering*, **17**(2) : 69-75.
- Leclerc, M., A. Saint-Hilaire & J. Bechara, 2003. État des connaissances et perspectives de la modélisation d’habitats pour la détermination des débits réservés/ State-of-the-art and perspectives of habitat modeling for determining conservation flows. *Revue canadienne des Ressources hydriques*, **28**(2):1-16.

- Leclerc, M., J.F. Bellemare, S. Trussart, 1990. Simulation hydrodynamique de l'estuaire supérieur du fleuve Saint-Laurent (Canada) avec un modèle aux éléments finis couvrant-découvrant. *Revue canadienne de génie civil*, 17(5):739-751.
- Leclerc, M., J.F. Bellemare, G Dumas et G. Dhatt, 1990. A finite element model of estuarian and river flows with moving boundaries. *Advances in Water Resources*, 4(13):158-168.
- Leclerc, M., G. Dhatt, J.L. Robert, J.C. Tessier, A. Soulaïmani, P. Dupuis et Y. Matte, 1987. Modélisation des écoulements de l'Archipel de Montréal par éléments finis: aspects divers de l'application. *Revue internationale des Sciences de l'eau*, 3(2), 41-56.
- Leclerc, M., J.F. Bellemare, G. Dhatt, F. Parrot, R. Blanchet, A. Soulaïmani et T. Hugues, 1987. Modélisation par éléments finis bi- et tridimensionnels des écoulements en charge et/ou à surface libre, homogènes et/ou stratifiés: Exemples d'application. Pour la Direction Environnement (Hydro-Québec). Rapport TAO Simulation No. TAO/HYD-87-02
- Secretan Y., Larouche E., M. Leclerc & coll., 2003. Système d'Évaluation et de Gestion des Risques d'Inondation en milieu fluvial (SEGRI) : Rapport d'étape #1. Pour: Fonds des Priorités Gouvernementales en Science et en Technologie – volet Environnement (FPGST-E). Rapports de recherche INRS-ETE #720a, b1 et e1. Pagination multiple.
- Secretan, Y., M. Leclerc, S. Duchesne et M. Heniche, 2001. Une méthodologie de modélisation numérique de terrain pour la simulation hydrodynamique bidimensionnelle. Accepté dans la *Revue de Sciences de l'eau*. 14(2) : 187-212
- Secretan, Y., Y. Roy, Y. Granger et M. Leclerc, 2000. MODELEUR/HYDROSIM – Guide d'utilisation. Document MODELEUR 1.0a07. Rapport INRS-Eau R482-G3F. 267p. p.v., Juin
- Secretan, Y. and M. Leclerc, 1998. MODELEUR: a 2D hydrodynamic GIS and simulation software. Proceedings *Hydroinformatics (IAHR)*. Copenhagen. August.

## Annexe méthodologique : la théorie d'HYDROSIM

Cette annexe permet de se former une idée un peu plus précise des aspects scientifiques et numériques qui sous-tendent le logiciel de simulation HYDROSIM utilisé dans le cadre de cette étude. Basé sur le modèle mathématique de Saint-Venant à deux dimensions (2D) qui décrit les écoulements fluviaux et estuariens dans le plan horizontal, il dérive donc de l'intégration verticale des équations de Navier-Stokes à trois dimensions (3D) en posant différentes hypothèses fondamentales dont celle de la pression hydrostatique (ou ondes longues) et le lissage des phénomènes transitoires de turbulence. Le modèle de Saint-Venant est également appelé « modèle des eaux peu profondes », « équations d'ondes longues », et en anglais, « shallow water equations ». Afin de tenir compte des effets dynamiques de découverture et de recouvrement liés au débit et à la marée, le programme HYDROSIM est assorti de fonctionnalités dites « de bancs couvrant-découvrant ».

### Modèle mathématique

Le programme HYDROSIM résout la forme « flux » (*flux formulation*) des équations de Saint-Venant qui donne comme résultat les composantes en  $(x,y)$  du débit spécifique ( $q_x, q_y$ ) pour le mouvement de l'eau. Les vitesses sont récupérées en post-traitement en divisant par la profondeur locale. La figure 54 illustre les notations employées dans le modèle mathématique.

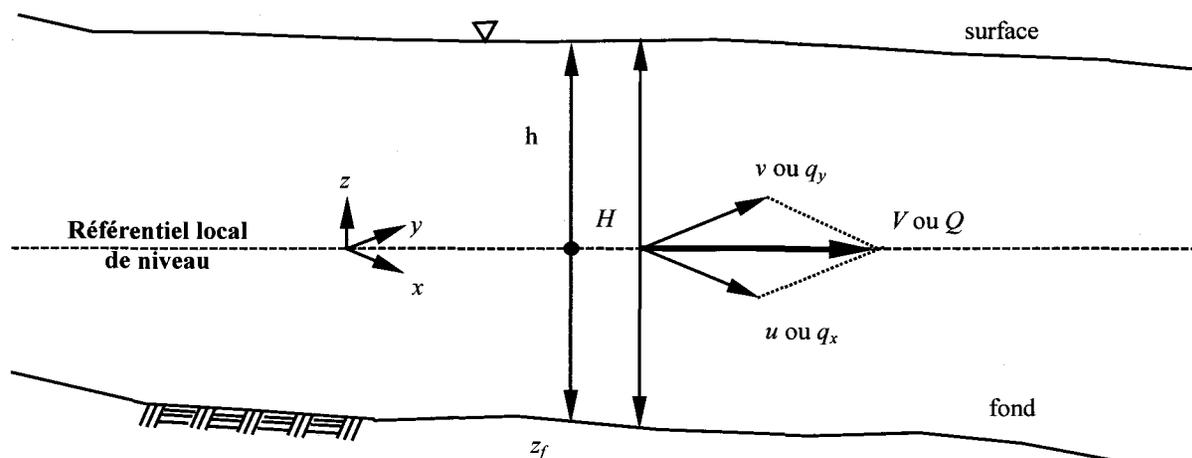


Figure 54: Notations du modèle de Saint-Venant bidimensionnel horizontal

Ci-après, nous introduisons les équations décrivant la forme flux du modèle bidimensionnel de Saint-Venant transitoire. Celles-ci décrivent en premier lieu la conservation du débit (équation de continuité) :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \text{ avec} \quad \text{Équation 13}$$

$$q_x = uH \text{ et } q_y = vH$$

Cette relation est accompagnée de deux autres équations régissant l'équilibre des forces et des accélérations (équations du mouvement) :

$$\text{Selon x: } \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial q_x q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_x q_y}{\partial y} = \sum F_x \quad \text{Équation 14}$$

$$\text{Selon y: } \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial q_y q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y q_y}{\partial y} = \sum F_y \quad \text{Équation 15}$$

avec

$$\sum F_x = -gH \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{n^2 g |\bar{q}| q_x}{H^{1/3}} + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial (H \tau_{xx})}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial (H \tau_{xy})}{\partial y} \right) + F_{cx} + F_{wx} \quad \text{Équation 16}$$

$$\sum F_y = -gH \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{n^2 g |\bar{q}| q_y}{H^{1/3}} + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial (H \tau_{yx})}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial (H \tau_{yy})}{\partial y} \right) + F_{cy} + F_{wy} \quad \text{Équation 17}$$

Où,

- $F_{ci}$  : composantes de la force de Coriolis ;
- $F_x, F_y$  : composante de force massique selon  $x$  ou  $y$  ;
- $F_{wi}$  : composantes de la contrainte du vent ;
- $g$  : accélération gravitationnelle ;
- $h$  : hauteur (niveau) d'eau ;
- $H$  : profondeur de la colonne d'eau ( $=h-z_f$ ) ;
- $n$  : coefficient de frottement de Manning ;
- $|\bar{q}|$  : module du débit spécifique ;
- $q_x, q_y$  : composantes du débit spécifique selon  $x$  et  $y$  ;
- $x, y$  : coordonnées du plan ( $x$  vers l'est ;  $y$  vers le nord) ;
- $\rho$  : masse spécifique de l'eau ;
- $\tau_{ij}$  : contraintes de Reynolds .

Les contraintes de Reynolds  $\tau_{ij}$  qui représentent les cisaillements et les compressions turbulentes sont représentées par un modèle de turbulence faisant intervenir le tenseur de déformation angulaire de l'écoulement et une fermeture turbulente de type « zéro équation » appelé « longueur de mélange ».

Pour la présente application, les forces du vent et de Coriolis n'ont pas été considérées. Dans le programme HYDROSIM, le coefficient de frottement de Manning est un amalgame de différentes influences de même type comprenant la résistance du fond de la rivière (rugosité du lit), de la glace et des plantes aquatiques selon que ces facteurs entrent en considération dans un écoulement donné. Dans le cas de la glace, la colonne d'eau  $y$  est réduite en fonction de l'épaisseur du couvert. La glace et les macrophytes ne sont pas pris en compte ici.

La formulation qui précède a été adaptée pour tenir compte explicitement dans le processus de résolution du phénomène des bancs *couvrant-découvrant*. Cette prise en compte est indispensable dans la très grande majorité des écoulements naturels à surface libre. En effet, pour une topographie donnée, la position de la frontière de l'écoulement dans les rivières, les fleuves et les estuaires, est dictée par la valeur du débit, l'amplitude de la marée, ou le niveau du plan d'eau en amont des ouvrages de contrôle. Par contre, si l'écoulement se produit dans un canal aux parois verticales (ex : quai dans un port), la précaution n'est pas requise.

La stratégie numérique utilisée dans HYDROSIM pour tenir compte du découvrement ne présume rien sur la position du niveau d'eau. Le niveau de surface peut librement plonger sous le niveau de la berge engendrant en cet endroit des profondeurs négatives dans le modèle. Dans le domaine discret, on adopte la convention qui considère les éléments secs (découverts) à profondeur négative ( $H < 0$ ) et inversement ceux qui sont mouillés (couverts) à profondeur positive ( $H > 0$ ). La ligne de rive est représentée par la frontière répondant à la condition de profondeur nulle ( $H = 0$ ). Notons que, dans la zone sèche, l'écoulement est contraint à des valeurs très faibles (pénalisé) pour respecter les principes de conservation de la masse et de la quantité de mouvement dans la zone mouillée.

## Traitement des conditions aux limites et initiales

Dans une simulation non-stationnaire, il est requis de spécifier, en plus des conditions aux limites, de conditions initiales consistantes. En régime permanent, l'écoulement ne dépend pas des conditions initiales, mais le programme HYDROSIM requiert tout de même une procédure d'initialisation du niveau d'eau afin de permettre la convergence vers une solution numérique. De même, il est nécessaire de spécifier des conditions aux limites qui permettent d'abord de confiner le débit au domaine d'écoulement (condition d'imperméabilité), de contrôler le débit qui y transite (habituellement imposé à l'amont) et de régler le niveau d'eau auquel le plan d'eau doit s'ajuster, qu'il s'agisse d'un écoulement normal ou d'un plan d'eau régularisé par un ouvrage de retenue ou un seuil. Presque toujours, le niveau d'eau doit être imposé à l'aval. En amont, on a le choix d'imposer le niveau d'eau ou le débit, auquel cas une certaine forme de répartition latérale, consistante avec la solution est requise. C'est pourquoi le niveau est souvent préféré.

## Discrétisation par éléments finis

La formulation mathématique (Équations 15 à 19) est transformée en formulation variationnelle faible de type Galerkin (méthode des résidus pondérés) avant de procéder à sa discrétisation laquelle assure le passage au modèle numérique.

La discrétisation est une opération permettant de transformer un modèle mathématique dans une version numérique qui peut être traitée par des moyens informatiques. Toutes les variables distribuées dans l'espace ou le temps, soit le niveau d'eau, les composantes de la vitesse, la topographie du terrain voire, les paramètres de frottement, doivent ainsi être représentées de manière discrète, c'est-à-dire, portées sur des « noeuds » lesquels, une fois connectés entre eux, forment des « éléments finis ». La méthode d'interpolation par éléments finis est une technique spatiale d'approximation nodale qui se prête admirablement bien à la discrétisation.

Dans HYDROSIM comme dans la plupart des programmes de calcul hydrodynamique en éléments finis, les éléments décrivant le domaine de calcul dans le plan sont de forme triangulaire ce qui permet d'adapter très facilement la densité du maillage à la topographie de la rivière, incluant ses singularités locales (ponts, seuils, etc.).

L'élément principal utilisé par HYDROSIM, un T6L, est décrit à la figure 55. L'élément T6L est un triangle linéaire à six noeuds (T6L) qui est en fait un super-élément constitué de quatre éléments triangulaires linéaires à trois noeuds. On note que les variables géométriques (hauteur d'eau  $h$ , profondeur  $H$ , topographie du fond  $z_f$ ) et le coefficient de frottement  $n$  sont portés aux noeuds sommet du T6L, ce qui procure une approximation linéaire des variables considérées à cette échelle. Les vitesses et les débits spécifiques sont l'objet d'une approximation linéaire sur chacun des sous-éléments T3. Aux frontières du domaine d'écoulement, les côtés des éléments T6L sont associés à des éléments rectilignes linéaires à trois noeuds L3L lesquels permettent d'approximer certaines données reliées particulièrement aux conditions aux limites. Comme les T6L, ces éléments sont des super-éléments formés de deux sous-éléments linéaires L2.

## La résolution numérique

La résolution d'un problème d'écoulement stationnaire nécessite de mettre en œuvre une méthode numérique robuste résolvant les aspects non-linéaires. La résolution algébrique du système d'équations non-linéaires peut s'effectuer par des méthodes directes ou itératives, les dernières représentant une approche plus récente au problème offrant l'avantage de résoudre des problèmes de grande taille en minimisant l'espace mémoire requis. Dans le cas d'HYDROSIM, le choix s'est porté sur la méthode GMRES (Generalized Minimum Residual Method) dans sa version non-linéaire (Heniche *et al.*, 2001). Contrairement aux méthodes directes qui demandent le stockage optimisé de la matrice du système algébrique, la méthode GMRES ne nécessite pas une telle opération qui peut s'avérer lourde à réaliser, surtout sur des machines de calcul de capacité réduite comme les ordinateurs personnels. Par contre, le pilotage de la résolution avec GMRES est parfois plus délicat qu'avec les méthodes directes mais il permet souvent de converger plus facilement.

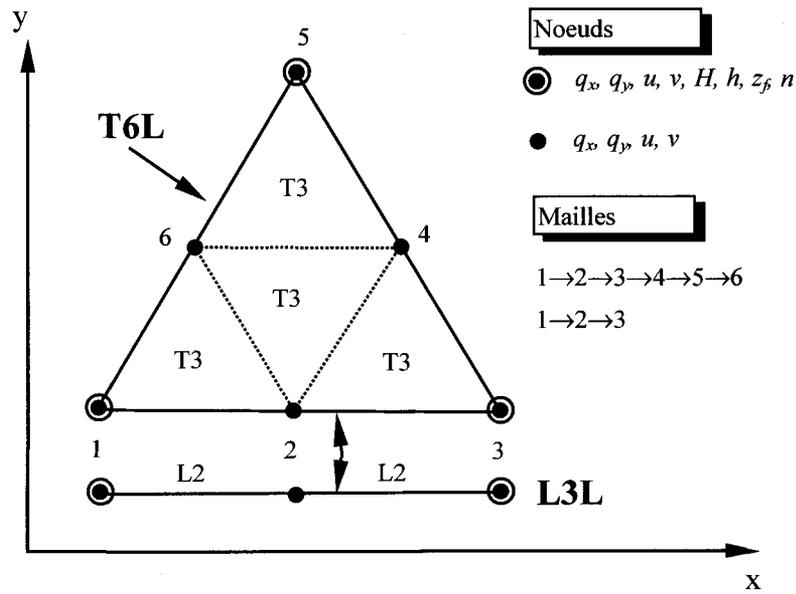


Figure 55: Discrétisation des variables à l'aide des éléments T6L, T3, L3L et L2 dans HYDROSIM